

Nog sneller schaatsen?

Wie niet sterk is moet slim zijn!

Ondanks dat er waarschijnlijk al zo'n 3000 jaar wordt geschaatst, is het nog niet helemaal duidelijk wat bepalend is binnen een schaatsslag om zoveel snelheid te maken. Zo zien we in het schaatsen zowel kleine Japanners als lange Nederlanders op dezelfde afstanden de prijzen in de wacht slepen terwijl in de meeste sporten een bepaalde lichaamsbouw voordeel ondervindt. Bovendien lijkt er niet één schaatstechniek te bestaan. Sommige schaatsers maken zogenaamde brede slagen en bestrijken daarmee de hele breedte van de baan, terwijl andere schaatsers juist smal rijden (zie [1] voor een video). Wat is nu eigenlijk de ideale techniek? En bestaat die wel? Of gaat het motto 'wie niet sterk is moet slim zijn' op en bestaat er wellicht voor ieder individu een eigen ideale techniek?

Eline van der Kruk en Arend L. Schwab

182

Voor een mens zijn schaatsen en fietsen de snelste manier om zich op eigen kracht voort te bewegen over het vlakke land en in een land als Nederland zijn het ideale transportmiddelen. We staan dan ook bekend als fiets- en schaatsgek land en het is niet zo vreemd dat Nederlanders juist in deze sportdisciplines uitblinken.

Voor een wedstrijdssporter is er eigenlijk maar één maat van prestatie: de eindtijd. De tijd waarmee de schaat-

ser over de finishlijn komt bepaalt immers of hij of zij heeft gewonnen. Maar dat maakt nog niet duidelijk welk onderdeel van de schaatsslag het meeste invloed heeft op die prestatie. Nu zou een schaatser kunnen variëren in zijn slagen en vervolgens zijn nieuwe eindtijd kunnen klokken. Maar wat als we zijn eindtijd kunnen voorspellen met een model? Dan kunnen we deze variatie aan slagen stuk voor stuk simuleren en optimaliseren.

En dat is precies wat we doen in dit onderzoek: op zoek naar de ideale schaatsslag. Onze tool? Een mechanisch model.

Schaatsslag

Schaatsen is niet simpelweg afzetten en versnellen, zoals bijvoorbeeld in het rennen. Wanneer je op het ijs zou proberen te rennen of lopen, glijdt je voet weg door de lage wrijving van het ijs. Dit is ook de reden dat de meeste beginners de eerste keer vallen bij het schaatsen. Schaatsers proberen optimaal gebruik te maken van deze lage ijswrijving, door zoveel moge-

lijk te glijden. De enige manier om dan, tijdens het glijden, af te zetten, is loodrecht op het ijs. Als je schaats dan precies in de lengte van de baan zou staan, zou je jezelf alleen naar de zijkant van de baan duwen. Daarom stuurt een schaatser tijdens het glijden zijn schaats. Hij tekent met zijn schaats elke slag een s-curve over de baan. Op die manier zet een schaatser zowel in de richting van de baan als in

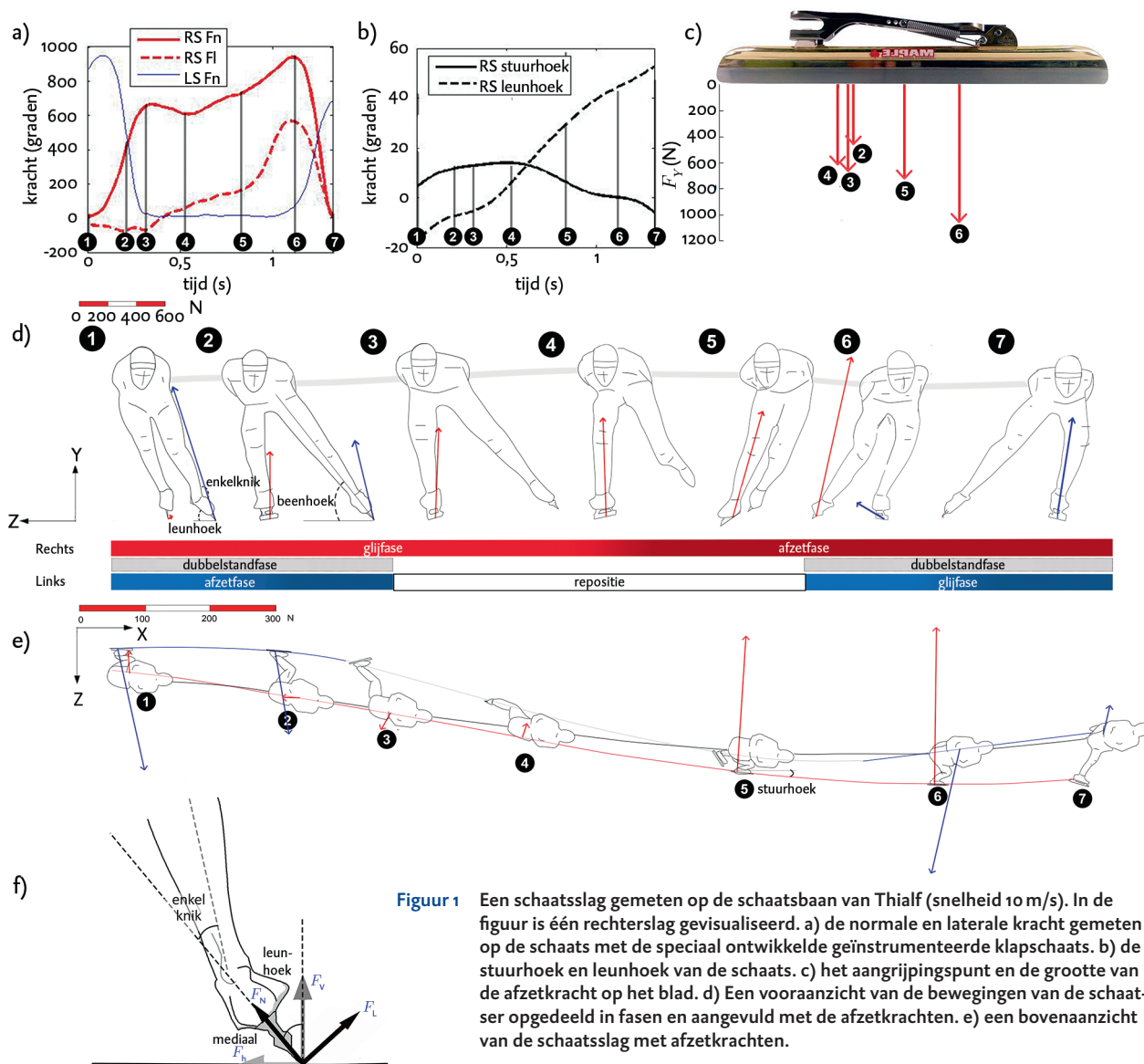
Eline van der Kruk studeerde werktuigbouwkunde en industrieel ontwerpen aan de Technische Universiteit Delft en is hier in 2013 afgestudeerd als eerste sportengineer van Nederland. Momenteel promoveert ze op onderzoek en ontwerp van een realtime feedbacksysteem dat de ideale schaatsslag voorspelt aan de hand van een biomechanisch model. Daarnaast is ze regelmatig te vinden op de Bühne van de Nederlandse theaters in de Science Battle.

E.vanderkruk@tudelft.nl



Arend L. Schwab is universitair docent aan de Technische Universiteit Delft op de faculteit Werktuigbouwkunde, aan de afdeling Biomechanical Engineering. Hij is werkzaam op het gebied van de dynamica van de mechanische systemen, de zogenaamde *multibody dynamics*. Hij is met name geïnteresseerd in contactproblemen zoals die ontstaan bij rollen en botsingen. Daarnaast houdt hij zich bezig met de dynamica van vervormbare *multibody*-systemen, eindige elementenmethode, lopende robots, schaatsen en fietsdynamica.





Figuur 1 Een schaatsslag gemeten op de schaatsbaan van Thialf (snelheid 10 m/s). In de figuur is één rechterslag gevisualiseerd. a) de normale en laterale kracht gemeten op de schaats met de speciaal ontwikkelde geïnstrumenteerde klapschaats. b) de stuurhoek en leunhoek van de schaats. c) het aangrijpingspunt en de grootte van de afzetkracht op het blad. d) Een vooraanzicht van de bewegingen van de schaatser opgedeeld in fasen en aangevuld met de afzetkrachten. e) een bovenaanzicht van de schaatsslag met afzetkrachten.

de breedte van de baan af en zie je bijvoorbeeld Sven Kramer van links naar rechts over de baan bewegen (zie [2] voor een video).

De schaatsbeweging bestaat uit drie fasen: de glijfase, de afzetfase en de repositiefase (figuur 1). Een rechterslag begint met het neerzetten van de rechterschaats op het ijs. Op dat moment is de linkschaats nog in de afzetfase. Tijdens deze afzet verplaatst er steeds meer gewicht naar de rechterschaats. Dit gebeurt in de glijfase van de rechterslag. Vervolgens haalt de schaatser zijn linkschaats van het ijs, en zakt hij nog een stukje door zijn rechterbeen, zodat de schaatser goed diep zit. Dan stuurt hij zijn rechterschaats naar rechts en strekt zijn been. Met de beenstrekking duwt de schaatser zijn bovenlichaam weg van de schaats. Zijn been en schaats maken zo een hoek met het ijs. Dit noemen we de afzetfase. Hierin komt de linkschaats ook weer terug op het

ijs. Aan het einde van de afzet, als al het gewicht is verplaatst naar de linkerschaats, haalt de schaatser zijn rechterschaats van het ijs om deze weer klaar te maken voor de volgende slag, de repositiefase. Op een snelheid van rond de 50 kilometer per uur is de lengte van zo'n slag op het rechte stuk ongeveer 16 meter en de duur ongeveer 1,1 seconde. Het afzetpunt van de kracht beweegt continu mee over het ijs, net als in het fietsen. Dit is anders dan in bijvoorbeeld hardlopen, waar je voet op de grond stilstaat tijdens het afzetten. Mede door dit dynamische afzetpunt kunnen er in het schaatsen snelheden tot boven 60 km/u behaald worden.

Krachten

Op een schaatser werken globaal vier krachten: ijswrijving, luchtweerstand, zwaartekracht en de afzetkracht. De ijswrijvingscoëfficiënt, die gebruikt wordt om de ijswrijving te beschrijven

volgens de wet van Coulomb, is zeer klein ($F_{ice} \approx 0,0003mg$, waarin mg het eigengewicht is van de schaatser) [3]. Daarmee wordt de totale wrijving grotendeels bepaald door luchtweerstand. Voor de luchtweerstand wordt de volgende formule gehanteerd:

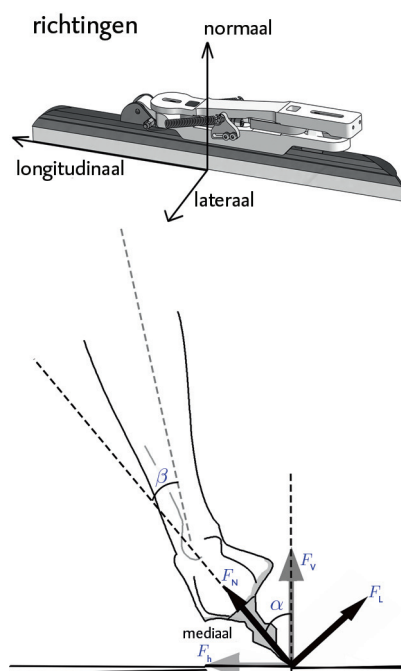
$$F_{b,friction} = \frac{1}{2} AC_d \rho v^2,$$

waarin C_d de weerstandcoëfficiënt is, A het frontaal oppervlak van een schaatser, ρ de luchtdichtheid en v de snelheid van de lucht ten opzichte van de schaatser. Om de luchtweerstand te verkleinen kan de schaatser zijn frontaal oppervlak verkleinen door 'diep' te zitten. Dit betekent een kleine hoek tussen de torso en bovenbeen (heuphoek) en een kleine hoek tussen het onder- en bovenbeen (kniehoek). Verder wordt er onderzoek gedaan naar het verkleinen van de weerstandcoëfficiënt C_d van een schaatser bijvoorbeeld door gebruik te maken van

speciale kleding met verschillende materialen of texturen.

De afzetkracht moet de wrijvingskrachten tegenwerken en de schaatser voortstuwén. Een schaatser strekt zijn been en zet daarmee kracht op het ijs. Deze afzetkracht kunnen we meten met een speciaal geïnstumenteerde schaats (zie figuur 2). Tijdens het schaatsen heeft de schaats continu een andere oriëntatie en positie ten opzicht van het massamiddelpunt van de schaatser. Daarom zijn niet alleen de hoogte van de krachten die op de schaats staan belangrijk, maar ook de stand van de schaats, die bepaalt im-

mers welke kant de krachten en dus de versnellingen op staan. De oriëntatie van de schaats bestaat uit drie hoeken: de leunhoek, de stuurhoek en de hellingshoek (openen van de schaats). De leunhoek bepaalt hoe de kracht die op de schaats wordt gezet is verdeeld over het verticale en horizontale vlak (zie figuur 2). De stuurhoek bepaalt of deze kracht in de lengte van de baan of in de breedte van de baan wordt gezet. De hellingshoek is er alleen aan het einde van de slag als de klapschaats opent en tijdens de repositiefase, wanneer de schaatser de schaats van het ijs haalt. Met de kracht en de oriëntatie samen kunnen we bepalen in welke richting de kracht staat en welk deel van de kracht dus daadwerkelijk bijdraagt aan de snelheid van een schaatser in de richting van de baan.



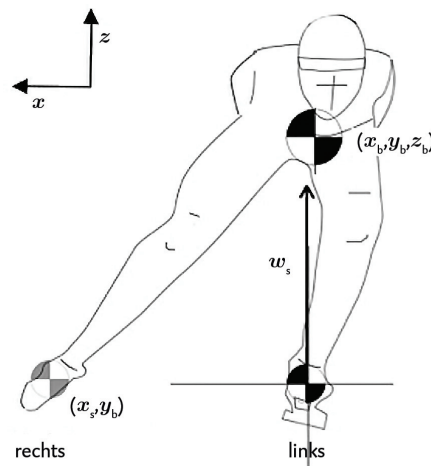
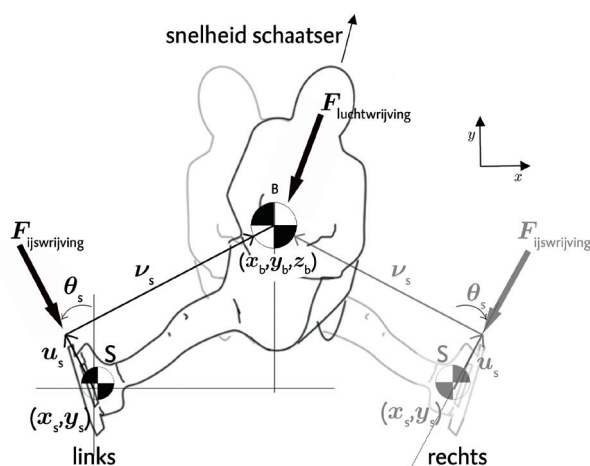
Figuur 2 De geïnstumenteerde schaats waarmee we de krachten meten en de ontbinding van de lokaal gemeten krachten in een globaal assenstelsel. α is de leunhoek van de schaats, β is de enkelknik van de schaatser.

Mechanisch model

Wij streven naar een eenvoudig mechanisch model van de schaatser om zijn beweging en prestatie te kunnen voorspellen. Waarom een eenvoudig model? Einstein heeft eens gezegd “Everything should be made as simple as possible, but not simpler.” Bij een complex model zijn er veel parameters en dus ook veel onzekerheden in het spel. Is het model echter te eenvoudig dan kan dit het verschijnsel, hier de schaatsbeweging, niet goed beschrijven. Het is dus zaak een goede balans te vinden tussen die twee. Ons eenvoudige schaatsmodel bestaat uit twee puntmassa’s: M en m , met m de massa van de schaats die op het ijs staat (en een deel van het bijbehorende been) en M de overige massa. Schaatsen is de bewegingscoördinatie van de afzet tussen het bovenli-

chaam M en de schaats op het ijs m . We nemen aan dat het been ‘slechts’ een doorgeefluik is van de krachten op het ijs naar het bovenlichaam. Dit is te modelleren als een staaf die in en uit kan schuiven, als de relatieve beweging tussen de twee massa’s, M en m , de beenstrekkings. Indirect zitten in deze beenstrekkings dus onder andere de kniehoek, de enkelknik en de heuphoek (figuur 3). Daarnaast bestaat deze bewegingscoördinatie uit de sturing van de schaats. Ter vereenvoudiging van het model verwaarlozen we de armbewegingen en nemen we aan dat er altijd maar één schaats op het ijs staat. De schaatser, die nu nog slechts bestaat uit M en m die ten opzichte van elkaar kunnen bewegen door de beenstrekkings, heeft drie graden van vrijheid voor het bovenlichaam (opzij, voor-achteruit en open-neer) en drie graden van vrijheid voor de schaats (opzij, voor-achteruit en de stuurhoek). Om het model af te maken zit er een restrictie op de beweging van de schaats: er is geen slip, dus de schaats heeft loodrecht op het schaatsijzer geen snelheid. Dus, de invoer van het model bestaat uit de relatieve beweging en de sturing van de schaats, de uitkomst is hoe de schaatser over het ijs beweegt, dus de positie en snelheid van de twee massa’s M en m , en de afzetkracht die op de schaats staat.

Voor beide puntmassa’s kunnen wij gewoon de wet van Newton, $\Sigma F = ma$, opschrijven. De krachten zijn de weerstandskrachten en de afzetkracht. Hoeveel vrijheidsgraden heeft zo’n model? De twee puntmassa’s hebben in een driedimensionale ruimte ieder drie graden van vrijheid. Daar-



Figuur 3 Ons eenvoudige schaatsmodel bestaat uit twee puntmassa’s: M en m , met m de massa van schaats plus een deel van het been dat op het ijs staat en M de overige massa. We nemen aan dat er altijd maar één been op het ijs staat.

naast heeft de schaats een stuurhoek, wat nog een extra graden van vrijheid geeft. In totaal heeft het model dus zeven vrijheidsgraden. Maar er zijn een aantal bewegingsbeperkingen. De schaats m staat altijd op het ijs en hij kan instantaan niet zijwaarts bewegen. Dat zijn er dus twee. Dan zijn er nog vier bewegingen die wij voor- schrijven, de relatieve beweging tussen het bovenlichaam M en de schaats m en de stuurhoek van de schaats. Blijft over zeven min zes is één vrijheidsgraad en dat is nu precies de snelheid waarmee de schaatser zich over het ijs voortbeweegt!

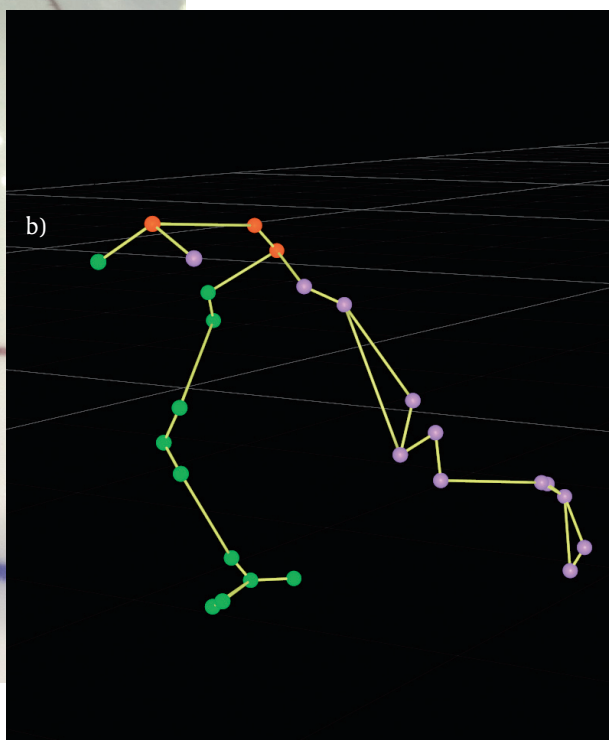
Validatie

Om te bepalen of het eenvoudige mechanisch model inderdaad complex genoeg is om de schaatsbeweging te beschrijven, moet het model gevalideerd worden. Hiervoor moeten de relatieve beweging van het bovenli-

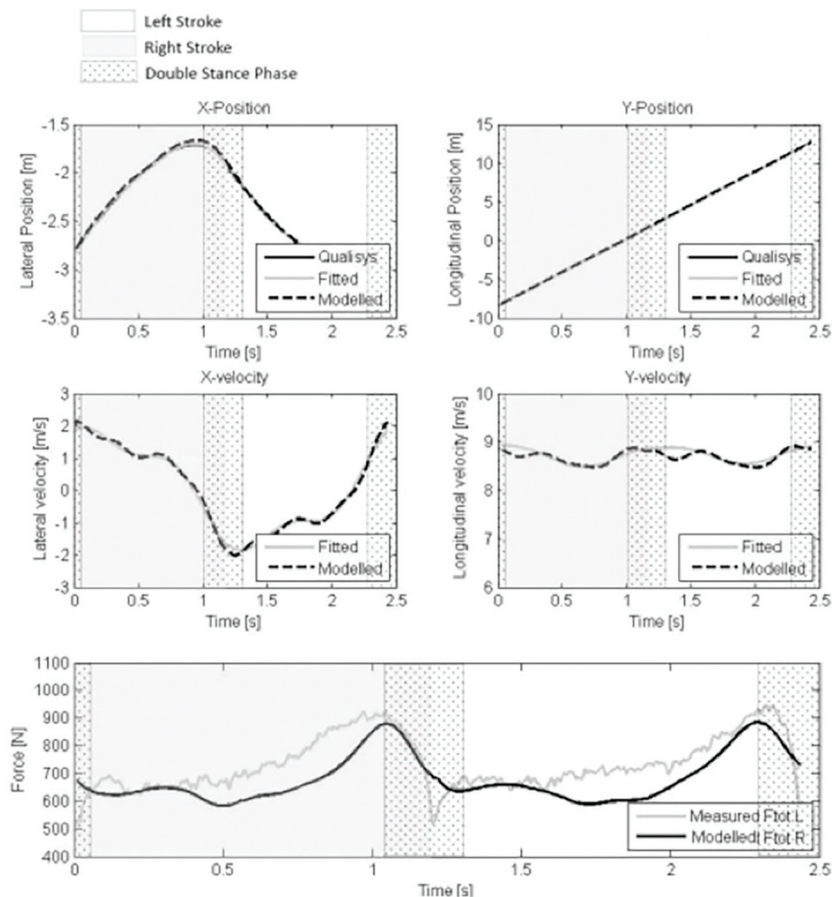
chaam en de schaats, de beenstrekking, en de sturing van de schaats gemeten worden als invoer van het model. Bovendien moeten de positie en snelheid van de schaatser op de baan en de afzetkrachten van de schaatsers bekend zijn om de uitkomst van het model mee te vergelijken. Het doen van deze metingen bleek minder eenvoudig dan gedacht. Het bereik van een meetsysteem, dus het volume waarin gemeten kan worden, is namelijk omgekeerd evenredig aan de nauwkeurigheid waarmee gemeten wordt. De beenstrekking en de positie van de schaatser wilden we op een paar centimeter nauwkeurig gemeten hebben, terwijl het volume van de schaatsbaan zo'n 18.000 m^3 is! Na een jaar van zoeken naar systemen en het uitvoeren van pilottesten is het in januari 2015 eindelijk gelukt om een volume van 500 m^3 te meten op het rechte deel van de baan (50

meter). Een voorbeeld hiervan is te zien op (zie [4] voor een video). Dit is gedaan met twintig bewegingsregistratiecamera's. Deze camera's vangen de reflecties op van passieve markers waarmee de schaatser is uitgerust (zie figuur 4). Door de vluchttijd van de lichtbundel vast te stellen, kan een camera bepalen op welke afstand de marker zich van die camera bevindt. Wanneer je dit met drie camera's doet kan bepaald worden waar in de ruimte de marker zich bevindt. Zo kan een reconstructie van de schaatsbewegingen gemaakt worden (zie [5] voor een video). De krachten van de schaatser zijn gemeten met een speciaal ontwikkelde meetschaats. Deze schaats meet de krachten in twee richtingen: normaal en lateraal op de schaats.

Een schaatsslag gemeten op de schaatsbaan van Thialf is weergegeven in figuur 1. In de figuur is één rechterslag gevisualiseerd. Tijdens een eerste validatie bleek het model de posities met een nauwkeurigheid van rond de $0,04 \text{ m}$ en de snelheid met een nauwkeurigheid van $0,1 \text{ m/s}$ te kunnen voorspellen (figuur 5). Dit is voldoende nauwkeurig voor het eenvoudige model. De krachten bleken met gemiddeld 82 N onderschat te worden. Nu denken we dat we deze krachten nog nauwkeuriger moeten kunnen modelleren. Zo zijn een aantal aannames wellicht té eenvoudig. Een voorbeeld hiervan is de luchtwrijving. We nemen nu aan dat het fron-



Figuur 4 a) Schaatser uitgerust met passieve markers, waarmee virtueel de schaatser gereconstrueerd kan worden (b).



Figuur 5 De gemeten en door het model berekende data voor twee opeenvolgende slagen voor de positie en de snelheid van de torso en de afzetkracht. Het grijze gebied geeft een linker slag aan, het witte gebied een rechterslag. Het patroon geeft aan wanneer beide schaatsers op het ijs staan. Y is in de richting van de schaatsbaan, X is parallel aan de schaatsbaan.

taal oppervlak A en de wrijvingscoëfficiënt C_d van de schaatser constant zijn gedurende een slag. Daarmee is de luchtwrijving alleen afhankelijk van de snelheid. We verwachten echter dat er door de schaatsbeweging wel veranderingen zijn van A en C_d binnen een slag. Wanneer we de orde van grootte van deze fluctuaties hebben vastgesteld, kunnen we bepalen óf en hoeveel nauwkeuriger het model wordt als we deze fluctuaties meenemen.

En dan...

Zodra we tevreden zijn met de nauwkeurigheden van het eenvoudige schaatsmodel, kan het model gebruikt worden voor optimalisatie. Dit kan op twee manieren. Allereerst kan binnen een slag één variabele veranderd worden, terwijl de rest constant gehouden wordt. Zo is te bepalen wat bijvoorbeeld de invloed is van een kleine verandering in de stuurhoek op de gehele slag. Daarnaast kunnen we het model inverteren, dus in plaats van de beenstrekking als input en de snelheid als

output, wordt er een bepaalde snelheid in gestopt (zo hoog mogelijk) en geeft het model de beenstrekking die daar dan bij hoort (output). Zo is echt een optimalisatie te maken van de schaatsslag.

Het is de bedoeling om deze nieuwe kennis te gebruiken in het trainen van schaatsers. Hierbij maken we gebruik van realtime feedbacksystemen. Zo kan de meetschaats bijvoorbeeld zijn data direct doorsturen naar een smartglass, waar de schaatser tijdens het schaatsen zijn prestaties op slag-niveau kan monitoren. Uiteraard zijn ook coach en trainer hierin betrokken. Zij kunnen langs de kant direct meekijken naar de data en kunnen daarmee de schaatser analyseren en bepalen waarop getraind gaat worden. En zo kunnen we na 3000 jaar schaatsen wellicht eindelijk ontrafelen wat een schaatser kan doen om slimmer te zijn als zijn tegenstander sterker is.

Referenties

- 1 Video: Sverre Lunde Pedersen en Havard Bøkkø imiteren andere schaat-

ters, A. (2010). www.youtube.com/watch?v=kgZgYHDVidA.

- 2 Video: Sven Kramer op de 5000 m WorldCup, A. (2015). <https://youtu.be/GVgUzm5rVjo>.
- 3 J. J. de Koning, G. de Groot, en G. J. van Ingen Schenau, *Ice friction during speed skating*. *Journal of Biomechanics*, 25 (6), 565–571. (1992).
- 4 Video: 3D-metingen in Thialf, A. (2015). <https://youtu.be/BdNEtiBfRgg>.
- 4 Video: De schaatser in 3D-simulatie, B. (2015). <https://youtu.be/iibkdWv-J6l>.