



Universiteit  
Leiden  
The Netherlands

## **Why teens take risks ... : a neurocognitive analysis of developmental changes and individual differences in decision-making under risk**

Leijenhorst, L. van

### **Citation**

Leijenhorst, L. van. (2010, January 19). *Why teens take risks .. : a neurocognitive analysis of developmental changes and individual differences in decision-making under risk*. Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/14615>

Version: Not Applicable (or Unknown)

License: [Licence agreement concerning inclusion of doctoral thesis in the Institutional Repository of the University of Leiden](#)

Downloaded from: <https://hdl.handle.net/1887/14615>

**Note:** To cite this publication please use the final published version (if applicable).

## Samenvatting en Conclusies

De adolescentie is een fascinerende levensfase. In een relatief korte periode, ongeveer tussen het tiende en twintigste levensjaar, veranderen kinderen langzaam maar zeker in volwassenen. Deze transformatie gaat gepaard met grote veranderingen in het uiterlijk, het psychosociaal en cognitief functioneren en het gedrag. Eén van de veranderingen die de adolescentie kenmerken is een toename in risicovol gedrag. In de context van dit proefschrift definiëren we risicovol gedrag als gedrag dat mogelijke negatieve gevolgen heeft. Dit is een brede definitie en deze negatieve gevolgen kunnen variëren van vervelend tot zeer ernstig. We weten bijvoorbeeld dat adolescenten vergeleken met kinderen en volwassenen, een grotere behoefte aan spanning en sensatie rapporteren. Bovendien piekt het aantal behandelingen op de eerste hulp afdeling van ziekenhuizen als gevolg van bijvoorbeeld ongelukken of overmatig alcoholgebruik in de adolescentie. Het in dit proefschrift beschreven onderzoek had tot doel meer inzicht te krijgen in risicovol gedrag in de adolescentie, door de ontwikkeling van het vermogen beslissingen te nemen in relatie tot de ontwikkeling van de hersenen te bestuderen.

De ontwikkeling van technieken om de structuur en functies van de hersenen in kaart te brengen, zoals *Magnetic Resonance Imaging* (MRI) en *functionele MRI* (fMRI), hebben de laatste jaren bijgedragen aan een grote toename in de kennis over de ontwikkeling van de hersenen. Deze kennis heeft geleid tot nieuwe inzichten in de veranderingen in gedrag gedurende de adolescentie. MRI is een niet-invasieve techniek en daarom ook geschikt voor onderzoek bij kinderen en jongeren. Recent grootschalig longitudinaal MRI onderzoek in de Verenigde Staten naar de ontwikkeling van de structuur van de hersenen van kinderen en adolescenten tussen de 4 en 22 jaar oud heeft aangetoond dat de ontwikkelingsgerelateerde veranderingen in de structuur van de hersenen gedurende de adolescentie omvangrijker zijn dan lange tijd werd gedacht (Gogtay et al., 2004) en dat deze veranderingen niet in alle hersengebieden met dezelfde snelheid plaatsvinden.

De hersenen zijn opgebouwd uit grijze stof (de cellichamen en dendrieten van neuronen) en witte stof (deze bevat de in myeline ingebedde axonen van neuronen en vormt de verbinding tussen de grijze stof gebieden). De witte stof neemt lineair toe tot in de volwassenheid,

terwijl de ontwikkeling van grijze stof volgens een omgekeerde U-vorm verloopt (Giedd et al., 1999). Het aantal neuronen en de verbindingen tussen deze neuronen neemt toe vanaf de geboorte en piekt aan het begin van de adolescentie. Vanaf dit moment neemt de hoeveelheid grijze stof weer af. Neuronen en verbindingen tussen neuronen die niet noodzakelijk zijn verdwijnen en de belangrijke verbindingen worden versterkt.

De ontwikkeling van fMRI heeft het mogelijk gemaakt niet alleen de structuur van de hersenen, maar ook de werking van de hersenen te bestuderen. Omdat fMRI ook geschikt is voor onderzoek bij kinderen en jongeren beschikken we voor het eerst in de geschiedenis over een techniek waarmee we de werkende hersenen in beeld kunnen brengen bij deze leeftijdsgroepen. De laatste jaren is op deze manier het ontwikkelende brein steeds beter in kaart gebracht en zijn belangrijke verschillen ontdekt in de patronen van hersenactiviteit tussen kinderen, adolescenten en volwassenen. In sommige gevallen vertonen kinderen en volwassenen hetzelfde gedrag, maar blijken er wel verschillen te zijn in de processen in de hersenen die ten grondslag liggen aan dit gedrag. Recent fMRI onderzoek, waaronder ook het in dit proefschrift beschreven onderzoek heeft op deze manier bijgedragen aan een beter begrip van risicovol gedrag in de adolescentie.

In Hoofdstuk 1 worden twee in de literatuur heersende mogelijke verklaringen voor risicovol gedrag in de adolescentie beschreven. De eerste verklaring richt zich op de ontwikkeling van cognitieve controle. Met cognitieve controle worden een aantal fundamentele mentale processen bedoeld die ons in staat stellen ons gedrag te controleren en doelgericht te handelen. Van deze processen zoals werkgeheugen (het vermogen informatie in een actieve staat vast te houden en te bewerken), selectieve aandacht (het vermogen onze aandacht te richten op een aspect van de omgeving en tegelijkertijd andere aspecten te negeren) en inhibitie (het vermogen irrelevante gedachten en gedrag te onderdrukken) is aangetoond dat ze pas een volwassen niveau bereiken tijdens de adolescentie. Een toename van cognitieve controle wordt verondersteld te leiden tot een verbetering van het vermogen beslissingen te nemen en hierdoor tot een afname van risicovol gedrag. Deze eerste verklaring veronderstelt dat adolescenten eerder geneigd zijn risico te nemen omdat ze nog onvoldoende in staat zijn om hun gedrag te controleren.

De tweede verklaring richt zich op emotionele/motivationale processen, en veronderstelt dat adolescenten risicovol gedrag vertonen omdat ze vergeleken met kinderen en volwassenen, sterker reageren op de mogelijke positieve gevolgen die met het nemen van een risico geassocieerd zijn.

In dit proefschrift worden experimenten beschreven die aan de ontwikkeling gerelateerde veranderingen in drie cognitieve processen onderzoeken; het vermogen de kans op winst in te schatten, het vermogen de mogelijke positieve en negatieve gevolgen die geassocieerd zijn met een risico tegen elkaar af te wegen, en processen die belangrijk zijn voor cognitieve controle. Hoofdstukken 2, 3 en 7 beschrijven studies naar ontwikkelingsveranderingen in de processen die de bouwstenen vormen van het meer complexe vermogen beslissingen te nemen. Hoofdstukken 4, 5 en 6 beschrijven studies naar deze meer complexe beslissingen en verkennen mogelijke veranderingen in de relatieve bijdrage van de gevoeligheid voor beloning en cognitieve controle bij het nemen van beslissingen gedurende de ontwikkeling van de late kindertijd tot de volwassenheid. De in dit proefschrift beschreven resultaten laten zien dat kennis over de ontwikkeling van de hersenen, en leeftijdsgerelateerde veranderingen in de functie van de hersenen kan bijdragen aan de ontwikkeling van modellen die proberen risicovol gedrag in de adolescentie te verklaren. Zo blijkt bijvoorbeeld dat gebaseerd op nieuwe, met behulp van fMRI studies verkregen, inzichten risicogedrag in de adolescentie kan worden verklaard als het gevolg van een verschil in het ontwikkelingstraject van belonings- en cognitieve controle gerelateerde netwerken in de hersenen. Een toename in de gevoeligheid voor beloningen vroeg in de adolescentie wordt verondersteld tieners aan te zetten tot het nemen van risico's; terwijl het vermogen deze impulsen te controleren pas laat in de adolescentie volledig ontwikkeld is.

### **De ontwikkeling van de neurale correlaten van basisprocessen die betrokken zijn bij beslissingsgedrag.**

Hoofdstuk 2 beschrijft een fMRI studie waarin we 9- tot 12-jarigen en jong volwassenen vroegen kansen in te schatten. In dit experiment vroegen we deelnemers om zoveel mogelijk punten te winnen door steeds de meest waarschijnlijke van twee onzekere uitkomsten te kiezen. We ontwikkelden voor dit doel een taak waarbij deelnemers

taarten te zien kregen die bestonden uit bruine stukken (chocoladetaart) en roze stukken (aardbeientaart) in verschillende verhoudingen. Bij iedere keuze kon een punt worden gewonnen of verloren. Er waren makkelijke keuzes (1 of 2 stukken hadden een contrasterende kleur) en moeilijkere keuzes (3 of 4 stukken hadden een contrasterende kleur). Zowel 9-12 jarige kinderen als jong volwassenen waren goed in staat de meest waarschijnlijke uitkomst te kiezen. We onderzochten bij iedere beslissing de activiteit in de hersenen op het moment dat de deelnemers hun keuze maakten en op het moment dat ze de uitkomst van hun keuze zagen. Dit was het eerste fMRI experiment waarin bij kinderen jonger dan 12 de werking van de hersenen tijdens het nemen van beslissingen voor een beloning werd onderzocht. Bij kinderen en jong volwassenen bleken grotendeels dezelfde hersengebieden betrokken te zijn bij het uitvoeren van deze taak, maar er waren ook verschillen tussen de leeftijdsgroepen. Zo was bij alle deelnemers een gebied in het voorste gedeelte van de hersenen dat geassocieerd is met cognitieve controle, de *Anterior Cingulate Cortex* (ACC), meer actief bij de moeilijke beslissingen dan bij de makkelijke beslissingen. Het verschil in activiteit bij deze verschillende typen beslissingen was echter groter voor de 9-12 jarigen. Dit suggereert dat zij een groter beroep moesten doen op cognitieve controleprocessen bij de moeilijke keuzes dan de volwassenen, zelfs al maakten ze uiteindelijk dezelfde keuze. Twee andere gebieden die in eerdere studies bij volwassenen al betrokken bleken bij het nemen van beslissingen, de Dorsolaterale Prefrontale Cortex (DLPFC) en Orbitofrontale Cortex (OFC) waren ook in deze studie meer actief bij moeilijke keuzes ten opzichte van makkelijke keuzes. Maar de activiteit in deze gebieden verschilde niet tussen kinderen en volwassenen. Er was wel een verschil in hersenactiviteit tussen de leeftijdsgroepen op het moment dat deelnemers de uitkomst van hun beslissingen te zien kregen. Het laterale gedeelte van de OFC was meer actief bij verlies ten opzichte van winst bij kinderen, bij volwassenen was dit verschil er niet. We interpreteerden dit resultaat als een aanwijzing dat kinderen verlies als vervelender ervoeren dan volwassenen.

Verdere ondersteuning voor het idee dat cognitieve controle ontwikkeld gedurende de adolescentie wordt beschreven in Hoofdstuk 7. Dit hoofdstuk beschrijft een studie naar de ontwikkeling van het werkgeheugen voor object- en ruimtelijke informatie. Ook wordt de verwerking van feedback over de prestatie en het monitoren van het gedrag onderzocht. Werkgeheugen, het vermogen feedback te

verwerken en het vermogen het eigen gedrag te monitoren zijn belangrijke componenten van cognitieve controle. In dit experiment bestudeerden we niet alleen het gedrag van de deelnemers, maar onderzochten we ook veranderingen in de hartslag. Deze veranderingen kunnen een indicatie geven van cognitieve processen die niet op grond van gedrag te meten zijn. We vroegen deelnemers uit 4 leeftijdsgroepen (6–7, 9–10, 11–12 en 18–26 jaar) object- en ruimtelijke informatie te onthouden en gaven ze feedback over hun prestatie. Uit de resultaten bleek dat het werkgeheugen voor ruimtelijke informatie sneller ontwikkelt dan dat voor object informatie. Het werkgeheugen voor ruimtelijke informatie van deelnemers vanaf 11 jaar was al even goed als dat van volwassenen, terwijl het werkgeheugen voor object informatie nog geen volwassen niveau had bereikt op 12-jarige leeftijd en nog gedurende de adolescentie verbeterde. De hartslagresultaten lieten zien dat ook het vermogen het eigen gedrag te monitoren toenam gedurende de adolescentie. De hartslag vertraagde nadat deelnemers een fout hadden gemaakt. Deze vertraging wordt gezien als een effect van een toename in de betrokkenheid van cognitieve capaciteit, en deze was groter in volwassenen dan in kinderen. De hartslagreactie had bovendien bij de 11-12-jarigen nog geen volwassen niveau bereikt, wat opnieuw suggereert dat het vermogen de eigen prestatie te monitoren gedurende de adolescentie toeneemt.

Het tweede belangrijke basisproces dat een rol speelt in theorieën over risicogedrag in de adolescentie is de aan de ontwikkeling gerelateerde verandering in de gevoeligheid voor beloningen. Eerdere studies hebben gevonden dat het systeem in de hersenen dat belangrijk is voor het verwerken van beloningen *meer* actief is in adolescenten (Ernst et al., 2005; May et al., 2004), of juist *minder* actief (Bjork et al., 2004). Deze schijnbaar tegenstrijdige bevindingen maken het moeilijker de oorzaken van risicovol gedrag in de adolescentie te begrijpen. De interpretatie van deze resultaten wordt bemoeilijkt door grote verschillen in de gebruikte taken en het beroep dat deze taken doen op de deelnemers. Het is bijvoorbeeld mogelijk dat adolescenten een andere strategie gebruiken dan volwassenen om dezelfde taak uit te voeren, dit zou de vergelijking tussen deelnemers van verschillende leeftijden bemoeilijken. Ook is het mogelijk dat adolescenten een risico als minder groot of een beloning als groter ervaren dan volwassenen. Om fundamentele verschillen in het systeem in de hersenen dat belangrijk is voor de verwerking van beloningen te onderzoeken en tegelijkertijd deze problemen in de interpretatie te voorkomen deden we

een tweede fMRI experiment waarin we een passieve taak gebruikten (Hoofdstuk 3). We vroegen 10-12-, 14-15- en 18-23-jarige deelnemers in een fMRI scanner te kijken naar drie gokkasten. Door op een knop drukten startten deelnemers de gokkasten, en verscheen er achtereenvolgens in iedere gokkast een plaatje. Wanneer alle drie de plaatjes gelijk waren (bijvoorbeeld wanneer drie keer een plaatje van een kiwi verscheen) wonnen zij een klein geldbedrag. Het is belangrijk op te merken dat in deze taak beloningen niet afhankelijk waren van het gedrag of de beslissingen van de deelnemer, en eventuele verschillen in de activiteit in het beloningssysteem in de hersenen dus niet samenhangen met verschillen in gedrag of strategieën. De resultaten van deze studie lieten verschillen tussen adolescenten en jong volwassenen zien tijdens het wachten op mogelijke winst en tijdens het verwerken van uitgekeerde winst. In beide situaties waren gebieden in de hersenen die belangrijk zijn voor het verwerken van beloningen actief. Deze gebieden, waaronder het voorste gedeelte van de Insula, en in de nucleus accumbens (NAcc) in het ventrale gedeelte van het striatum (VS), waren meer actief bij de 10-12 en 14-15-jarige adolescenten dan bij volwassenen. De hersenen van volwassenen reageerden anders. Bij hen vonden we vooral dat gebieden in de prefrontale cortex (PFC) actief waren; de OFC was alleen in volwassenen actief wanneer verwachte winst uitbleef. Deze resultaten ondersteunen de hypothese dat gebieden in de hersenen die belangrijk zijn voor het verwerken van beloningen actiever zijn in de adolescentie.

Samengenomen ondersteunen de resultaten van de in de hoofdstukken 2 en 7 beschreven experimenten de hypothese dat cognitieve controle functies tijdens de adolescentie nog ontwikkelingsveranderingen laten zien. De resultaten van het in hoofdstuk 3 beschreven experiment suggereren dat er fundamentele verschillen zijn in de manier waarop beloningsgebieden in de hersenen, in het bijzonder in het VS, reageren in het midden van de adolescentie. Deze resultaten vormden de basis voor de experimenten die in de hoofdstukken 4, 5 en 6 zijn beschreven. In deze experimenten waren beloningen wel afhankelijk van het gedrag van de deelnemers en speelden zowel de gevoeligheid voor beloningen als cognitieve controle een rol bij het nemen van beslissingen.

### **Ontwikkeling van het vermogen beslissingen te nemen in risicovolle situaties; relatieve bijdragen van cognitieve controle en gevoeligheid voor beloningen**

Hoofdstuk 4 beschrijft een gedragsstudie waarin gebruik werd gemaakt van een aangepaste versie van het paradigma dat in Hoofdstuk 2 werd gebruikt. In deze versie van de taak werden zowel de kans op winst als de grootte van de beloning waarmee gegokt kon worden gemanipuleerd. We vroegen deelnemers uit 5 leeftijdsgroepen (8-9, 11-12, 14-15, 17-18, 25-30 jaar) te proberen zoveel mogelijk punten te winnen door herhaaldelijk te kiezen tussen een gok met een hoog risico en een lage kans op een groot aantal punten of een gok met een laag risico en een grotere kans op één punt. We probeerden te controleren voor leeftijdsgerelateerde verschillen in werkgeheugencapaciteit die de taak relatief moeilijker zou kunnen maken voor jongere deelnemers door alle informatie die nodig was om een beslissing te nemen op het scherm te tonen bij iedere keuze. Om deze reden was het voor deelnemers niet nodig om voor hun beslissingen relevante informatie te onthouden of ontdekken tijdens het uitvoeren van de taak. In eerdere studies waarin gevonden werd dat het vermogen beslissingen te nemen tot de late adolescentie toeneemt werd hier niet voor gecontroleerd (Crone & Van der Molen, 2004; Hooper, Luciana, Conklin & Yarger, 2004). Anders dan in deze eerdere studies vonden wij geen verschillen in prestatie tussen de leeftijdsgroepen. Dit suggereert dat in een situatie waarin alle informatie die nodig is om een beslissing te nemen beschikbaar is, het vermogen kansen in te schatten en mogelijke beloningen af te wegen al op volwassen niveau is in kinderen van 8 jaar oud. Deze bevindingen suggereren dat risicovol gedrag in de adolescentie niet het gevolg is van een onvermogen om beslissingen en de mogelijke gevolgen daarvan te begrijpen. Maar, wanneer beslissingen meer complex zijn, bijvoorbeeld omdat risico-informatie moet worden geleerd op basis van feedback over het gedrag zijn verschillen in prestatie tot in de late adolescentie te zien.

Zoals hierboven al beschreven kunnen psychofysiologische maten inzicht geven in leeftijdsgerelateerde veranderingen in cognitieve processen wanneer deze niet op grond van het gedrag te meten zijn. Dit gegeven was de aanleiding voor het in Hoofdstuk 5 beschreven experiment. In dit experiment toetsen we de hypothese dat adolescenten eerder risicovolle beslissingen nemen omdat ze gevoeliger zijn voor mogelijke beloningen en omdat ze over onvolwassen cognitieve controle vaardigheden beschikken. Aan dit experiment namen adolescenten uit drie leeftijdsgroepen deel (11-12, 14-15 en 17-18 jaar). We vroegen hen ook in deze studie herhaaldelijk te kiezen tussen een gok met een hoog risico of laag risico en varieerden de hoogte van de



beloning die gewonnen kon worden. We pasten de Taarten Goktaak aan om het mogelijk te maken hartslagveranderingen te meten, en we lieten de deelnemers in dit experiment spelen om Euro's in plaats van punten. De resultaten van deze studie lieten zien dat de bereidheid risico te nemen afnam met leeftijd. Bovendien lieten de hartslagdata een verhoogde reactie op beloningen zien in 11-12-jarigen. Deze leeftijdsgerelateerde verschillen in de hartslagreactie werden gevonden tijdens de anticipatie op de uitkomst van risicovolle beslissingen, niet tijdens het verwerken van die uitkomst. De resultaten van deze studie ondersteunen opnieuw het idee dat een verhoogde gevoeligheid voor mogelijke beloningen bijdraagt aan het nemen van risico's in de adolescentie en suggereren dat leeftijdsgerelateerde veranderingen samenhangen met de manier waarop adolescenten mogelijke beloningen verwerken op het moment dat ze een beslissing nemen. Dit idee sluit aan bij recente theorieën over risicogedrag in de adolescentie die in het volgende gedeelte verder zullen worden besproken.

### **Het adolescentenbrein: Controle en emotie uit balans**

In Hoofdstuk 6 werd de hypothese dat beloningsgebieden en controlegebieden verschillende ontwikkelingstrajecten volgen getoetst in een fMRI experiment. Deelnemers kozen tussen een laagrisico gok waarmee ze een grote kans hadden op het winnen van een kleine beloning (1 Euro) en een hoogrisico gok waarmee ze een kleine kans hadden op een grotere beloning (2, 4, 6 of 8 Euro). We bestudeerden opnieuw de hersenactiviteit op het moment dat de keuze werd gemaakt en op het moment dat de uitkomst werd verwerkt bij deelnemers uit 4 leeftijdsgroepen (8-10, 12-14, 16-17 en 19-25 jaar). Het gedrag van de deelnemers was vergelijkbaar in de verschillende leeftijdsgroepen; in alle leeftijdsgroepen waren deelnemers meer bereid risico te nemen wanneer de mogelijke beloning die daarmee gewonnen kon worden hoog was dan wanneer die laag was. Maar, voor keuzes waarbij de mogelijke beloning klein was, nam de bereidheid een groot risico te nemen af met leeftijd. De fMRI resultaten bevestigden dat hoogrisico keuzes geassocieerd waren met activiteit in de ventromediale PFC (VMPFC), terwijl laagrisico keuzes geassocieerd waren met activiteit in de laterale PFC. Activiteit van het dorsale gedeelte van de ACC liet een lineaire afname met leeftijd zien, terwijl VMPFC activiteit een piek vertoonde in de adolescentie. Winst na hoogrisico keuzes hing samen met activiteit in de VMPFC en het VS, en deze VS activiteit piekte in de adolescentie. Deze resultaten ondersteunen de hypothese dat risicovol

gedrag in de adolescentie voortvloeit uit een disbalans die het gevolg is van verschillende ontwikkelingstrajecten van belonings- en controlegebieden in de hersenen. We stellen dat in toekomstige studies ontwikkelingsveranderingen in de adolescentie als het gevolg van veranderingen in het samenspel van subsystemen in de hersenen en niet als het gevolg van de ontwikkeling van aparte mechanismen zouden moeten worden bestudeerd.

### **Conclusies en toekomstperspectief**

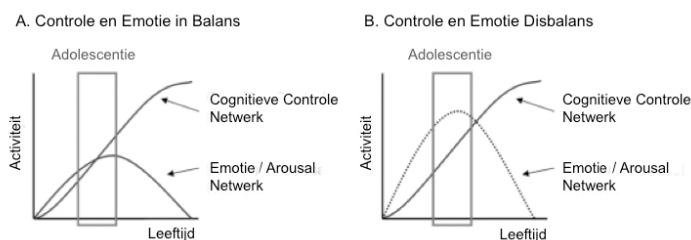
De twee theorieën die in Hoofdstuk 1 zijn beschreven leiden tot verschillende voorspellingen over de ontwikkeling van risicovol gedrag. Het eerste perspectief voorspelt dat risicovol gedrag in de adolescentie een lineaire afname laat zien als gevolg van een toename van cognitieve controle van de kindertijd tot in de volwassenheid, terwijl het tweede perspectief een piek in risicovol gedrag in de adolescentie voorspelt die het gevolg is van een toename van de emotionele/motivationale processen in deze fase van de ontwikkeling.

Het in dit proefschrift beschreven onderzoek ondersteunt de hypothese dat risico gedrag in de adolescentie het gevolg is van een onbalans in de hersenen die voortvloeit uit de verschillende ontwikkelingstrajecten die worden gevolgd door hersengebieden die belangrijk zijn voor het motiveren van gedrag aan de ene kant, en gebieden die belangrijk zijn voor het reguleren van gedrag aan de andere kant. We stellen dat recente theorieën die gebaseerd zijn op neuro-imaging onderzoek bij kinderen en jongeren een raamwerk kunnen vormen waarbinnen verschillende theorieën over risicovol gedrag in de adolescentie kunnen worden verenigd en schijnbaar tegenstrijdige bevindingen in de literatuur kunnen worden verklaard. Omdat het tot nu toe lastig is gebleken risicovol gedrag in een laboratorium context te onderzoeken is onderzoek waarbij gebruik wordt gemaakt van psychofysiologische maten of technieken waarmee het brein in beeld kan worden gebracht erg waardevol gebleken. Deze technieken hebben het mogelijk gemaakt veranderingen in de ontwikkeling te bestuderen die niet op basis van gedrag zichtbaar zijn.

Samengevat, veronderstellen de studies die in dit proefschrift worden beschreven dat risicovol gedrag in de adolescentie het gevolg is van een toename in de gevoeligheid voor beloningen, samen met een langzame ontwikkeling van cognitieve controle. Deze conclusie is consistent met

recente theorieën die veronderstellen dat belonings- en cognitieve controle systemen in de hersenen complementair zijn en samen bijdragen aan het tot stand komen van beslissingen. Het beloningssysteem is evolutionair gezien ouder en bouwt op subcorticale structuren in de hersenen zoals de NAcc, de Amygdala en het ventromediale gedeelte van de PFC, waarvan bekend is dat ze een rol spelen bij de verwerking van emotioneel geladen informatie. Het tweede, evolutionair jongere systeem dat belangrijk is voor de controle van impulsen bouwt op corticale gebieden waaronder de laterale PFC en de ACC. Leeftijdsgelateerde verschillen in risico gedrag worden verondersteld het gevolg te zijn van de verschillende patronen van functionele ontwikkeling die door deze twee systemen in het brein worden gevolgd.

Deze verschillende ontwikkelingspatronen hebben een kwetsbare balans tussen impulsen en controle in de adolescentie tot gevolg. We stellen dat gedurende de ontwikkeling beide systemen bijdragen aan het nemen van beslissingen, maar dat het uiteindelijke gedrag afhankelijk is van de relatieve sterkte van ieder systeem in een bepaalde situatie. In Figuur 1A is een schematische weergave te zien van de bijdrage van beide systemen gedurende de ontwikkeling in een emotioneel neutrale situatie (zoals we bijvoorbeeld zien in het laboratorium tijdens een experiment).



**Figuur 1** Schematische weergave van de relatieve bijdrage van cognitieve controle en emotie/arousal systemen in de hersenen aan beslissingsgedrag gedurende de ontwikkeling. Het grijze kader geeft het verschil tussen beide systemen in de periode van de adolescentie weer. In Figuur A. is het patroon van hersenactiviteit van controle- ten opzichte van emotie/arousal gebieden te zien in een neutrale context; In dit geval is de cognitieve controle toereikend om risicogedrag te voorkomen. In Figuur B is hetzelfde patroon te zien, in een meer emotionele context. In dit geval kan risicovol gedrag niet worden voorkomen door ontoereikende cognitieve controle.

In deze situatie zijn emotie en cognitieve controle in balans, en voorspelt het model een lineaire afname in risicogedrag met leeftijd, als gevolg van een lineaire toename in cognitieve controle. In Figuur 1B is

een situatie te zien waarin er sprake is van onbalans, omdat het emotie netwerk relatief actiever is dan het controle netwerk (zoals we vaak zien in spannende situaties buiten het laboratorium), of omdat het onvolwassen controle netwerk ontoereikend is (bijvoorbeeld wanneer beslissingen erg complex zijn). In deze situaties voorspellen we een piek in risicogedrag in de adolescentie.

Eerdere studies naar de ontwikkeling van risicogedrag in de adolescentie maakten gebruik van verschillende taken en methoden, en het integreren van deze methoden (zoals onderzoek in een laboratorium of in het dagelijks leven en de manipulatie van cognitieve, emotionele en sociale factoren in gebruikte taken) is nodig om deze fase in de ontwikkeling volledig te begrijpen. De adolescentie is een unieke periode in de ontwikkeling die op verschillende manieren kan worden gekenmerkt. Tieners kunnen bijvoorbeeld worden getypeerd als pre-puberaal, puberaal of post-puberaal, of vanuit een cognitief en sociaal perspectief als in de vroege, midden of late adolescentie. Deze verschillende fasen zouden moeten worden erkend, en bestudeerd om de effecten van hormonale veranderingen die samenhangen met de puberteit en effecten die samenhangen met de ontwikkeling van de hersenen te kunnen onderscheiden.

Het bestuderen van het ontwikkelingsverloop en de psychofysiologische uiting van cognitieve processen die belangrijk zijn voor de ontwikkeling van het vermogen beslissingen te nemen draagt bij aan het verfijnen van de theorie over ontwikkelingsveranderingen gedurende de adolescentie. Hierbij is het belangrijk rekening te houden met de eerder genoemde verschillende fasen binnen de periode van de adolescentie. Een recente studie illustreert de voordelen van het toepassen van een dergelijke theoretische benadering.

Gedurende de adolescentie veranderen vriendschappen en worden leeftijdgenoten belangrijker. Adolescenten brengen bijvoorbeeld steeds meer tijd door met leeftijdgenoten dan met hun ouders, en de mening van leeftijdgenoten wordt belangrijker (Harris, 1995). In een experiment dat als doel had de invloed van leeftijdgenoten op risicogedrag in de adolescentie te meten, speelden adolescenten (van 13-16 jaar oud), jong volwassenen (van 18-22 jaar oud) en volwassenen (24 jaar oud) een risico spel. Ze deden dit alleen, of in het bijzijn van twee leeftijdgenoten (Gardner & Steinberg, 2005). Deze studie liet zien dat er sprake was van een disproportionele toename in het nemen van risico in

aanwezigheid van leeftijdgenoten bij adolescenten, maar niet bij volwassenen. Mogelijk beïnvloedde de aanwezigheid van leeftijdgenoten, of de behoefte er bij te horen, het emotie/motivatie netwerk in de hersenen van adolescenten en leidde dit tot risicogedrag. Deze studie geeft ook een voorbeeld van een situatie waarin verschillen in de manier waarop het brein functioneert kunnen verklaren dat adolescenten dezelfde keuze die door volwassenen als risicovol wordt ervaren anders interpreteren. De aanwezigheid van vrienden leidde er in dit voorbeeld mogelijk toe dat adolescenten de situatie vooral als leuk interpreterden en volwassenen als gevaarlijk.

Hoewel onderzoek met beeldgevende technieken zoals MRI en fMRI heeft gezorgd voor sterke ondersteuning van het idee dat de structuur en werking van de hersenen verandert gedurende de ontwikkeling, en heeft geleid tot een grote toename van het begrip van de ontwikkeling van kinderen, zijn er nog vele vragen niet beantwoord. Eén van de grootste beperkingen van het huidige fMRI onderzoek is het beperkte vermogen individuele verschillen in gedrag te verklaren. Bijvoorbeeld, de in hoofdstuk 6 beschreven resultaten laten zien dat verschillen in de bereidheid risico te nemen gerelateerd waren aan verschillen in patronen van hersenactiviteit in alle leeftijdsgroepen. Maar helaas zijn de huidige analysetechnieken niet in staat conclusies te trekken over individuen in die groepen (Logothetis, 2008; Poldrack, 2006). Hoewel inmiddels een groot aantal cognitieve functies gerelateerd zijn aan specifieke hersengebieden betekent dit niet dat deze gebieden ook uitsluitend bijdragen aan deze functies. Conventionele fMRI analyses maken het niet mogelijk om op grond van activiteit in een bepaald gebied te zeggen welk cognitief proces plaatsvindt. We zijn dus niet in staat te voorspellen welke adolescent een verhoogd risico loopt op basis van zijn of haar hersenactiviteit. Activiteit in een bepaald gebied voor een individu kan afwijken van het gemiddelde van de groep. In toekomstig onderzoek zal het belangrijk zijn rekening te houden met deze verschillen tussen individuen, met name in de context van onderzoek naar de ontwikkeling. Juist in kinderen en adolescenten zijn individuele verschillen in zowel gedrag als patronen van hersenactiviteit groot. Het in dit proefschrift beschreven onderzoek en de mogelijke nadelige gevolgen van risicogedrag in de adolescentie onderstrepen het belang van verder onderzoek in de toekomst. Dit toekomstig onderzoek zou rekening moeten houden met individuele verschillen en zou moeten streven naar een beter begrip van de relatie tussen patronen van

hersenactiviteit en cognitieve processen. Inmiddels is met dit onderzoek een start gemaakt.

