

University of Groningen

## Motor control after anterior cruciate ligament reconstruction

Gokeler, Alli

**IMPORTANT NOTE: You are advised to consult the publisher's version (publisher's PDF) if you wish to cite from it. Please check the document version below.**

*Document Version*

Publisher's PDF, also known as Version of record

*Publication date:*

2015

[Link to publication in University of Groningen/UMCG research database](#)

*Citation for published version (APA):*

Gokeler, A. (2015). *Motor control after anterior cruciate ligament reconstruction*. [Thesis fully internal (DIV), University of Groningen]. [S.n.].

### Copyright

Other than for strictly personal use, it is not permitted to download or to forward/distribute the text or part of it without the consent of the author(s) and/or copyright holder(s), unless the work is under an open content license (like Creative Commons).

The publication may also be distributed here under the terms of Article 25fa of the Dutch Copyright Act, indicated by the "Taverne" license. More information can be found on the University of Groningen website: <https://www.rug.nl/library/open-access/self-archiving-pure/taverne-amendment>.

### Take-down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

Downloaded from the University of Groningen/UMCG research database (Pure): <http://www.rug.nl/research/portal>. For technical reasons the number of authors shown on this cover page is limited to 10 maximum.

# Chapter 6

Summary  
Samenvatting







## SUMMARY

An injury of the anterior cruciate ligament (ACL) is one of the most common injuries in sports.<sup>1</sup> In particular, young female athletes are at risk to sustain this devastating injury.<sup>2</sup> It has become standard practice since the early nineties of the past millennium to perform an ACL reconstruction (ACLR) with the ultimate goal to allow athletes to resume their sports as prior to the injury.<sup>3</sup> The two most common ACLR procedures are either the use of an autologous graft from the patellar tendon or the semitendinosus-gracilis tendon, of which the latter has become the most popular since the last decade.<sup>4</sup> Despite an ACLR, there is no guarantee that the knee function will restore to the pre-injury level. It has been shown that for months and even years after ACLR deficits in 1) gait,<sup>5</sup> 2) running,<sup>6,7</sup> 3) balance,<sup>8,9</sup> 4) muscle strength,<sup>10,11</sup> 5) proprioception<sup>12,13</sup> and 6) jumping and landing<sup>14-21</sup> persist.

The aim of this dissertation was to determine the effect of an ACL injury and subsequent ACLR on various motor skills and seek to find an explanation of the encountered observations.

In **Chapter 2** the effect of quadriceps strength and anterior laxity on gait in patients six months after ACLR was analyzed. These two variables were postulated as causes for abnormal gait patterns in patients with ACL deficient (ACL D) knees.<sup>22</sup> The contention is that patients with ACL D avoid activity of the quadriceps muscle as this may induce an anterior translation of the tibia, which may not be well controlled in case of an ACL injury. Hence, patients with ACL D limit the degrees of extension of the injured knee by keeping the knee in a stiff pattern of knee flexion. It was of interest to determine how restored laxity and quadriceps strength had an effect on gait patterns in patients after ACLR. Sagittal knee angles and knee moments during the stance phase were calculated. The most important findings were a reduced knee flexion and extension range of motion of the ACLR leg. In addition, the knee extension moment of the ACLR leg was significantly reduced. Most importantly, the results indicated that kinematic and kinetic gait parameters in ACLR knees were not related to quadriceps strength and laxity. If biomechanical deficits are present during a relative low load activity like gait, it is reasonable to assume that deficits are even more pronounced during high demanding activities like hopping. Hop tests are used as indicators of predetermined objective guidelines to determine a safe return to sports after ACLR.<sup>23,24</sup> Typically, return to sports is often allowed as soon as six months after surgery.

The purpose of the study presented in **Chapter 3** was to conduct a comprehensive assessment that included kinematic, kinetic and EMG-analysis during a single leg hop test for distance at six months after the surgical procedure. The results showed that

in ACLR legs, significantly earlier onset times were found for all muscles, except the vastus medialis, compared with the uninvolved side. The involved legs had significantly reduced knee flexion during the take-off. In addition, increased plantarflexion angles of the ankle in the involved leg at initial contact during landing was observed. The knee extension moment was significantly lower in the involved leg. In the control group, significantly earlier onset times were found for the semitendinosus, vastus lateralis and medial gastrocnemius muscles of the non-dominant side compared with the dominant side. Differences in EMG onset times between the involved and the uninvolved leg in the patient group were significantly larger than differences between the dominant and the non-dominant side in healthy subjects, except for the semitendinosus, vastus lateralis and vastus medialis muscles.

The studies carried out in Chapter 2 and 3 were merely descriptive in nature. A classical experimental scientific approach was employed in terms of performing an experiment and determine if there are statistical significant differences for the various dependent and independent variables. Subsequently, the data were then compared to data available in the literature to seek any similarities or discrepancies between our findings and those of others. Scientists then propose hypotheses as explanations of phenomena, and design experimental studies to test these hypotheses via predictions which can be derived from them. Research may become more valuable if a theory is available prior to conducting experiments. Theories that encompass wider domains of inquiry may bind independently derived hypotheses together in a coherent, supportive structure. Theories, in turn, may help form new hypotheses or place groups of hypotheses into context. Looking at science from that perspective, led to a different approach for the remaining chapters of this dissertation. It was decided that the focus of research should shift towards an understanding of the role of sensorimotor control after ACL injury. Sensorimotor control encompasses all the afferent, efferent, and central integration and processing components in human movement. The peripheral mechanoreceptors, and in particular the “proprioceptors” have received the most attention from a clinical orthopaedic perspective. Proprioception is the afferent pathway relaying the acquisition of stimuli by articular, cutaneous and muscular and tendinous receptors to the central nervous system. As the ACL contains various receptors, it is plausible that a rupture of the ACL may result in altered motor control. Several studies have claimed that these proprioceptive deficits adversely affect activity level,<sup>25-27</sup> balance,<sup>9,28</sup> re-establishment of quadriceps strength<sup>29</sup> and increase the risk of further injury.<sup>30</sup>

In **Chapter 4**, a systematic review was conducted to assess the role of proprioception on motor skills like balance, gait, hopping and strength in patients with ACLD or ACLR. In addition, we determined the association of proprioception and laxity of the knee as well



as on patient reported outcome questionnaires. The correlation between proprioception and laxity, balance, hop tests and patient outcome was low. Only four studies reported a moderate correlation between proprioception, strength, balance, hop tests or gait. In conclusion, there is limited evidence that proprioceptive deficits as detected by commonly used tests adversely affect function in patients with ACLD and ACLR. Development of new tests to determine the relevant role of the sensorimotor system is needed. These tests should ideally be used as screening tests for primary and secondary prevention of ACL injury.

The literature search clearly demonstrated that proprioceptive deficits certainly can not fully explain why altered movement occurs after ACLR. As stated before, proprioception entails only the afferent pathway of a sub-component of the sensorimotor system. However, effective motor control after an ACL injury and subsequent ACLR calls for efficient information processing between the entire body, brain and environment.

In the study as presented in **Chapter 5**, a new theoretical construct was proposed in that cognitive changes in motor control may have occurred after injury of the ACL and play a role in preventing return of normal movement patterns. The biomechanical studies that have been carried out in Chapter 2 and 3 offer descriptions of the changed movement patterns in patients after ACLR. In the acute phase after ACL-injury or subsequent ACLR, it may be useful that patients use a motor control program that is aimed at protection of the knee. Patients may take small steps, reduce the range of motion of the knee, limit the amount of weight on the involved leg and look very cautiously where they place the foot. The movements are further dictated by pain early after ACLR and may therefore serve a useful purpose. The contention is that patients after ACLR may utilize an increased cognitive focus on movement even months after surgery, which inhibits the learning process of regaining normal movements. It was hypothesized that patients after ACLR move in a more natural way - causing them to extend the boundaries of their constrained movement patterns - when they are immersed in a life-like virtual reality setting compared to a normal lab environment.

It is difficult to meet these criteria for the practice of locomotor tasks in constrained indoor and outdoor settings. Virtual reality typically refers to the use of interactive simulations created with computer hardware and software to present users with opportunities to engage in environments that appear and feel similar to real world objects and events.<sup>31</sup> The technology, with the capacity of simulating environments, offers a new and safe way to offer the varied environments and controlled constraints needed to maximize learning. In a virtual environment, the simulated objects and events are not only sensed, but the user can anticipate and react to them as though they are real. Virtual reality enables researchers to analyze task performance in valid

situations similar to real life, yet under experimentally controlled conditions. That was the main reason why an experiment using virtual reality was chosen, in order to control for attentional demands, but performed within a functional environment or context. The results confirm indeed that movement patterns in ACLR patients while immersed in virtual reality, approached those of healthy subjects.

The final experiment of this dissertation sheds a new light on the often reported movement aberrations. Starting from a theoretical construct derived from the field of motor control science, a hypothesis was formulated that increased cognitive attentional control would play a role in movement patterns in patients with an ACLR. As the study in Chapter 5 showed, possible changes in attentional focus had a greater impact in patients after ACLR compared to healthy controls. This rises a question as to whether there is an effective coupling between the surgical procedure and the functional outcome in terms of return of normal movement patterns.



## REFERENCES

1. Dick R, Hootman JM, Agel J, Vela L, Marshall SW, Messina R. Descriptive epidemiology of collegiate women's field hockey injuries: National Collegiate Athletic Association Injury Surveillance System, 1988-1989 through 2002-2003. *J Athl Train.* 2007;42(2):211-220.
2. Renstrom P, Ljungqvist A, Arendt E, et al. Non-contact ACL injuries in female athletes: an International Olympic Committee current concepts statement. *Br J Sports Med.* 2008;42(6):394-412.
3. Shelbourne KD, Nitz P. Accelerated rehabilitation after anterior cruciate ligament reconstruction. *Am J Sports Med.* 1990;18(3):292-299.
4. Chechik O, Amar E, Khashan M, Lador R, Eyal G, Gold A. An international survey on anterior cruciate ligament reconstruction practices. *Int Orthop.* 2013;37(2):201-206.
5. Hart JM, Ko JW, Konold T, Pietrosimone B. Sagittal plane knee joint moments following anterior cruciate ligament injury and reconstruction: a systematic review. *Clin Biomech.* 2010;25(4):277-283.
6. Tashman S, Collon D, Anderson K, Kolowich P, Anderst W. Abnormal rotational knee motion during running after anterior cruciate ligament reconstruction. *Am J Sports Med.* 2004;32(4):975-983.
7. Tashman S, Kolowich P, Collon D, Anderson K, Anderst W. Dynamic function of the ACL-reconstructed knee during running. *Clin Orthop Relat Res.* 2007;454:66-73.
8. Henriksson M, Ledin T, Good L. Postural control after anterior cruciate ligament reconstruction and functional rehabilitation. *Am J Sports Med.* 2001;29(3):359-366.
9. Bonfim TR, Jansen Paccola CA, Barela JA. Proprioceptive and behavior impairments in individuals with anterior cruciate ligament reconstructed knees. *Arch Phys Med Rehabil.* 2003;84(8):1217-1223.
10. Keays SL, Bullock-Saxton JE, Newcombe P, Keays AC. The relationship between knee strength and functional stability before and after anterior cruciate ligament reconstruction. *J Orthop Res.* 2003;21(2):231-237.
11. Palmieri-Smith RM, Thomas AC, Wojtys EM. Maximizing quadriceps strength after ACL reconstruction. *Clin Sports Med.* 2008;27(3):405-424.
12. Beynon BD, Johnson RJ, Naud S, et al. Accelerated Versus Nonaccelerated Rehabilitation After Anterior Cruciate Ligament Reconstruction: A Prospective, Randomized, Double-Blind Investigation Evaluating Knee Joint Laxity Using Roentgen Stereophotogrammetric Analysis. *Am J Sports Med.* 2011;39(12):2536-2548.
13. Gokeler A, Benjaminse A, Hewett TE, et al. Proprioceptive deficits after ACL injury: are they clinically relevant? *Br J Sports Med.* 2012;46(3):180-192.
14. Castanharo R, da Luz BS, Bitar AC, D'Elia CO, Castropil W, Duarte M. Males still have limb asymmetries in multijoint movement tasks more than 2 years following anterior cruciate ligament reconstruction. *J Orthop Sci.* 2011;16(5):531-535.
15. Chmielewski TL. Asymmetrical lower extremity loading after ACL reconstruction: more than meets the eye. *J Orthop Sports Phys Ther.* 2011;41(6):374-376.
16. Delahunt E, Prendiville A, Sweeney L, et al. Hip and knee joint kinematics during a diagonal jump landing in anterior cruciate ligament reconstructed females. *J Electromyogr Kinesiol.* 2012;22(4):598-606.
17. Deneweth JM, Bey MJ, McLean SG, Lock TR, Kolowich PA, Tashman S. Tibiofemoral Joint Kinematics of the Anterior Cruciate Ligament-Reconstructed Knee During a Single-Legged Hop Landing. *Am J Sports Med.* 2010;38(9):1820-1828.
18. Gokeler A, Hof AL, Arnold MP, Dijkstra PU, Postema K, Otten E. Abnormal landing strategies after ACL reconstruction. *Scand J Med Sci Sports.* 2010;20(1):e12-19.
19. Myer GD, Martin L, Jr., Ford KR, et al. No Association of Time From Surgery With Functional Deficits in Athletes After Anterior Cruciate Ligament Reconstruction: Evidence for Objective Return-to-Sport Criteria. *Am J Sports Med.* 2012;40(10):2256-2263
20. Ortiz A, Olson S, Libby CL, et al. Landing mechanics between noninjured women and women with anterior cruciate ligament reconstruction during 2 jump tasks. *Am J Sports Med.* 2008;36(1):149-157.
21. Paterno MV, Schmitt LC, Ford KR, Rauh MJ, Myer GD, Hewett TE. Effects of sex on compensatory landing strategies upon return to sport after anterior cruciate ligament reconstruction. *J Orthop Sports Phys Ther.* 2011;41(8):553-559.



22. Berchuck M, Andriacchi TP, Bach BR, Reider B. Gait adaptations by patients who have a deficient anterior cruciate ligament. *J Bone Joint Surg Am.* 1990;72(6):871-877.
23. Bizzini M, Hancock D, Impellizzeri F. Suggestions from the field for return to sports participation following anterior cruciate ligament reconstruction: soccer. *J Orthop Sports Phys Ther.* 2012;42(4):304-312.
24. Waters E. Suggestions from the field for return to sports participation following anterior cruciate ligament reconstruction: basketball. *J Orthop Sports Phys Ther.* 2012;42(4):326-336.
25. Barrett DS. Proprioception and function after anterior cruciate reconstruction. *J Bone Joint Surg Br.* 1991;73(5):833-837.
26. Ochi M, Iwasa J, Uchio Y, Adachi N, Sumen Y. The regeneration of sensory neurones in the reconstruction of the anterior cruciate ligament. *J Bone Joint Surg Br.* 1999;81(5):902-906.
27. Roberts D, Friden T, Zatterstrom R, Lindstrand A, Moritz U. Proprioception in people with anterior cruciate ligament-deficient knees: comparison of symptomatic and asymptomatic patients. *J Orthop Sports Phys Ther.* 1999;29(10):587-594.
28. Jerosch J, Schaffer C, Prymka M. [Proprioceptive abilities of surgically and conservatively treated knee joints with injuries of the cruciate ligament]. *Unfallchirurg.* 1998;101(1):26-31.
29. Friden T, Roberts D, Ageberg E, Walden M, Zatterstrom R. Review of knee proprioception and the relation to extremity function after an anterior cruciate ligament rupture. *J Orthop Sports Phys Ther.* 2001;31(10):567-576.
30. Cooper RL, Taylor NF, Feller JA. A systematic review of the effect of proprioceptive and balance exercises on people with an injured or reconstructed anterior cruciate ligament. *Res Sports Med.* 2005;13(2):163-178.
31. Adamovich SV, Fluet GG, Tunik E, Merians AS. Sensorimotor training in virtual reality: a review. *NeuroRehabilitation.* 2009;25(1):29-44.



## SAMENVATTING

Een ruptuur van de voorste kruisband (VKB) is één van de meest voorkomende sportblessures.<sup>1</sup> Vooral jonge vrouwelijke atleten lopen een verhoogd risico op deze ernstige blessure.<sup>2</sup> Sinds de jaren negentig is het gebruikelijk een VKB-reconstructie te verrichten, met het ultieme doel sporters terug te laten keren naar het sportniveau van voor de blessure.<sup>3</sup>

De meest voorkomende VKB-reconstructietechnieken maken gebruik van een autoloog ent van de patellapees of semintendinosus-gracilispees, waarbij de laatstgenoemde het populairst is sinds het laatste decennium.<sup>4</sup> Een VKB-reconstructie geeft echter niet de garantie dat de kniefunctie zal herstellen tot het niveau van voor de ruptuur. Het is aangetoond dat er maanden en zelfs jaren na VKB-reconstructie nog steeds deficiënties aanwezig kunnen zijn bij volgende: 1) lopen,<sup>5</sup> 2) hardlopen,<sup>6,7</sup> 3) balans,<sup>8,9</sup> 4) spierkracht,<sup>10,11</sup> 5) proprioceptie<sup>12,13</sup> en 6) springen.<sup>14-21</sup>

De studies in dit proefschrift pogen te bepalen wat het effect is van een VKB-ruptuur, of specifiek: een VKB-reconstructie na een VKB-ruptuur, op diverse motorische vaardigheden en een verklaring voor de bevindingen te geven. Het doel van **Hoofdstuk 2** is het effect te bepalen van de quadricepskracht en laxiteit op het gangbeeld in patiënten zes maanden na een VKB-reconstructie. Deze twee variabelen worden vaak als oorzaken gepostuleerd voor abnormale gangpatronen in patiënten met een VKB-ruptuur.<sup>22</sup> De aanname is dat patiënten met een VKB-ruptuur activiteit van de m. quadriceps vermijden, aangezien deze een anterieure translatie van de tibia ten opzichte van het femur kan veroorzaken die onvoldoende kan worden gecontroleerd na een VKB-ruptuur. Om die reden beperken patiënten met een VKB-ruptuur de extensie van de knie door deze in een patroon van 'stiff knee gait' te bewegen met een beperkt flexie-extensietraject. In dit onderzoek is derhalve gekeken naar in hoeverre de herstelde laxiteit en kracht van de m. quadriceps een effect hebben op gangpatronen in patiënten na een VKB-reconstructie. De sagittale kniehoeken en kniemomenten zijn berekend tijdens de standfase van het lopen. De opvallendste bevindingen zijn een verminderde flexie en extensie bewegingssuitslag van het geopereerde been. Bovendien is gebleken dat het externe extensiemoment van de knie duidelijk verminderd is in het geopereerde been. Bovenal hebben de resultaten uitgewezen dat de gevonden kinematische en kinetische gangparameters na een VKB-reconstructie geen relatie hebben met de kracht van de M. quadriceps en laxiteit.

Als de biomechanische deficiënties tijdens een relatief lichte activiteit zoals lopen aanwezig zijn, is het redelijk om te veronderstellen dat de deficiënties meer uitgesproken zijn tijdens zwaardere activiteiten zoals springen.

Gedurende de revalidatie worden vaak zogenaamde hoptesten (de single hop for distance, de 6-m timed hop test, de triple hop for distance en de crossover hop for distance) gebruikt. Deze hoptesten worden, aan de hand van objectieve richtlijnen, gebruikt als indicatoren om te bepalen wanneer een veilige terugkeer naar de sport na een VKB-reconstructie mogelijk is.<sup>23,24</sup> Over het algemeen wordt deze terugkeer na zes maanden toegestaan. Het doel van de studie in **Hoofdstuk 3** is een uitvoerige beoordeling van de single leg hop for distance zes maanden na de chirurgische procedure te verkrijgen die een integratie van kinematische, kinetische en EMG-analyses omvatte.

De resultaten hebben aangetoond dat VKB-reconstructie-benen een beduidend vroegere activatie hebben voor de volgende spieren: M. gluteus maximus, M. biceps femoris, M. semitendinosus, M. semimembranosus, M. vastus lateralis, M. rectus femoris, Mm. gastrocnemius caput mediale en laterale en M. soleus. De M. vastus medialis van het geopereerde been heeft een activatie vergelijkbaar met die van het niet-geopereerde been. In de controlegroep zijn de M. semitendinosus, M. vastus lateralis en M. gastrocnemius caput mediale beduidend vroeger geactiveerd aan de niet-dominante zijde dan aan de dominante zijde. De verschillen in EMG-begintijden tussen geopereerde en niet-geopereerde benen zijn beduidend groter dan de verschillen tussen de dominante en niet-dominante kant in de gezonde controlegroep, behalve voor de M. semitendinosus, M. vastus lateralis en M. vastus medialis. De geopereerde benen hebben aanzienlijk minder knieflexie bij de afzet van de sprong. Bij de landing is sprake gebleken van een toegenomen plantairflexie van de enkel. Het extensie moment van de knie is significant lager in het geopereerde been.

De studies die in Hoofdstuk 2 en 3 zijn uitgevoerd zijn beschrijvend van aard. Een klassieke wetenschappelijke benadering is aangewend voor het uitvoeren van een experiment waarbij bepaald is of er sprake was van statistisch significante verschillen voor de diverse afhankelijke en onafhankelijke variabelen. Later zijn deze gegevens vergeleken met beschikbare gegevens in de literatuur. Wetenschappers stellen hypothesen op om fenomenen te verklaren en ontwerpen experimentele studies om deze hypothesen te testen. Wetenschappelijk onderzoek kan waardevoller worden als een theorie voorafgaand aan het uitvoeren van experimenten beschikbaar is. De theorieën die bredere domeinen van onderzoek omvatten kunnen vele onafhankelijk afgeleide hypothesen in een coherente, steunende structuur samenbinden. Die theorieën kunnen helpen nieuwe hypothesen te vormen of groepen hypothesen in context te plaatsen. Dit perspectief op wetenschap heeft tot een andere benadering voor de resterende hoofdstukken van dit proefschrift geleid. We hebben besloten dat



de nadruk van het verdere onderzoek naar de rol van sensomotorische controle na een VKB-ruptuur zou moeten verschuiven. Door een perifere observatie van het kniegewricht zijn wij geïnteresseerd geraakt in de rol van sensomotoriek. Onder sensomotoriek wordt de integratie en verwerking van alle afferente, efferente en centrale componenten die betrokken zijn bij het handhaven van de functionele stabiliteit van het gewricht verstaan. Proprioceptie is de afferente informatie afkomstig van stimuli van gewrichts-, huid-, spier- en peesreceptoren die wordt voortgeleid aan het centrale zenuwstelsel. Aangezien de VKB diverse receptoren bevat, is het aannemelijk dat een VKB-ruptuur in een veranderde motorische controle kan resulteren. Verscheidene onderzoekers beweren dat deze proprioceptieve deficiënties kunnen leiden tot negatieve effecten op het activiteitsniveau,<sup>25-27</sup> de balans<sup>9,28</sup> en de M. quadricepsspierkracht<sup>29</sup>. Daarnaast kan sprake zijn van een verhoogd risico op verdere blessures.<sup>30</sup> In **Hoofdstuk 4** worden de resultaten beschreven van een systematische review naar de relatie tussen proprioceptie en balans, lopen, springen (hoptesten) en spierkracht in patiënten met een VKB-ruptuur of VKB-reconstructie. Bovendien hebben wij de relatie tussen proprioceptie en patiëntvragenlijsten bekeken. In het algemeen is de relatie tussen proprioceptie en laxiteit, balans, hoptesten en patiëntvragenlijsten laag gebleken. Slechts vier studies melden een matige relatie tussen proprioceptie, spierkracht, balans, hoptesten en het lopen. Samenvattend: er is slechts beperkt bewijs dat de proprioceptieve deficiënties de kniefunctie ongunstig beïnvloeden in patiënten met een VKB-ruptuur of VKB-reconstructie. Het is nodig nieuwe tests te ontwikkelen om beter inzicht te krijgen in de werking van het sensorimotorisch systeem na een VKB-ruptuur. Deze tests zouden idealiter als screening kunnen worden gebruikt om primaire en secundaire preventie van VKB-rupturen te optimaliseren.

In Hoofdstuk 2 en 3 hebben we beschrijvende studies gepresenteerd met betrekking tot de veranderde bewegingspatronen in patiënten met een VKB-reconstructie. In ons onderzoek, dat is ontsprongen in perifere observaties over bijvoorbeeld spierkracht en laxiteit van de knie, hebben wij vervolgens de invloed van proprioceptie op de waargenomen bewegingspatronen bekeken. Ons literatuuronderzoek heeft duidelijk aangetoond dat de proprioceptieve deficiënties deze veranderingen in het bewegen niet volledig kunnen verklaren. Zoals eerder vermeld, behelst proprioceptie slechts de afferente weg van een subcomponent van het sensorimotorisch systeem. Een efficiënte motorische controle na een VKB-ruptuur, eventueel gevolgd door een VKB-reconstructie, vraagt om een efficiënte informatieoverdracht tussen het lichaam, het brein en de omgeving. In de studie die in **Hoofdstuk 5** wordt gepresenteerd, stellen wij een nieuwe theoretische verklaring voor waarin cognitieve veranderingen in de motorische controle optreden na een VKB-ruptuur en deze de terugkeer naar

normale bewegingspatronen verhinderen. In de acute fase na een VKB-ruptuur of VKB-reconstructie kan het nuttig zijn dat patiënten een motorisch programma volgen dat volledig is gericht op bescherming van de knie. De patiënten kunnen maatregelen treffen om de bewegingsuitslag van de knie te verminderen, de hoeveelheid gewicht op het geopereerde been te beperken en aandachtig te kijken naar waar zij de voet plaatsen tijdens het lopen. De bewegingen worden verder bepaald door pijn in de vroege fase na een VKB-reconstructie en kunnen daarom een nuttig doel dienen. Ons standpunt is dat bij de patiënten na een VKB-reconstructie tijdens het bewegen sprake is van een verhoogde cognitieve aandacht die het leerproces om normale bewegingen te herwinnen remt. Wij hebben de hypothese opgesteld dat de patiënten na een VKB-reconstructie op een natuurlijkere manier bewegen in een virtual reality-omgeving dan in een klassiek laboratoriummilieu. Bij virtual reality wordt met behulp van een computer een omgeving gesimuleerd die diverse zintuigen prikkelt. Deze technologie biedt een nieuwe en veilige manier om gevarieerde omgevingen aan te bieden waarin motorisch leren onderzocht kan worden.<sup>31</sup> In een virtuele omgeving kunnen de gebruikers niet alleen de gesimuleerde voorwerpen en gebeurtenissen ontdekken, maar er ook op anticiperen en reageren alsof zij echt zijn. De virtuele werkelijkheid stelt onderzoekers in staat om taken te analyseren in relevante omgevingen die overeenkomen met die in het dagelijks leven, maar in een gecontroleerde experimentele setting. Dat is de belangrijkste reden waarom wij voor virtual reality hebben gekozen. De setting heeft het mogelijk gemaakt om voor de variabele aandacht te controleren. Het is belangrijk dat de bewegingen binnen een functionele omgeving of een context worden uitgevoerd. Onze resultaten bevestigen dat de bewegingspatronen in patiënten na een VKB-reconstructie bij een afstaptaak in de virtual reality die van gezonde proefpersonen benaderden. Het laatste experiment van deze thesis werpt een nieuw licht op de vaak beschreven afwijkende bewegingspatronen. Vanuit een theoretisch concept dat is afgeleid uit kennis op het gebied van de motorische controle, is de hypothese geformuleerd dat cognitieve aandacht een rol kan spelen in bewegingspatronen in patiënten met een VKB-reconstructie. Onze studie heeft aangetoond dat veranderingen in aandacht een grotere invloed hebben in patiënten na een VKB-reconstructie dan in gezonde controles. Dit roept de vraag op of er een efficiënte koppeling bestaat tussen de chirurgische procedure en het functionele resultaat betreffende de terugkeer naar normale bewegingspatronen.



## REFERENTIES

1. Dick R, Hootman JM, Agel J, Vela L, Marshall SW, Messina R. Descriptive epidemiology of collegiate women's field hockey injuries: National Collegiate Athletic Association Injury Surveillance System, 1988-1989 through 2002-2003. *J Athl Train.* 2007;42(2):211-220.
2. Renstrom P, Ljungqvist A, Arendt E, et al. Non-contact ACL injuries in female athletes: an International Olympic Committee current concepts statement. *Br J Sports Med.* 2008;42(6):394-412.
3. Shelbourne KD, Nitz P. Accelerated rehabilitation after anterior cruciate ligament reconstruction. *Am J Sports Med.* 1990;18(3):292-299.
4. Chechik O, Amar E, Khashan M, Lador R, Eyal G, Gold A. An international survey on anterior cruciate ligament reconstruction practices. *Int Orthop.* 2013;37(2):201-206.
5. Hart JM, Ko JW, Konold T, Pietrosimone B. Sagittal plane knee joint moments following anterior cruciate ligament injury and reconstruction: a systematic review. *Clin Biomech.* 2010;25(4):277-283.
6. Tashman S, Collon D, Anderson K, Kolowich P, Anderst W. Abnormal rotational knee motion during running after anterior cruciate ligament reconstruction. *Am J Sports Med.* 2004;32(4):975-983.
7. Tashman S, Kolowich P, Collon D, Anderson K, Anderst W. Dynamic function of the ACL-reconstructed knee during running. *Clin Orthop Relat Res.* 2007;454:66-73.
8. Henriksson M, Ledin T, Good L. Postural control after anterior cruciate ligament reconstruction and functional rehabilitation. *Am J Sports Med.* 2001;29(3):359-366.
9. Bonfim TR, Jansen Paccola CA, Barela JA. Proprioceptive and behavior impairments in individuals with anterior cruciate ligament reconstructed knees. *Arch Phys Med Rehabil.* 2003;84(8):1217-1223.
10. Keays SL, Bullock-Saxton JE, Newcombe P, Keays AC. The relationship between knee strength and functional stability before and after anterior cruciate ligament reconstruction. *J Orthop Res.* 2003;21(2):231-237.
11. Palmieri-Smith RM, Thomas AC, Wojtys EM. Maximizing quadriceps strength after ACL reconstruction. *Clin Sports Med.* 2008;27(3):405-424.
12. Beynon BD, Johnson RJ, Naud S, et al. Accelerated Versus Nonaccelerated Rehabilitation After Anterior Cruciate Ligament Reconstruction: A Prospective, Randomized, Double-Blind Investigation Evaluating Knee Joint Laxity Using Roentgen Stereophotogrammetric Analysis. *Am J Sports Med.* 2011;39(12):2536-2548.
13. Gokeler A, Benjaminse A, Hewett TE, et al. Proprioceptive deficits after ACL injury: are they clinically relevant? *Br J Sports Med.* 2012;46(3):180-192.
14. Castanharo R, da Luz BS, Bitar AC, D'Elia CO, Castropil W, Duarte M. Males still have limb asymmetries in multijoint movement tasks more than 2 years following anterior cruciate ligament reconstruction. *J Orthop Sci.* 2011;16(5):531-535.
15. Chmielewski TL. Asymmetrical lower extremity loading after ACL reconstruction: more than meets the eye. *J Orthop Sports Phys Ther.* 2011;41(6):374-376.
16. Delahunt E, Prendiville A, Sweeney L, et al. Hip and knee joint kinematics during a diagonal jump landing in anterior cruciate ligament reconstructed females. *J Electromyogr Kinesiol.* 2012;22(4):598-606.
17. Deneweth JM, Bey MJ, McLean SG, Lock TR, Kolowich PA, Tashman S. Tibiofemoral Joint Kinematics of the Anterior Cruciate Ligament-Reconstructed Knee During a Single-Legged Hop Landing. *Am J Sports Med.* 2010;38(9):1820-1828.
18. Gokeler A, Hof AL, Arnold MP, Dijkstra PU, Postema K, Otten E. Abnormal landing strategies after ACL reconstruction. *Scand J Med Sci Sports.* 2010;20(1):e12-19.
19. Myer GD, Martin L, Jr., Ford KR, et al. No Association of Time From Surgery With Functional Deficits in Athletes After Anterior Cruciate Ligament Reconstruction: Evidence for Objective Return-to-Sport Criteria. *Am J Sports Med.* 2012;40(10):2256-2263
20. Ortiz A, Olson S, Libby CL, et al. Landing mechanics between noninjured women and women with anterior cruciate ligament reconstruction during 2 jump tasks. *Am J Sports Med.* 2008;36(1):149-157.

21. Paterno MV, Schmitt LC, Ford KR, Rauh MJ, Myer GD, Hewett TE. Effects of sex on compensatory landing strategies upon return to sport after anterior cruciate ligament reconstruction. *J Orthop Sports Phys Ther.* 2011;41(8):553-559.
22. Berchuck M, Andriacchi TP, Bach BR, Reider B. Gait adaptations by patients who have a deficient anterior cruciate ligament. *J Bone Joint Surg Am.* 1990;72(6):871-877.
23. Bizzini M, Hancock D, Impellizzeri F. Suggestions from the field for return to sports participation following anterior cruciate ligament reconstruction: soccer. *J Orthop Sports Phys Ther.* 2012;42(4):304-312.
24. Waters E. Suggestions from the field for return to sports participation following anterior cruciate ligament reconstruction: basketball. *J Orthop Sports Phys Ther.* 2012;42(4):326-336.
25. Barrett DS. Proprioception and function after anterior cruciate reconstruction. *J Bone Joint Surg Br.* 1991;73(5):833-837.
26. Ochi M, Iwasa J, Uchio Y, Adachi N, Sumen Y. The regeneration of sensory neurones in the reconstruction of the anterior cruciate ligament. *J Bone Joint Surg Br.* 1999;81(5):902-906.
27. Roberts D, Friden T, Zatterstrom R, Lindstrand A, Moritz U. Proprioception in people with anterior cruciate ligament-deficient knees: comparison of symptomatic and asymptomatic patients. *J Orthop Sports Phys Ther.* 1999;29(10):587-594.
28. Jerosch J, Schaffer C, Prymka M. [Proprioceptive abilities of surgically and conservatively treated knee joints with injuries of the cruciate ligament]. *Unfallchirurg.* 1998;101(1):26-31.
29. Friden T, Roberts D, Ageberg E, Walden M, Zatterstrom R. Review of knee proprioception and the relation to extremity function after an anterior cruciate ligament rupture. *J Orthop Sports Phys Ther.* 2001;31(10):567-576.
30. Cooper RL, Taylor NF, Feller JA. A systematic review of the effect of proprioceptive and balance exercises on people with an injured or reconstructed anterior cruciate ligament. *Res Sports Med.* 2005;13(2):163-178.
31. Adamovich SV, Fluet GG, Tunik E, Merians AS. Sensorimotor training in virtual reality: a review. *NeuroRehabilitation.* 2009;25(1):29-44.