



Centraal Planbureau

CPB Achtergronddocument | 6 april 2016

Reële opties en het waarderen van flexibiliteit bij infrastructuurprojecten

Thomas van der Pol
Frits Bos
Peter Zwaneveld

CPB Achtergronddocument

Reële opties en het waarderen van flexibiliteit bij infrastructuurprojecten

Thomas van der Pol, Frits Bos en Peter Zwaneveld

6 april 2016

Korte samenvatting

De reële-optiebenadering benadrukt dat flexibiliteit van investeringsprojecten van grote waarde kan zijn. In deze studie is onderzocht hoe opties voor flexibiliteit bij infrastructuurprojecten op een praktische manier kunnen worden geëvalueerd. Beslisboomanalyse als methode van evaluatie en waardering van reële opties is nader uitgewerkt en toegepast op drie casestudies: de ombouw van de Meppelerdiepsluis, de vervanging van de Ramspolbrug en een fictieve case over snelwegverbreding in combinatie met ondertunneling. Bij de casestudies is gekeken naar opties voor latere aanpassing, vervanging of uitbreiding. De beslisboommethodiek is daarnaast vergeleken met vier andere methoden voor de waardering van opties: contingent claims methoden in continue tijd (bijvoorbeeld Black-Scholes formule), contingent claims methoden in discrete tijd (bijvoorbeeld het binomiale model van Cox, Ross en Rubinstein), dynamisch programmeren en Monte-Carlosimulatiemethoden. Geconcludeerd wordt dat beslisboomanalyse een relatief eenvoudige en algemeen toepasbare methode is voor het waarderen van flexibiliteit. Het kan ook goed worden ingepast in MKBA's van infrastructuurprojecten met het oog op vaste discontovoeten en enkele specifieke toekomstscenario's. De beslisboommethode verschilt niet fundamenteel van andere methoden. Vanwege het minder wiskundige karakter is de methode toegankelijker voor de meeste gebruikers van MKBA's.

Inhoudsopgave

1	Inleiding en samenvatting	8
1.1	Inleiding.....	8
1.2	Samenvatting	11
2	Waardering van opties met beslisboomanalyse	16
2.1	Inleiding.....	16
2.2	Beslisboomanalyse met één beslismoment	17
2.3	Beslisboomanalyse met meerdere beslismomenten	24
2.4	Conclusies beslisboommethode	27
3	Drie casestudies.....	28
3.1	Inleiding.....	28
3.2	Vervanging Meppelerdiepsluis	29
3.2.1	Schets van het probleem	29
3.2.2	Vergelijking van alternatieven zonder reële optieanalyse	30
3.2.3	Vergelijking van alternatieven met reële optieanalyse.....	32
3.2.4	Conclusies Meppelerdiepsluis	39
3.3	Vervanging Ramspolbrug	40
3.3.1	Schets van het probleem	40
3.3.2	Vergelijking van alternatieven zonder reële optieanalyse	41
3.3.3	Vergelijking van alternatieven met reële optieanalyse.....	41
3.3.4	Conclusies casestudie Ramspolbrug	51
3.4	Uitbreiding snelweg met tunnel	53
3.4.1	Schets van het probleem	53
3.4.2	Vergelijking van ontwerpen zonder reële optieanalyse	53
3.4.3	Vergelijking van ontwerpen met reële optieanalyse.....	55
3.4.4	Conclusies casestudie snelweg met tunnel	58
3.5	Conclusies casestudies	58

4	Beslisboomanalyse versus andere reële optiemethoden.....	60
4.1	Inleiding.....	60
4.2	Beschrijving van reële optiemethoden.....	60
4.2.1	Continue contingent claims methoden.....	60
4.2.2	Discrete contingent claims methoden.....	62
4.2.3	Dynamisch programmeren.....	65
4.2.4	Monte-Carlosimulatie.....	66
4.3	Praktische bruikbaarheid van reële optiemethoden.....	67
4.3.1	Relatie met MKBA, transparantie en toegankelijkheid.....	67
4.3.2	Eenvoud van implementatie.....	68
4.3.3	Realisme.....	68
4.4	Illustratie reële optiemethoden voor casus Twentekanalen.....	71
4.4.1	Eenvoudige beslisboomanalyse.....	71
4.4.2	Continue contingent claims methoden.....	72
4.4.3	Discrete contingent claims methoden.....	72
4.4.4	Dynamisch programmeren.....	73
4.4.5	Simulatie.....	74
4.5	Conclusies vergelijking van methoden.....	75
5	Stappenplan voor reële optieanalyse in MKBA infrastructuur.....	77
5.1	Stap 1: Mogelijkheden voor flexibiliteit?.....	78
5.2	Stap 2: Opties waarderen zinvol?.....	79
5.3	Stap 3: ROA uitvoeren.....	79
	Referenties.....	82
Bijlage A	Beslisboom met break-evenanalyse.....	86
Bijlage B	Kansverdeling toekomstscenario's.....	88
Bijlage C	Discontovoet en aangepaste risico-opslag.....	90
Bijlage D	Kenmerken verschillende reële optiemethoden.....	95
Bijlage E	Netwerkeffecten.....	96

1 Inleiding en samenvatting

1.1 Inleiding¹

Grote opgave voor vervanging en renovatie infrastructuur

De netwerken van water- en weginfrastructuur zijn van groot belang voor de veiligheid en bereikbaarheid van Nederland. Komende decennia is er een grote opgave voor de vervanging en renovatie van deze infrastructuur. Zo is een groot deel van de *natte* kunstwerken, zoals sluizen en gemalen, gebouwd aan het begin van de vorige eeuw. Ook in de periode tussen 1950 en 1980 zijn veel natte kunstwerken gebouwd, onder andere door de uitvoering van de Deltawerken. Bij de vervanging en renovatie van de kunstwerken moet rekening worden gehouden met strengere normen en toekomstige ontwikkelingen. Grotere binnenvaartschepen en sterk groeiende stromen van containerbinnenvaartvervoer (mede vanwege de aanleg van Maasvlakte 2) vragen om aanpassing van sluizen (breder, dieper, grotere schutcapaciteit), bruggen (verhoging, verbreding) en aansluitende infrastructuur (spoor en wegen). Tot slot ligt er een opgave voor de vervanging van *droge* kunstwerken, zoals landtunnels en viaducten. Deze kunstwerken zijn bovendien niet los te zien van het oplossen van de knelpunten op het hoofdwegennet.

Wat is bij de vervanging en renovatie van dergelijke natte en droge infrastructuur de beste investeringsstrategie? Gelet op de grote en diverse soorten onzekerheden, zoals economie, klimaat, technologische ontwikkeling, de financiële positie van de overheid en politieke besluitvorming, kan flexibiliteit hierbij van grote waarde zijn. Een belangrijke vorm van flexibiliteit is uitstel en fasering. Maar het kan bijvoorbeeld ook gaan om reservering van grond voor toekomstige aanleg van een weg of uitbreiding van een sluis. Telkens alleen maar kleine en partiële aanpassingen plegen, is echter riskant, praktisch niet werkbaar en ook vaak een stuk duurder dan in één keer een grote aanpassing doen. Hoe moet bij dit soort investeringsbeslissingen dan het evenwicht tussen flexibiliteit, robuustheid en kostenvoordelen door schaalearde effecten worden gevonden? En hoe kan dit praktisch het beste worden aangepakt, bijvoorbeeld in het kader van een maatschappelijke kosten-batenanalyse (MKBA) voor infrastructuur? Reële optieanalyse kan dienen als aanvulling op de MKBA, waarbij rekening wordt gehouden met de waarde en de kosten van flexibiliteit van investeringen.

Resultaten eerdere studie naar reële opties en infrastructuur

Het CPB heeft in een eerdere studie² onderzocht in hoeverre de reële optiebenadering bruikbaar kan zijn. Na een kort overzicht van de reële

¹ Coos van Buuren (Grontmij), Gigi van Rhee (Stratelligence), Carl Koopmans (Vrije Universiteit Amsterdam), Ekko van Ierland (Wageningen Universiteit), Jarl Kind (Deltares), Pauline Wortelboer (KiM), André Wooning, Paul van den Hoek, Esther Uijtewaal, Gerra Witting en Jan van Donkelaar (allen RWS) en Kim Smet (promovendus Harvard University) worden bedankt voor het commentaar op een eerdere versie.

optieliteratuur en van de rol van flexibiliteit in Nederlandse MKBA's, is een reële optiebenadering toegepast op de vervangingsopgaven van natte kunstwerken rondom het Volkerak-Zoommeer en de Grevelingen, met onder meer de grootste binnenvaartsluizen van Europa. In deze eerdere CPB-studie worden drie stappen onderscheiden voor de praktische toepassing van de reële optiebenadering binnen een MKBA:

1. Kijk naar alle opties voor flexibiliteit: niet alleen andere timing van investeringen, maar ook andere vormgeving, maatvoering of extra onderzoek;
2. Zoek actief naar no-regret-alternatieven;
3. Als die er niet zijn, bepaal de waarde van de opties indicatief.

Tabel 1.1 Voorbeelden van flexibiliteit bij natte infrastructuur

Soort flexibiliteit	Voorbeeld
Timing: uitstel	Uitstel investering Zeesluis IJmuiden
Faseren en combineren	Volkeraksluizen: eerst versnelling schutproces, later misschien 4e kolk
Constructie, materiaal en dimensionering	Levensduurverlenging bruggen door aanpassen staalconstructie, extra wapening van beton en moderne kunststofcoatings Spoorbrug extra sterk maken zodat eventueel een extra laag daarop gebouwd kan worden
Reservering voor toekomstig gebruik	Volkeraksluizen: ruimte gereserveerd voor toekomstige sluis Autobrug met fietspad waarvan eventueel later ook extra rijbaan kan worden gemaakt Grond rond Grevelingen reserveren en gebruik aanpassen met het oog op mogelijk toekomstig gebruik voor waterberging
Innovatie en alternatieve oplossingen	Dijk zo aanleggen dat rijbaan daarover eventueel goedkoop kan worden uitgebreid Pompen voor waterveiligheid rond IJsselmeergebied i.p.v. dijkverhoging Waterberging in Grevelingen en Volkerak-Zoommeer voor extra waterveiligheid Geluidswal in Zwolle wordt ook gebruikt als nooddijk Kustbescherming door het storten van zand voor de kust (zandmotor)
Informatie verzamelen	Monitoring technische staat dijken en bruggen Monitoring functionaliteit natte kunstwerken, zoals bij sluis aantal en soort schepen en wachttijden Onderzoek knelpunten en flexibiliteit hoofdvaarwegen Onderzoek naar goedkope levensduurverlenging bruggen

Bron : Bos en Zwaneveld (2014, p. 9).

De belangrijkste conclusie van de CPB-studie was dat identificatie van de opties voor flexibiliteit vaak belangrijker is dan het precies waarderen van deze opties. Deze studie leverde ook een uitgebreide set op met voorbeelden van flexibiliteit: zie bovenstaande tabel. Deze laat zien dat flexibiliteit niet alleen gaat om opties van aanpassing van timing, reservering van toekomstig gebruik of dimensionering van infrastructuur, maar ook om actief te experimenteren en informatie te verzamelen en

² Zie Bos en Zwaneveld (2014). In deze studie wordt ook verwezen naar diverse andere studies. Een korte algemene toelichting op reële opties en maatschappelijke kosten-batenanalyse van infrastructuur wordt gegeven in Bos et al. (2016).

om verrassende innovatieve oplossingen te identificeren; bijvoorbeeld de installatie van pompen op de Afsluitdijk in plaats van dijkverhoging of het combineren van een geluidswal en een nooddijk in Zwolle.

De tweede conclusie van de CPB-studie was dat waarden van flexibiliteit niet nodig is als gevoeligheidsanalyse aangeeft dat een bepaald alternatief een no regret-oplossing is en daarmee altijd de voorkeur verdient boven andere investeringen.

Een derde conclusie van de CPB-studie was dat beslisboomanalyse geschikt is voor de waardering van reële opties indien er geen no regret-alternatief is.

Doel en opzet van dit vervolgonderzoek

In deze studie is nader onderzocht hoe opties voor flexibiliteit bij infrastructuurprojecten op een praktische manier kunnen worden gewaardeerd. Als methode voor het evalueren en indicatief waarden van reële opties is opnieuw gekozen voor beslisboomanalyse. Hierbij wordt een beslisboom opgesteld met de belangrijkste beslismomenten, verschillende toekomstscenario's en hun kansen. Voordeel van deze methode is dat de toepassing relatief eenvoudig is en dat het kan worden toegepast op een groot aantal verschillende situaties en vormen van flexibiliteit. De methode wordt vergeleken met andere methoden voor het waarden van opties.

Leeswijzer

In de rest van dit hoofdstuk vatten we de belangrijkste bevindingen van deze studie samen. Hoofdstuk 2 bespreekt de waardering van opties met beslisboomanalyse. In hoofdstuk 3 passen we de beslisboomanalyse toe op drie casussen: vervanging van de Meppelerdiepsluis, vervanging van de Ramspolbrug en een fictieve case over uitbreiding van een snelweg in combinatie met ondertunneling. In hoofdstuk 4 vergelijken we beslisboomanalyse met vier andere methoden voor waardering van opties: contingent claims methoden in continue tijd (bijvoorbeeld Black-Scholes formule), contingent claims methoden in discrete tijd (bijvoorbeeld het binomiale model van Cox, Ross en Rubinstein), dynamisch programmeren en Monte-Carlosimulatiemethoden. Tot slot wordt in hoofdstuk 5 een stappenplan gepresenteerd voor het toepassen van reële optieanalyse in MKBA's. In de bijlagen wordt beslisboomanalyse methodisch verder uitgediept.

1.2 Samenvatting

Reële optieanalyse in drie algemene lessen en drie praktische stappen

Dit onderzoek heeft de lessen en inzichten uit de vorige studie bevestigd en verder aangescherpt. Dit betreft niet alleen hoe de opties van flexibiliteit kunnen worden gewaardeerd, maar ook wanneer en onder welke omstandigheden dit van belang is en hoe dit praktisch kan worden toegepast. Dit kan worden samengevat in drie algemene lessen en drie praktische stappen (zie onderstaande tabel).

Tabel 1.2 Drie algemene lessen voor reële optieanalyse (ROA) van investeringen in infrastructuur

Algemene les	Nadere uitwerking
1. ROA relevant voor alle stadia van besluitvorming	Politieke, bestuurlijke en praktische overwegingen kunnen mogelijkheden van flexibiliteit inperken. Maar ze moeten wel voldoende ruimte laten om te zoeken naar aantrekkelijke flexibele alternatieven, zeker in een vroegtijdig stadium van besluitvorming
2. ROA vooral relevant als grote onzekerheid, vaste en onomkeerbare kosten en als nieuwe informatie in de loop van de tijd beschikbaar komt	Gevoeligheidsanalyse geeft grote spreiding in uitkomsten en laat geen no regret-alternatief zien; nieuwe informatie betreft bijvoorbeeld werkelijke verkeersstromen, stremmingen en politieke besluitvorming
3. Beslisboomanalyse geschikt voor ROA	Sluit aan bij huidige MKBA-praktijk met vaste discontovoet en enkele toekomstscenario's. Minder wiskundig en daarmee toegankelijker voor meeste gebruikers van MKBA's dan bij andere reële optiemethoden

Drie algemene lessen

De eerste algemene les is dat reële optieanalyse relevant is voor alle stadia van besluitvorming.³ De drie casestudies in dit onderzoek zijn voorbeelden bij de uitvoeringsfase (hoofdbeslissingen, varianten, ontwerp). Maar zoals de diverse voorbeelden in het vorige onderzoek aangeven, zoals de MKBA Zeetogang IJmuiden, MKBA Wind op land en de MKBA Waterveiligheid 21^e eeuw, is flexibiliteit ook van belang in de verkenningsfase en planfase.

De tweede algemene les is dat reële optieanalyse vooral relevant is bij grote onzekerheid, vaste en onomkeerbare kosten, niet-lineaire baten, als nieuwe informatie in de tijd beschikbaar komt en een no regret-alternatief afwezig is. Gevoeligheidsanalyse kan laten zien hoe groot de onzekerheid is en of misschien een no regret-alternatief kan worden gevonden. Als met het verstrijken van de tijd belangrijke nieuwe informatie beschikbaar komt, is het bij de investeringskeuze vaak van belang hier expliciet rekening mee te houden; bijvoorbeeld door een deel of geheel van de investeringskeuze uit te stellen tot het moment dat deze informatie beschikbaar is. Voorbeelden van jaarlijks nieuwe informatie zijn observaties van werkelijke verkeersstromen en -stremmingen. Na enige jaren is vaak ook nieuwe

³ Dit sluit aan op de conclusie van Walker et al. (2001) over robuust adaptief beleid: "This adaptive approach implies fundamental changes in the three major elements of policy-making: the analytical approach, the types of policy considered, and the decision-making process."

informatie beschikbaar over politieke besluitvorming, zoals over kunstwerken in hetzelfde netwerken of belangrijke strategische besluiten, zoals over aanpassing van waterveiligheidsnormen. Dergelijke informatie kan gebruikt worden als een investering 5 of 10 jaar wordt uitgesteld. Daarentegen zal uitstel van een investering met 10 jaar weinig nieuwe informatie geven over andere onzekerheden, zoals zeespiegelstijging of stedelijke groei, waarvan de veranderingen relatief traag gaan.

De derde algemene les is dat beslisboomanalyse geschikt is voor reële optieanalyse van infrastructuurprojecten. Het sluit aan op de huidige MKBA-praktijk met vaste discontovoet en enkele toekomstscenario's. De casestudies in dit en het vorige onderzoek laten zien dat toepassing van reële optiebenadering in een MKBA net als het opstellen van een MKBA in het algemeen een mix van kennis en kunde is waarvoor geen simpel en eenduidig standaardrecept bestaat. Of investeren in een specifiek alternatief verstandig is, hangt af van de specifieke situatie: wat is precies het probleem, wat zijn de verschillende alternatieve oplossingen, wat zijn de belangrijkste onzekerheden en hoe veranderen deze in de tijd als nieuwe informatie beschikbaar komt.

In vergelijking met andere reële optiemethoden is beslisboomanalyse minder wiskundig en eenvoudig grafisch weer te geven. Daarmee is de methode meer toegankelijk voor een grote groep van gebruikers van een MKBA. Ook verschilt de methode niet fundamenteel van deze andere methoden; dit wordt nader toegelicht in hoofdstuk 4.

Drie praktische stappen

In dit onderzoek is de praktische toepassing van reële optieanalyse uitgewerkt. Drie stappen worden onderscheiden:

1. Mogelijkheden voor flexibiliteit?
2. Opties waarderen zinvol?
3. Reële optieanalyse uitvoeren op basis van beslisboomanalyse of andere methode.

Stap 1. Mogelijkheden voor flexibiliteit?

Bij het identificeren van mogelijkheden voor flexibiliteit is het belangrijk om meerdere besluitvormingsmomenten mee te nemen, niet alleen een beslissing nu of spoedig, maar ook over bijvoorbeeld 10 of 20 jaar. Zoals de casestudies over de vervanging van de Meppelderdiepsluis en de Ramspolbrug laten zien, kunnen hierdoor nieuwe combinaties van investeringen worden geïdentificeerd die anders buiten beeld blijven. Ook bij het uitwerken van het ontwerp van investeringsalternatieven is een dergelijke analyse zinvol. Zo kan onvoldoende capaciteit in de toekomst worden vermeden op knelpunten, maar kan ook onnodige overdimensionering worden voorkomen. De fictieve casestudie over een snelweg met tunnel laat dit zien.

Tabel 1.3 Drie praktische stappen voor reële optieanalyse van investeringen in infrastructuur

Reële optieanalyse in drie stappen	Nadere uitwerking
1. Zoek actief naar mogelijkheden voor flexibiliteit	Kijk naar meerdere besluitvormingsmomenten, vooral als nieuwe informatie beschikbaar komt; uitstel en fasering soms mogelijk tegen geringe extra kosten en met grote extra baten; als aanpassingskosten groot zijn, analyse van adaptiviteit en flexibiliteit van belang
2. Zoek naar no regret-alternatieven en bepaal of opties waarderen zinvol is	Beslisboom opstellen kan vaak helpen; kijk ook naar meer extreme of minder waarschijnlijke scenario's in combinatie met niet-lineaire ontwikkeling kosten en baten; kijk naar alle soorten onzekerheden, inclusief lokale en case-specifieke
3. Reële optieanalyse uitvoeren	Beslisboom zonder kansen, break-evenanalyse of kansgevoeligheidsanalyse met symmetrische en scheve kansverdelingen, dikke staarten en meerdere onzekerheden. Eventueel rekening houden met aangepaste risico-opslag en netwerkeffecten

Stap 2. Opties waarderen zinvol?

Het waarderen van flexibiliteit met reële optieanalyse (ROA) heeft vooral meerwaarde als het moeilijk is om te kiezen tussen de verschillende alternatieven. Er moet dus geen sprake zijn van een alternatief dat bij alle plausibele toekomstscenario's de voorkeur verdient (een no regret-alternatief). Ook moet flexibiliteit wel voldoende waarde hebben op basis van een kwalitatieve scan. Tot slot kan worden gekeken in hoeverre een risico-benadering, waar ROA onder valt, meerwaarde heeft.

Dit rapport benadrukt dat niet alleen moet worden gekeken naar gematigde scenario's met een grote waarschijnlijkheid, maar ook naar extremere scenario's met een beperkte kans. Relatief goedkope opties of opties met mogelijk zeer hoge baten kunnen namelijk ook rendabel zijn bij scenario's met een kleine kans, zeker wanneer in dergelijke scenario's de baten of bespaarde kosten exponentieel toenemen in vergelijking met de meer gematigde scenario's. De toegevoegde waarde van ROA is beperkt wanneer de waarde van flexibiliteit naar verwachting laag zal zijn. Dit onderwerp is uitgewerkt bij de casestudie over de vervanging van de Meppelderdiepsluis en de verhoging van de Ramspolbrug.

Bij het zoeken naar een no regret-alternatief en het waarderen van opties komt verder naar voren dat de analyse niet beperkt moet blijven tot algemene scenario's, bijvoorbeeld over sociaaleconomische onzekerheden. Het gaat om specifieke investeringskeuzes die betrekking hebben op een specifieke locatie. Case-specifieke en lokale onzekerheden kunnen dan ook een doorslaggevende invloed hebben op de investeringskeuze. Deze moeten dan ook worden meegenomen.

Een belangrijk voorbeeld van een no regret-alternatief kan uitstel of fasering zijn als dit vrijwel kosteloos kan, dat wil zeggen zonder vrijwel enig verlies van toekomstige

baten of zonder grote extra investeringskosten door het uitstel of de fasering. De kosten van extra flexibiliteit kunnen vooral variëren vanwege verschillen in inpassingskosten, zoals de aanleg of aanpassing van viaducten, tunnels en bruggen. Deze kosten kunnen bijvoorbeeld relatief hoog zijn vanwege nabije bebouwing of kruisende verkeersstromen. Dit wordt geïllustreerd door de casestudies in dit onderzoek over de vervanging van het Meppelerdiep en snelweguitbreiding met ondertunneling.

Stap 3. ROA uitvoeren op basis van beslisboomanalyse of andere methode

ROA kan worden uitgevoerd met diverse methoden, waaronder een beslisboomanalyse, als aanvulling op een MKBA of direct als onderdeel daarvan. Het opstellen van een beslisboom is een hulpmiddel om complexe en uitgebreide keuzes beter te doorgronden, mogelijkheden voor flexibiliteit te evalueren en opties indicatief te waarderen. Ook kan de methode helpen om systematisch no regret-alternatieven te identificeren. In de vorige studie (zie Bos en Zwaneveld, 2014) wordt bijvoorbeeld genoemd dat bij de MKBA over de waterkwaliteit in het Volkerak-Zoommeer, pas na het opstellen van de beslisboom bleek dat aanleg van de Roode Vaart een no regret-maatregel was.

Dit en het vorige onderzoek benadrukken dat waardering van opties via beslisboomanalyse zeker niet neerkomt op het willekeurig toerekenen van kansen aan enkele specifieke toekomstscenario's. Drie vormen van beslisboomanalyse zijn mogelijk:

- Beslisboomanalyse zonder kansen, waarbij alleen uitkomsten per tak van de beslisboom worden berekend. Dit wordt geïllustreerd door de drie casestudies in dit onderzoek;
- Beslisboomanalyse met break-evenkansen, waarbij wordt berekend wanneer een investering zinvol is zonder de toewijzing van specifieke scenariokansen. Een voorbeeld hiervan is de derde casestudie in dit onderzoek over snelweguitbreiding met ondertunneling;
- Beslisboomanalyse met een kans-gevoeligheidsanalyse, waarbij kansen aan scenario's worden toegewezen. Zoals de casestudies over de vervanging van de Meppelerdiepsluis en de Ramspolbrug laten zien kan bij een kans-gevoeligheidsanalyse rekening worden gehouden met scheve kansverdelingen, dikke staarten (scenario's met kleine kansen) en meerdere onzekerheden.

Alleen in deze laatste vorm worden in de beslisboomanalyse kansen toegerekend aan scenario's.

In de casestudies in dit en het vorige onderzoek is telkens uitgegaan van een vaste discontovoet die geen rekening houdt met het verschil in risico tussen een flexibel en een niet-flexibel alternatief. In bijlage C wordt gedemonstreerd hoe kan worden gerekend met een aangepaste risico-opslag, zoals dit in klassieke reële optieliteratuur

wordt gedaan. Deze techniek wordt in deze bijlage ter vergelijking toegepast op de casestudie over de Ramspolbrug.

Beslisboomanalyse zoals hier gepresenteerd heeft voor- en nadelen ten opzichte van andere reële optiemethoden. In hoofdstuk 4 en bijlage D wordt een vergelijking van methoden gepresenteerd. In essentie verschillen de methoden niet: alle reële optiemethoden evalueren de waarde van flexibiliteit, werken met kansen, verwachte waarden van uitkomsten en nieuwe informatie. Ook leiden alle methoden latere beslissingen af op basis van eerder genomen beslissingen en de beschikbare informatie.

De kosten of baten van een investeringsproject kunnen samenhangen met onzekerheden en investeringskeuzes elders in hetzelfde netwerk. In bijlage E is voor de vervanging van de Ramspolbrug geïllustreerd hoe dit de reële optieanalyse zou kunnen beïnvloeden en hoe netwerkeffecten in een beslisboomanalyse kunnen worden meegenomen.

Een stapsgewijze toepassing van beslisboomanalyse wordt besproken in hoofdstuk 5.

Suggesties voor vervolgonderzoek

In deze en de vorige CPB-studie is beslisboomanalyse vooral toegepast op casussen waarvoor al MKBA's beschikbaar waren. Een logisch vervolg is om beslisboomanalyse toe te passen tijdens het opstellen van een nieuwe MKBA voor een nog te nemen projectbesluit.

In deze studie zijn de verschillende reële optiemethoden alleen kwalitatief vergeleken. Een logisch vervolg is meerdere reële optiemethoden toe te passen op een specifieke casus en de resultaten kwantitatief te vergelijken.

2 Waardering van opties met beslisboomanalyse

2.1 Inleiding

Een praktische methode voor het evalueren van reële opties is beslisboomanalyse, dat wil zeggen een analyse van investeringsbeslissingen op basis van een eenvoudige beslisboom met kansen voor de verschillende toekomstscenario's. In dit hoofdstuk wordt deze methode nader toegelicht. In hoofdstuk 4 wordt de methode vergeleken met andere reële optiemethoden.

Een eenvoudige beslisboom is een grafisch model om investeringsbeslissingen met verschillende opties voor flexibiliteit te analyseren (Boardman et al., 2006, hoofdstuk 7). Investeringsbeslissingen en toekomstscenario's zijn inputs om de beslisboom op te stellen. De beslisboom beschrijft in de vorm van knooppunten en takken de beslissingen die kunnen worden genomen, de verschillende mogelijke toekomstscenario's en de uitkomsten afhankelijk van deze beslissingen en toekomstscenario's.⁴ Door kansen toe te kennen aan de toekomstscenario's kan de verwachte waarde van elke beslissing, en daarmee de verwachte waarde van flexibiliteitsopties, worden bepaald.⁵

Voor een *grafische* beslisboomanalyse, die letterlijk op papier wordt uitgetekend, is het essentieel dat de beslisboom niet te complex wordt en niet te veel verschillende beslissingen en toekomstscenario's bevat. Vaak is het voor dit type analyse handig eerst een uitgebreide beslisboom te maken en deze vervolgens ten behoeve van de nadere analyse sterk te vereenvoudigen.

Een analyse op basis van een eenvoudige beslisboom met verschillende veronderstellingen over de kansen van verschillende toekomstscenario's is een algemeen toepasbare en toegankelijke reële optiemethodiek. Uitgaande van een MKBA waarbij verschillende investeringsalternatieven worden vergeleken voor meerdere toekomstscenario's, blijft het additionele rekenbeslag beperkt. Zo kan dus met beperkte inspanning rekening worden gehouden met de waarde van flexibiliteit.

In deze notitie wordt een onderscheid gemaakt tussen twee hoofdcategorieën van beslisboomanalyse:

⁴ In principe zijn er oneindig veel mogelijke toekomstscenario's. In een MKBA wordt meestal gebruik gemaakt van een paar specifieke toekomstscenario's. Deze kunnen worden opgevat als een (grove) discretisering van mogelijke toekomstige toestanden van de wereld.

⁵ In deze notitie gebruiken we subjectieve scenariokansen, priors genaamd in de Bayesiaanse literatuur. We scharen beslisboomanalyse, zoals gedefinieerd in deze notitie, daarbij onder reële optiemethoden.

- Beslisboomanalyse met één beslismoment (nu) en met meerdere toekomstscenario's (bijvoorbeeld meerdere scenario's over de ontwikkeling van verkeersstromen);
- Beslisboomanalyse met meerdere beslismomenten (nu en later) en met meerdere toekomstscenario's, waarbij daadwerkelijke ontwikkelingen over de tijd kunnen worden gevolgd (bijvoorbeeld werkelijke verkeersstromen).

De principes van beide soorten beslisboomanalyses worden in de volgende paragrafen nader toegelicht en met enkele getallenvoorbeelden geïllustreerd. Dit wordt nader uitgewerkt bij de casestudies. In hoofdstuk 4 wordt beslisboomanalyse vergeleken met andere reële optiemethoden.

2.2 Beslisboomanalyse met één beslismoment

In veel MKBA's van infrastructuur is sprake van één beslismoment: nu moet worden besloten over de verschillende investeringsalternatieven. Uitstel, fasering of aanvullende besluitvorming is in een later stadium niet mogelijk, niet realistisch of blijft gewoon buiten beschouwing.

In de beoordeling van de alternatieven wordt de rol van onzekerheid dan meestal meegenomen door een gevoeligheidsanalyse met verschillende scenario's en veronderstellingen. Beslisboomanalyse met een beslismoment kan deze analyse uitbreiden door rekening te houden met de kansverdeling achter de verschillende scenario's. Enkele voorbeelden kunnen dit illustreren.

Twee voorbeelden van beslisboomanalyse met 1 beslismoment bij twee scenario's

Tabel 2.1 geeft een getallenvoorbeeld met twee investeringsalternatieven, goedkoop en duur, met een laag en een hoog groeiscenario. Het goedkope investeringsalternatief is een no regret-alternatief, omdat het totaal van de netto baten onder beide scenario's groter is dan die van het dure alternatief. De beslissing is dan eenvoudig: het goedkope investeringsalternatief moet worden gekozen.

Tabel 2.1 Investeringskeuze met twee scenario's en no regret-alternatief, alle bedragen in (netto) contante waarde.

Alternatief	Scenario	Baten	Kosten	Netto baten	B/K-ratio	Spijt
Goedkoop	Laag	120	100	20	1,2	0
Goedkoop	Hoog	170	100	70	1,7	0
Duur	Laag	150	150	0	1,0	20
Duur	Hoog	190	150	40	1,3	30

Tabel 2.2 Investeringskeuze met twee scenario's zonder no regret-alternatief, alle bedragen in (netto) contante waarde.

Alternatief	Scenario	Baten	Kosten	Netto baten	B/K-ratio	Spijt
Goedkoop	Laag	120	100	20	1,2	0
Goedkoop	Hoog	100	100	0	1,0	50
Duur	Laag	130	150	-20	0,9	40
Duur	Hoog	200	150	50	1,3	0

Tabel 2.2 geeft een soortgelijk voorbeeld maar met andere baten. De keuze tussen het goedkope en dure alternatief is nu moeilijker. Is het belangrijker dat het goedkope alternatief het beter doet onder het lage scenario of dat het dure alternatief het beter doet onder het hoge scenario? Hoe moeten beide scenario's worden gewogen in de investeringsbeslissing?

Merk op dat tabel 2.1 en 2.2 een spijkolom bevatten. Deze kolom is handig om snel de aanwezigheid van een no regret- of low regret-alternatief te kunnen zien, zeker wanneer het aantal alternatieven en scenario's relatief groot is. Deze wordt verkregen door per scenario de beste optie te bepalen. In tabel 2.1 heeft de goedkoopste optie de hoogste netto contante waarde in beide scenario's. Je zult er dus geen spijt van krijgen ('no regret').⁶

Een simpele aanvullende veronderstelling bij bovenstaande tabel is dat de kans op beide scenario's gelijk is. De verwachte netto baten van het goedkope alternatief zijn dan: $0,5 \cdot 20 + 0,5 \cdot 0 = 10$. De verwachte netto baten van het dure alternatief zijn dan $0,5 \cdot -20 + 0,5 \cdot 50 = 15$. Bij deze veronderstelling gaat de voorkeur uit naar het dure alternatief.

Door andere veronderstellingen te maken over de kansen, bijvoorbeeld 80% versus 20% of 20% versus 80%, kan de gevoeligheid van deze investeringskeuze voor deze veronderstelling nader worden onderzocht.

In dit voorbeeld kan ook de break-evenkans worden berekend, dat wil zeggen de kansen op een laag en een hoog scenario, waarbij het goedkope en het dure investeringsalternatief precies dezelfde verwachte uitkomst hebben. Noem de kans op het lage scenario P . De kans op het hoge scenario is $1 - P$. De break-evenkans ('critical threshold') is dan: $P = 5/9$.⁷ Dit betekent dat als het hoge scenario waarschijnlijker wordt geacht dan $4/9$ het dure investeringsalternatief de voorkeur heeft. Anders heeft het goedkope alternatief de voorkeur.

In deze notitie wordt onderscheid gemaakt tussen drie manieren van beslisboomanalyse om met onzekerheid om te gaan:

⁶ Deze beslisregel staat in de wetenschappelijke literatuur bekend als 'minimax regret' en wordt hier toegepast om systematisch het bestaan van no regret-alternatieven te analyseren.

⁷ Deze kans volgt uit: $20P + (1-P) \cdot 0 = -20P + (1-P) \cdot 50$

1. Beslisboomanalyse met scenario's zonder kansen, waarbij alleen uitkomsten per tak van de beslisboom worden berekend;
2. Beslisboomanalyse met scenario's en break-evenkansen, waarbij wordt berekend wanneer een investering zinvol is zonder de toewijzing van specifieke scenariokansen;
3. Beslisboomanalyse met een kans-gevoeligheidsanalyse, waarbij kansen aan scenario's worden toegewezen.

Voordat kan worden gekeken welke van bovenstaande manieren van beslisboomanalyse het beste bij de situatie aansluit, moet eerst nauwkeuriger worden bekeken of er daadwerkelijk geen no regret-alternatieven zijn. Een analyse met twee scenario's is daarvoor soms te beperkt.

Alleen no regret als 'alle' scenario's zijn getest

De scenarioselectie kan misleidende informatie verschaffen over het bestaan van no regret-alternatieven. De no regret-conclusie kan voorbarig zijn als niet alle plausibele scenario's worden meegenomen. Het volgende voorbeeld illustreert dit.

Voorbeeld: stel dat er naast de beide scenario's uit het voorbeeld van tabel 2.1 ook een extra hoog scenario bestaat (zie tabel 2.3). Bij dit scenario heeft het goedkope investeringsalternatief niet de hoogste netto baten. Nadere inspectie van onderstaande tabel laat zien dat het goedkope investeringsalternatief niet langer een no regret-alternatief is. Algemene les hieruit is dat van een no regret-alternatief alleen sprake is als ook naar wat minder waarschijnlijke scenario's wordt gekeken⁸; volstaan met een gematigd laag en een gematigd hoog scenario is niet genoeg.

Tabel 2.3 Investeringskeuze met drie scenario's zonder no regret-alternatief, alle cijfers in (netto) contante waarde.

Alternatief	Scenario	Baten	Kosten	Netto baten	B/K-ratio	Spijt
Goedkoop	Laag	120	100	20	1,2	0
Goedkoop	Hoog	170	100	70	1,7	0
Goedkoop	Extra hoog	180	100	80	1,8	50
Duur	Laag	150	150	0	1,0	20
Duur	Hoog	190	150	40	1,3	30
Duur	Extra hoog	280	150	130	1,9	0

Drie verschillende kans-situaties

Door ook naar het extra hoge scenario te kijken is het bovenstaande voorbeeld omgeslagen van 'no regret' naar 'zonder no regret'. Om dan te kunnen kiezen tussen de verschillende alternatieven kan weer met kansen voor de verschillende scenario's worden gewerkt. Drie kans-situaties kunnen worden onderscheiden: volledige kans-

⁸ Bijvoorbeeld door na te denken over 'plausible high-end' scenario's bij de alternatiefkeuze voor waterkeringen.

onbekendheid, kans-zekerheid en onnauwkeurige kansen (Hogarth en Kunreuther, 1995).

Volledige kans-onbekendheid

Net als bij twee scenario's is een eenvoudige veronderstelling dat alle drie scenario's een gelijke kans hebben, dus elke $1/3$. Deze aanname wordt vaak gemaakt bij volledige kans-onbekendheid. Als bij deze veronderstelling de verwachte netto baten van het voorbeeld worden vergeleken, scoren het goedkope en het dure alternatief precies even goed. Deze situatie komt niet vaak voor. Het extra hoge scenario zal bijvoorbeeld vermoedelijk niet even waarschijnlijk zijn als het lage en het hoge scenario.

Kansen zijn bekend

Idealiter is er een situatie van volledige kans-bekendheid. In deze situatie is de onderliggende kansverdeling bekend en is het eenvoudig om discrete kansen aan de scenario's toe te wijzen. Ook deze situatie zal echter zelden worden aangetroffen voor onzekerheden bij investeringen in infrastructuur.

Onnauwkeurige kansen

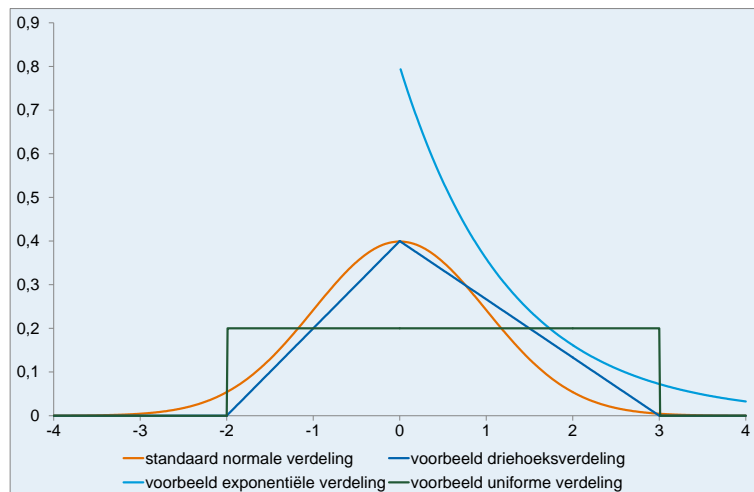
De meest relevante kans-situatie is daarom de situatie van onnauwkeurige kansen. Helaas is dit ook de meest lastige situatie. Bij onnauwkeurige kansen bestaat er enig gevoel over de waarschijnlijkheid van de verschillende scenario's maar ontbreken precieze kansen. De scenario's indelen in klassen van waarschijnlijkheid kan hierbij helpen; zie bijlage B. Voor het doel van beslisboomanalyse is het van belang om na te denken over mogelijk relevante types van continue kansverdelingen om onzekerheden te vertegenwoordigen. Daarbij kan een onderscheid worden gemaakt tussen:

- symmetrische verdelingen, bijvoorbeeld een normale verdeling;
- of asymmetrische verdelingen en eventuele 'dikke staarten', bijvoorbeeld bij extreme waarde-verdelingen.

Verder is het van belang of er natuurlijke onder- en bovengrenzen bestaan (bijvoorbeeld een driehoeksverdeling) of alleen een natuurlijke ondergrens (bijvoorbeeld een exponentiële verdeling).

Ook is het van belang of een midden-scenario het meest waarschijnlijke is (bijvoorbeeld bij een onderliggende normale verdeling) of het laagste scenario het meest waarschijnlijk is en de waarschijnlijkheid afneemt naarmate de scenario's extremer worden (bijvoorbeeld bij een exponentiële verdeling). Figuur 2.1 illustreert deze verschillen tussen kansverdelingen.

Figuur 2.1 Voorbeelden van kansverdelingen.



Bij onnauwkeurige kansen kan het gemiddelde en de standaarddeviatie van een kansverdeling soms worden geraamd op basis van historische gegevens, een steekproef of gegevens over vergelijkbare situaties, bijvoorbeeld van infrastructuur elders in Nederland of nationale gemiddeldes. In bijlage B wordt nadere toelichting gegeven over hoe dergelijke informatie kan worden gebruikt voor het toekennen van kansverdelingen aan toekomstscenario's.

Gevoeligheidsanalyse met verschillende kansen

Per definitie betekent kans-onzekerheid dat er onzekerheid over de kansverdeling zelf bestaat en over de parameters van de mogelijke verdeling. Daarnaast is een scenario-benadering een grove benadering van een continue kansverdeling. Verwachte netto baten zijn daarom altijd ruwe schattingen. Dit betekent niet dat deze schattingen onbruikbaar zijn, maar wel dat er met kans-onnauwkeurigheid rekening moet worden gehouden. Dit kan door middel van een gevoeligheidsanalyse op basis van verschillende veronderstellingen over de scenariokansen. In sommige gevallen zal de spreiding van de netto baten niet heel groot zijn. Ook zal kans-informatie in sommige gevallen de selectie van investeringsalternatieven niet beïnvloeden. In deze gevallen is kans-informatie niet doorslaggevend, maar is het wel noodzakelijk om een gevoeligheidsanalyse uit te voeren om tot deze conclusie te komen. Het is handig om te starten vanuit kans-onbekendheid, dat wil zeggen gelijke scenario-kansen, en vervolgens te experimenteren met andere kans-combinaties.

De analyse kan worden aangescherpt door de break-evenkansen te berekenen. Hierbij moet de contante waarde van de verwachte bruto baten van de optie (de som over de scenario's van kans maal verdisconteerde baten) groter zijn dan of gelijk zijn aan de kosten van de optie. Enkele cijferbeelden kunnen dit illustreren (zie tabel 2.4).

Tabel 2.4 Break-evenpunten voor verschillende prijzen van opties, kansen en baten; referentie is een investeringsproject van 100 miljoen euro.

Kosten van de optie	Kans op extra baat	Extra baat	Verwachte waarde optie
1	0,01	100	1
	0,05	20	1
	0,10	10	1
	0,20	5	1
10	0,01	1000	10
	0,05	200	10
	0,10	100	10
	0,20	50	10
50	0,01	5000	50
	0,05	1000	50
	0,10	500	50
	0,20	250	50

Stel we gaan uit van een infrastructuurproject van 100 miljoen euro. Een bepaalde vorm van extra flexibiliteit, bijvoorbeeld ruimtereservering voor een extra rijstrook, kost 10 miljoen euro extra. Deze uitbreidingsoptie is niet zo heel duur (10% van de investeringskosten van het basisalternatief) en wordt precies gecompenseerd (break-even) als de kans op een gunstige uitkomst 50% is en dit dan een besparing oplevert van 20 miljoen euro. Als de kans op een gunstige uitkomst lager is, bijvoorbeeld 20%, dan moet de minimale besparing hoger zijn, namelijk 50 miljoen euro. Als de kans op een gunstige uitkomst verder terug loopt, moet dit gecompenseerd worden door een steeds grotere besparing. Bijvoorbeeld bij 10% kans moet de besparing even groot zijn als het hele infrastructuurproject zonder extra flexibiliteit (100 miljoen euro).

Bij relatief goedkope opties kan verrassend snel quitte worden gedraaid, bijvoorbeeld als deze 1 miljoen euro kost (1% van de investeringskosten van het basisalternatief), de kans op de extra baten 20% is en de besparing 5 miljoen euro is. Zelfs bij een vrij kleine kans op extra baten, bijvoorbeeld 5%, kan deze optie rendabel zijn, nl. als de besparing minimaal 20 miljoen euro is. De omgekeerde situatie doet zich voor bij relatief dure opties, bijvoorbeeld bij een optie die 50 miljoen extra kost. Alleen bij een 'hoge' kans op extra baten (bijvoorbeeld 50%) gecombineerd met een 'zeer hoge' besparing (bijvoorbeeld minimaal 100 miljoen) zal dit een goede investering zijn.

Conclusie op basis van deze getallenvoorbeelden: juist bij relatief goedkope opties zijn er meer mogelijkheden om ten minste break-evenuitkomsten te verkrijgen. Opvallend hierbij is dat soms zelfs opties die een vrij lage kans op een gunstige uitkomst hebben (bijvoorbeeld 5 of 10%) rendabel kunnen zijn. Expliciete waardering van deze opties kan dan helpen om dit te verduidelijken.

Daarentegen is bij relatief dure opties vaak al direct duidelijk dat dit geen goede investering zal zijn. Alleen bij een relatief hoge kans op een gunstige uitkomst en een hoge besparing of bij een wat lagere kans en een zeer hoge besparing zal dit zo zijn.

Meer nauwkeurige waardering van dergelijke opties zal daarom bij –in relatieve zinnige opties in veel gevallen weinig informatie toevoegen.

Een aantrekkelijke optie is vaak uitstel of fasering van een infrastructuurproject. Dit verlaagt de contante waarde van de kosten en vermindert in veel mindere mate de contante waarde van de baten wanneer deze verder in de toekomst liggen.

Waardering van deze opties is daarom niet altijd nodig, omdat op basis van verschillende scenario's en gevoeligheidsanalyses duidelijk kan zijn dat uitstel of fasering een no regret-alternatief is. Als daarentegen de optie gepaard gaat met verlies van baten op korte termijn, bijvoorbeeld wanneer uitstel al in de nabije toekomst resulteert in een grote toename van (verwachte) schade of reistijdverliezen, dan is uitstel in veel gevallen geen aantrekkelijke optie.

Grafische weergave van een beslisboom met één beslismoment

Het toevoegen van kansen in de tabellen van de gevoeligheidsanalyse wordt al snel onoverzichtelijk. Dit kan worden opgelost door de informatie samen te vatten in een beslisboom. Figuur 2.2 demonstreert hoe dit werkt voor tabel 2.2, waarin de kansen P en $1 - P$ zijn toegekend aan respectievelijk het hoge en het lage scenario. De beslissing wordt eerst weergegeven, de keuze tussen het dure en het goedkope alternatief, gevolgd door de scenario's (hoog of laag), gevolgd door de mogelijke uitkomsten.

De verwachte NCW (netto contante waarde van de kosten en baten) van het goedkope alternatief, die hier Y is genoemd, volgt uit de som van kans maal scenario-uitkomst, formeel betekent dat:

$E(NCW(X, S)) = PA + (1 - P)B$, waarin S de set is van het hoge en het lage scenario.

De verwachte NCW van alternatief Y is:

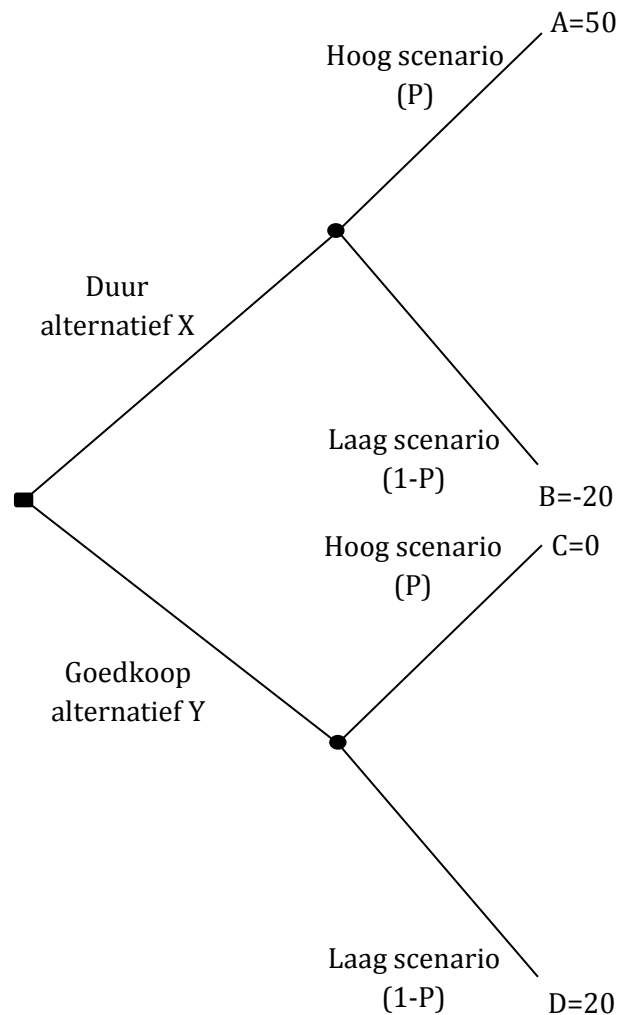
$$E(NCW(Y, S)) = PC + (1 - P)D$$

De investering met de hoogste verwachte NCW wordt gegeven door:

$$\arg \max_{X, Y} \{E(NCW(X, S)), E(NCW(Y, S))\}$$

Dit voorbeeld bevat slechts twee toekomstscenario's. Voor een MKBA die is gebaseerd op verwachte NCW's kan het zinvol zijn om ook minder waarschijnlijke scenario's te introduceren. Als filelengte bijvoorbeeld exponentieel toeneemt in verkeersintensiteit, dan heeft een relatief grote onderschatting van de ontwikkeling in de verkeersintensiteit tijdens de spitsuren veel meer gevolgen voor reistijdverliezen dan een kleine onderschatting. Zelfs als de kans op een relatief grote verkeerstoename niet erg groot wordt geacht, kan deze daarom toch een belangrijke bijdrage leveren aan de verwachte baten van een wegenbouwproject.

Figuur 2.2 Beslisboomanalyse met één beslismoment, twee project alternatieven en twee toekomstscenario's.



2.3 Beslisboomanalyse met meerdere beslismomenten

De beslisboomanalyse in de vorige sectie heeft maar één beslismoment (nu). Voor besluitvorming onder onzekerheid is dit niet altijd een geschikte aanname. Als uitstel of fasering zonder veel extra kosten mogelijk is, dan is dit meestal een aantrekkelijk alternatief. Dit komt doordat investeringskosten vooral in de beginfase van een project geconcentreerd zijn en de baten met vertraging en met oploop in de tijd worden gerealiseerd. Uitstel met 5 of 10 jaar bespaart dan relatief veel op de kosten en heeft relatief weinig effect op de baten. Een bijkomend voordeel is dat door uitstel nieuwe informatie beschikbaar komt; dit kan ook een zelfstandige bron zijn van betere investeringsbeslissingen. De volgende 2 voorbeelden illustreren dit.

Twee voorbeelden met uitstel en nieuwe informatie

In beide gevallen gaan we uit van het eerdere voorbeeld van twee projectalternatieven die bij twee scenario's een duidelijke no regret-alternatief laten zien. De mogelijkheid van uitstel wordt nu echter ook beschouwd.

Tabel 2.5 Investeringskeuze met twee scenario's, met uitstel mogelijk, alle bedragen in (netto) contante waarde en mln euro.

Alternatief	Scenario	Baten	Kosten	Netto baten	B/K-ratio
Goedkoop	Laag	120	100	20	1,2
Goedkoop	Hoog	170	100	70	1,7
Uitstel goedkoop	Laag	110	75	35	1,5
Uitstel goedkoop	Hoog	155	75	80	2,1
Duur	Laag	150	150	0	1,0
Duur	Hoog	190	150	40	1,3
Uitstel duur	Laag	140	110	30	1,3
Uitstel duur	Hoog	175	110	65	1,6

In bovenstaande tabel is de mogelijkheid van uitstel van de investeringskeuze (goedkoop of duur) met vijf jaar toegevoegd. Als we nu voor eenvoud aannemen dat bij uitstel geen betere informatie beschikbaar komt, dan zorgt uitstel desalniettemin voor een daling van de kosten, met ongeveer een kwart.⁹ Als de projectbaten verder in de toekomst liggen, dan zal het batentotaal veel minder hard dalen dan de kosten door uitstel; in het voorbeeld dalen deze met ongeveer een tiende. Het rendement van zowel het goedkope als het dure alternatief verbeteren door het uitstel onder beide scenario's (laag en hoog). Uitstel van het goedkope alternatief is dan het nieuwe no regret-alternatief. Als ook rekening wordt gehouden met de baten van nieuwe informatie zouden beide uitstel-varianten overigens nog beter scoren.

In het tweede voorbeeld (zie onderstaande tabel) veronderstellen we dat uitstel onmogelijk is. Wel kan het dure alternatief zo worden uitgevoerd dat deze later aan te passen is tegen relatief lage meerkosten. Als deze aanpassingsoptie buiten beschouwing wordt gelaten is het goedkope alternatief in onderstaande tabel een no regret-alternatief. Wordt de mogelijkheid van aanpassing wel meegenomen, dan wordt het dure aanpasbare alternatief een stuk aantrekkelijker: de netto baten bij het hoge scenario verbeteren van 40 naar 110 miljoen euro. Deze netto baten bij het hoge scenario zijn nu aanzienlijk hoger dan de 70 miljoen euro van het goedkope alternatief en gevolg is dat het goedkope alternatief niet meer een no regret-alternatief is.

Uitgaande van gelijke scenariokansen zijn de netto baten van het goedkope alternatief 45 miljoen euro en verbeteren die van het dure aanpasbare alternatief van 20 miljoen euro naar 55 miljoen euro. Dit betekent dat als deze veronderstelling

⁹ Bij een discontovoet van 5,5% dalen investeringskosten direct aan het begin van het project door uitstel met 5 jaar met ongeveer een kwart; bij uitstel met 10 jaar loopt dit op tot de helft.

plausibel is, het dure alternatief met aanpassingsoptie de voorkeur verdient boven het goedkope alternatief door de baten onder het hoge scenario.

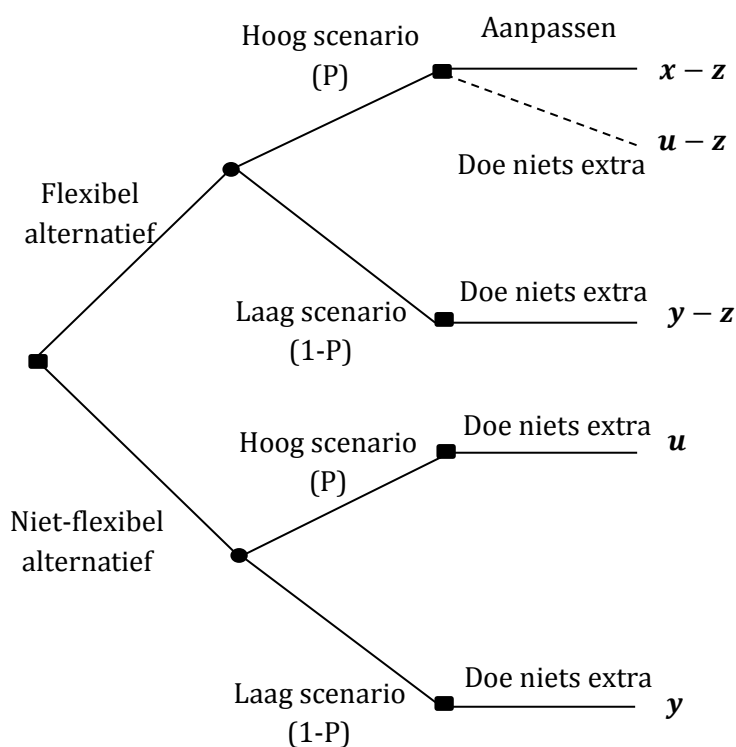
Tabel 2.6 Investeringskeuze met twee scenario's en no regret-alternatief, alle bedragen in (netto) contante waarde en mln euro.

Alternatief	Scenario	Aanpassen	Baten	Kosten	Netto baten	B/K-ratio
Goedkoop	Laag	Nee	120	100	20	1,2
Goedkoop	Hoog	Nee	170	100	70	1,7
Duur	Laag	Nee	150	150	0	1,0
Duur	Hoog	Nee	190	150	40	1,3
Duur aanpasbaar	Laag	Nee	150	150	0	1,0
Duur aanpasbaar	Hoog	Ja	270	160	110	1,7

Beslisboomanalyse met twee beslismomenten

Figuur 2.3 illustreert hoe investeringsstrategieën met meer dan een beslismoment kunnen worden geanalyseerd met een beslisboom. De beslisboom bevat twee investeringsalternatieven, twee toekomstscenario's met kansen en de mogelijke uitkomsten. De beslisboom heeft bovendien een tweede beslissingsmoment. In bijlage A is een meer technische bespreking van bovenstaande beslisboom met break-evenanalyse opgenomen. Deze is niet nodig voor het begrip van de casestudies in het volgende hoofdstuk, maar voorziet in een meer algemene beschrijving van de beslisboommethodiek met break-evenanalyse.

Figuur 2.3 Beslisboomanalyse met twee beslissingsmomenten, twee project alternatieven en twee toekomstscenario's.



2.4 Conclusies beslisboommethode

In een beslisboomanalyse kan op verschillende manieren met risico's of onzekerheid worden omgegaan. De analyse kan worden uitgevoerd zonder toewijzing van scenariokansen (door gewoon naar de resultaten voor de verschillende takken te kijken), als break-evenanalyse of door middel van de expliciete toewijzing van verschillende sets van scenariokansen.

De beslisboom kan daarnaast worden gemaakt met een of meer beslismomenten. Bij een beslismoment bestaat de toegevoegde waarde bij de expliciete toewijzing van scenariokansen uit de berekening van verwachte waarden van uitkomsten van verschillende investeringsalternatieven. Voor de analyse van flexibiliteit, zoals opties van uitstel of fasering, is echter een beslisboom met minimaal twee beslismomenten nodig.

3 Drie casestudies

3.1 Inleiding

In de vorige reële optiestudie van het CPB¹⁰ is al een aantal Nederlandse casestudies besproken. In deze notitie wordt voor drie nieuwe casestudies gekeken hoe de reële optiebenadering praktisch het beste kan worden toegepast:

- Vervanging van de Meppelerdiepkeersluis (paragraaf 3.2);
- Vervanging van de Ramspolbrug (paragraaf 3.3);
- Uitbreiding van een snelweg met ondertunneling (paragraaf 3.4).

In tegenstelling tot de eerdere casestudies gaat het bij de eerste twee casestudies niet om mogelijke nieuwe investeringsprojecten, maar om investeringsprojecten uit het verleden. Voor deze projecten is de besluitvormingsfase achter de rug en is de uitvoeringsfase begonnen (Meppelerdiepsluis) of al afgerond (Ramspolbrug). Daarnaast is gekozen voor een fictief voorbeeld met een grote algemene en praktische relevantie: uitbreiding van de wegcapaciteit in stedelijk gebied. Bij deze casussen zitten verschillende soorten van infrastructuur (sluis, brug, wegen en tunnel) en diverse vormen van flexibiliteit (investeringsuitstel, verhoging, verbreding).

Bij de casestudies gaan we uit van het stappenplan voor reële optieanalyse in hoofdstuk 5 en laten verschillende manieren van toepassing zien. De eerste casestudie over de Meppelerdiepsluis wordt uitgevoerd zonder en met een kansgevoeligheidsanalyse. De tweede casestudie over de vervanging van de Ramspolbrug wordt ook uitgevoerd zonder en met kansgevoeligheidsanalyse. De derde en laatste casestudie wordt uitgevoerd met een break-evenanalyse.

Deze casestudies hebben als doel de inzichten over evaluatie en waardering van reële opties door middel van beslisboomanalyse te verdiepen en te illustreren. De keuzemogelijkheden bij de verschillende investeringsprojecten worden vereenvoudigd weergegeven.

In de bijlages wordt daarnaast ingegaan op meer technische aspecten van beslisboomanalyse: de werking van break-evenanalyse (bijlage A), het al dan niet toewijzen van kansen aan scenario's voor een beslisboomanalyse (bijlage B), de afleiding van risico-aangepaste discontovoeten (bijlage C), een toelichting op de bruikbaarheid van verschillende reële optiemethoden (bijlage D) en het omgaan met netwerkeffecten in een beslisboom (bijlage E).

¹⁰ Zie Bos en Zwaneveld (2014); tabel 2.3 op p. 28 en bijlage 1 op pp. 70-77.

3.2 Vervanging Meppelerdiepsluis

3.2.1 Schets van het probleem

De Meppelerdiepsluis behoort tot de primaire waterkeringen en ligt in Zwartsluis. Het is een keersluis uit 1958. Deze moet het water keren bij te hoge of te lage waterstanden op het Zwarte Water of het Meppelerdiep. Het is daardoor gemiddeld 16 dagen per jaar dicht. De scheepvaart van en naar Meppel en de omliggende regio is dan volledig gestremd. Op andere dagen, dus vrijwel het gehele jaar, staat de keersluis open en kan scheepvaart ongehinderd in- en uitvaren.

Figuur 3.1 Het Meppelerdiep verbindt Meppel met het Zwarte Water die in verbinding staat met het Ketel- en IJsselmeer. De Meppelerdiepsluis bevindt zich in Zwartsluis.



Het Meppelerdiep wordt gebruikt voor containervervoer, bulkvervoer (zoals landbouwproducten, veevoeder, zand, grind en metaal voor recycling), vervoer van en naar de scheepswerven in Meppel en voor recreatievaart. In 2006 was het aantal passages van binnenvaartschepen ruim 5000; het vervoerde gewicht was 2 miljoen ton. Voor de recreatievaart is het belangrijk omdat het een verbinding is van de Friese meren met het IJsselmeer. In 2006 bedroeg het aantal passages van recreatievaartuigen 36 duizend; dit is sterk geconcentreerd in de zomermaanden.

Voor vervanging van de Meppelerdiepsluis worden drie hoofdredenen genoemd in de diverse studies over de ombouw van de sluis (zie bijvoorbeeld RWS, 2008):

- De keersluis voldoet niet meer aan de veiligheidseisen uit de Wet op de waterkering;
- Door de stremming van gemiddeld 16 dagen per jaar (ruim 4% van het jaar) wordt niet voldaan aan het streefbeeld dat hoofdvaarwegen minimaal 98,5% van de tijd beschikbaar moeten zijn. Ook is de verwachting dat het totale aantal

stremmingsdagen zal toenemen, mede door de effecten van klimaatverandering op de waterstanden. De omvang en onvoorspelbaarheid van het optreden van stremming zorgt voor economische schade;

- De huidige keersluis voldoet wat betreft dimensionering niet aan de vaarwegeisen. Het Meppelerdiep is geen hoofdtransportas¹¹ maar een zogenaamde overige hoofdvaarweg. In de Structuurvisie Infrastructuur en Ruimte (IenM, 2012; p.120) is het streefbeeld voor dergelijke hoofdvaarwegen om deze geschikt te maken voor schepen van minimaal klasse IV en 3-laags containervaart. De huidige keersluis is echter gebouwd voor scheepvaartklasse III en voldoet qua doorvaartbreedte en drempeldiepte niet aan het streefbeeld. Dit is een belemmering voor de beroepsvaart en de recreatievaart. Ook is het krappe huidige sluishoofd een knelpunt voor de ontwikkelingsmogelijkheden van scheepsbouw- en scheepsreparatiebedrijven.

3.2.2 Vergelijking van alternatieven zonder reële optieanalyse

Om aan de waterveiligheidseisen te voldoen is uitstel van investering niet mogelijk. Gegeven deze wettelijke randvoorwaarden is het alleen zinvol om uitstel te bestuderen, wanneer de economische efficiëntie van de waterveiligheidsnormen zelf ter discussie staat. Dat is bij deze casestudie niet het geval.

Het nulalternatief is dat de keersluis gehandhaafd blijft, maar dat de waterveiligheid direct wordt vergroot door een extra stel vloeddeuren. Het optreden van stremmingen kan worden opgelost door een schutsluis; deze zorgt ervoor dat schepen het hele jaar het Meppelerdiep kunnen passeren. Deze schutsluis komt in plaats van de huidige keersluis en daarbij zijn diverse projectalternatieven onderzocht. Onderstaande tabel bevat drie van deze projectalternatieven, genaamd M3, M6 en M6A.

Er zijn daarnaast andere alternatieven onderzocht met andere afmetingen en eventueel een ander sluishoofd. Ook is een vergelijking gemaakt met een keersluis met een grotere breedte en diepte. Daarnaast zijn mogelijkheden voor het reduceren van de stremmingen, zoals aanpassing van het peilbeheer van het Meppelerdiep, een ander sluitingsregime van de balgstuw bij Ramspol en verhoging van het IJsselmeer, bekeken. Op basis van verkenningen is echter ingeschat dat dergelijke oplossingen te duur of te weinig oplossend zijn; zie RWS (2008; p. 11). Omdat de beschouwing van flexibiliteit hieraan weinig of niets verandert nemen we deze mogelijkheden niet mee in onderstaande bespreking.

¹¹ Een hoofdtransportas is een grensoverschrijdend transport van en naar Nederlandse zeehavens van minimaal 5 miljoen ton of 10 duizend containers per jaar. Een overige hoofdvaarweg is een nationale vaarweg die provincies met elkaar verbindt en waarbij het vervoer minimaal 5 miljoen ton of 10 duizend containers per jaar is. Voor de Nederlandse binnenvaart is de Waal veruit het belangrijkste; hierover gaat ongeveer de helft van het Nederlandse binnenvaartvervoer; de rest gaat over andere hoofdtransportassen en overige vaarwegen, zoals de vaarweg IJsselmeer-Ramspol-Meppelerdiep.

Tabel 3.1 Kosten en baten van drie projectalternatieven in vergelijking met het nulalternatief Handhaven keersluis maar met extra stel vloeddeuren.

	M3	M6	M6A
Keersluis of schutsluis? (nu keersluis)	S	S	S
Vaarwegklasse (nu III)	III	Va	Va
Kosten	15,6	23,4	27,6
investerings	17,3	23,5	26,9
beheer en onderhoud	2,3	3,9	4,7
vermeden investeringen waterkering	-4	-4	-4
Baten			
vermeden financiële schade stremmingen keersluis	9,9	9,9	9,9
efficiency effecten door bredere en diepere doorvaart	0	0,6	0,6
minder emissies als meer vervoer via binnenvaart i.p.v. weg	0,4	0,8	0,8
minder geluid, betere verkeersveiligheid en minder onderhoud elders	1,1	1,0	1,0
veiligheid en risico op extra veiligheidskosten	0	0	+
zichtverlies omwonenden	---	--	-
Totaal baten gemonetariseerd	11,4	12,3	12,3
KBA saldo gemonetariseerd (lage groei, max containervaart)	-4,2	-11,1	-15,3
Alternatieve KBA saldi gemonetariseerd			
hoge groei, max container	-1,1	-7,6	-11,8
hoge groei, min container	-5,5	-12,3	-16,5
lage groei, min container	-7,0	-13,9	-18,1
alle vier scenario's gelijke kans (0,25)	-4,5	-11,2	-15,4

Toelichting op de projectalternatieven:

- M3: een schutsluis met een doorvaartbreedte van 13,5 m, handhaven huidige keersluis en buitensluishoofd, kadehoogte NAP +2,5 m;
- M6: een schutsluis met een doorvaartbreedte van 20,5 m, vervangen keersluis, buitensluishoofd en brug, kadehoogte NAP + 1,8m, enkele waterkering;
- M6A als M6 maar kadehoogte NAP + 1,4m en dubbele waterkering.

De kosten en baten van de drie projectalternatieven zijn samengevat in tabel 3.1.

Naast gemonetariseerde baten zijn er ook twee niet-gemonetariseerde batenposten: veiligheid en zichtverlies. De extra kosten van een schutsluis zijn aanzienlijk, minimaal 15,6 mln euro en maximaal 27,6 mln euro. De belangrijkste baten van een schutsluis (M3, M6, M6A) ten opzichte van een keersluis (het nulalternatief K0) betreffen de vermeden schade door stremmingen. Deze baat is 9,9 miljoen euro en is niet afhankelijk van het type schutsluis en ook niet van het scheepsvervoer-scenario. Drie andere baten zijn ook gemonetariseerd:

- Efficiency effecten door bredere en diepere doorvaart (alleen van belang voor de grotere schutsluisvarianten M6 en M6A);
- Minder emissies door meer vervoer door binnenvaart in plaats van vervoer over de weg;
- Diverse andere baten, nl. minder geluid, betere verkeersveiligheid en minder onderhoud elders.

Deze baten zijn echter beperkt (2-4 mln euro) in vergelijking met de extra kosten en met de baten door minder stremmingen. Uitgaande van het gemonetariseerde saldo is daarom de conclusie dat handhaving van de keersluis (het nulalternatief) het meest rendabel is. De drie schutsluis-alternatieven hebben in vergelijking met dit alternatief een negatief saldo variërend van -4,2 mln euro tot -15,3 mln euro. Gevoeligheidsanalyse met andere groeiscenario's voor vervoer verkleinen of vergroten dit verschil (zie onderaan tabel 3.1), maar de conclusie blijft dat het nulalternatief het meest rendabel is, als de niet-gemonetariseerde batenposten buiten beschouwing worden gelaten.

De drie schutsluisvarianten kunnen ook onderling worden vergeleken. Bij alle vier vervoersscenario's is de conclusie dat projectalternatief M6A van de drie schutsluisvarianten het minst rendabel is. Dit project alternatief scoort wel het beste op twee niet-gemonetariseerde baten: veiligheid en minder zichtverlies voor omwonenden. Dit is de variant die uiteindelijk is gekozen en die nu wordt gerealiseerd.

Uitgangspunt van deze analyses is dat de stremming bij een keersluis in de toekomst in beperkte mate toeneemt, nl. van de huidige 16 dagen naar 20 dagen. Extra veiligheidseisen of andere inzichten over de toekomstige kans op laag en hoog water kunnen de verwachte kans op stremmingen echter sterk doen toenemen. In 2008 overwoog het waterschap om de keersluis vaker te laten sluiten om de veiligheid tegen overstromen te vergroten. Door klimaatverandering zal de sluitingsfrequentie verder toenemen, maar het is onzeker met hoeveel. Vandaar dat aanvullende MKBA-analyses voor de Meppelerdiepsluis zijn verricht voor een aantal scenario's met meer stremmingdagen.

Het meest extreme scenario dat is meegenomen in de aanvullende analyse is 80 stremmingdagen per jaar, waarvan 20 dagen door toename laag water dat in 40 jaar terugloopt naar 0 dagen. Deze alternatieve stremmingsscenario's hebben grote invloed op de stremmingsschade en dit is veruit grootste post van de baten van de schutsluis-varianten.¹² In sommige scenario's wordt een schutsluis dan een rendabele investering (Bozuwa, 2007). Dit betekent dat het handhaven van de keersluis (het nulalternatief) geen no regret-alternatief meer is. Voor de vergelijking van de verschillende schutsluisvarianten onderling maken de stremmingsscenario's niet uit, aangezien ze allemaal (en in dezelfde mate) de stremming oplossen.

3.2.3 Vergelijking van alternatieven met reële optieanalyse

Reële optieanalyse heeft alleen meerwaarde als de spreiding van de mogelijke uitkomsten voldoende groot is. Alle onzekerheden die niet bijdragen aan deze spreiding kunnen buiten beschouwing blijven.

¹² Bij deze berekeningen is er van uitgegaan dat de schade lineair toeneemt met het aantal stremmingdagen; baten van beperking van het overstromingsrisico zijn niet meegenomen.

In het geval van de Meppelerdiepsluis is de onzekerheid van het vervoersscenario niet relevant voor de spreiding van de uitkomsten, maar kan de onzekerheid van de omvang van de stremmingen de resultaten wel sterk beïnvloeden (zie Bozuwa, 2007; p. 5). Deze onzekerheid heeft alleen invloed op de keuze wel of geen schutsluis en maakt geen verschil voor de keuze tussen de verschillende schutsluisvarianten. De onderstaande reële optieanalyse voor de Meppelerdiepsluis beschouwt daarom alleen de onzekerheid van de stremmingen en de invloed die deze heeft op de keuze tussen handhaven van de keersluis (het nulalternatief) en de schutsluisvariant M3, die bij de MKBA het minst negatief scoorde. Bij behoud van de keersluis bestaat de (reële) optie om de keersluis later alsnog om te bouwen tot schutsluis.

Tabel 3.2 Verwachte schade per stremmingsscenario.

Stremmingsscenario	Contante waarde lineair oplopende schade	Contante waarde niet-lineair oplopende schade
	mIn euro	mIn euro
A: 20 dagen / jaar	9,9	9,9
B: 28 dagen / jaar	14,0	20,0
C: 40 dagen / jaar	20,0	40,0
D: 60 dagen / jaar	28,0	90,0

In tabel 3.2 wordt de stremmingsschade volgens vier scenario's gepresenteerd bij investering in het nulalternatief zonder latere ombouw tot schutsluis.¹³ Veronderstelling bij de gevoeligheidsanalyse in de MKBA is dat de schade lineair toeneemt met het aantal stremmingdagen. Het zou kunnen dat een niet-lineaire relatie realistischer is: toename van het gemiddelde aantal stremmingdagen zou bijvoorbeeld tot extra schade kunnen leiden, doordat het aantal meerdaagse stremmingen sneller toeneemt dan het gemiddelde aantal stremmingdagen. Lange stremmingen hebben op korte termijn bovendien meer dan evenredige kosten dan korte verstoringen. Niet-lineaire schadecijfers zijn daarom toegevoegd aan de oorspronkelijke schaderamingen. We komen na het opstellen van de beslisboom in meer detail terug op het belang en de onderliggende oorzaken van niet-lineaire schade.

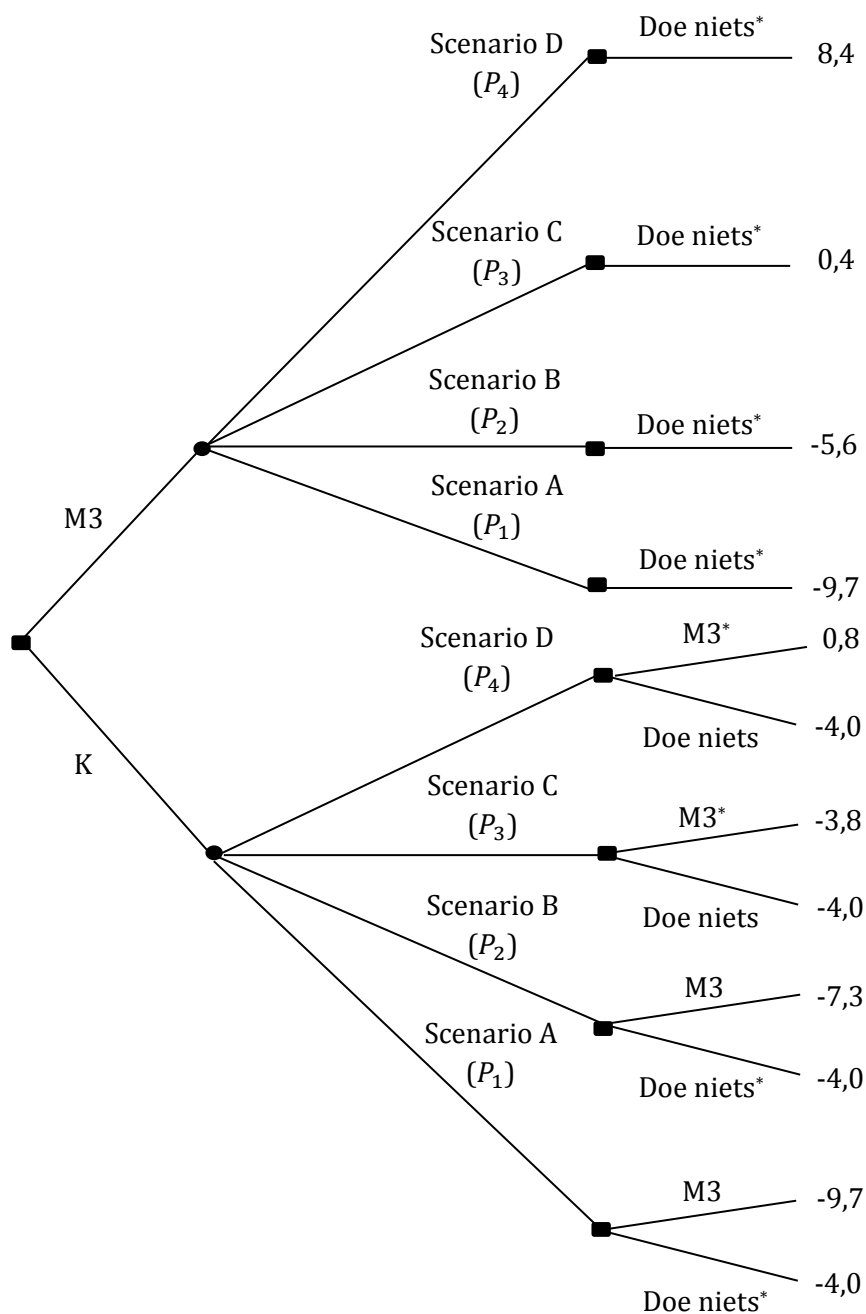
We gaan voor de beslisboomanalyse uit van twee beslismomenten:

- Nu (2013) moet ten behoeve van de waterveiligheid worden besloten of de keersluis (K) blijft gehandhaafd samen met de constructie van extra vloeddeuren of dat direct een schutsluis wordt gebouwd (M3);
- 10 jaar later kan alsnog worden besloten de keersluis om te bouwen tot een schutsluis; dit is met name verstandig als de stremmingen sterk zijn opgelopen. We veronderstellen dat na 10 jaar *nieuwe informatie* beschikbaar (dat wil zeggen

¹³ In de gevoeligheidsanalyse zijn in totaal 8 scenario's onderscheiden.

de observaties van het werkelijke aantal stremmingen) is gekomen en dat daardoor duidelijk is welk stremmingsscenario van toepassing is.

Figuur 3.2 Beslisboom Meppelerdiepsluis met scenario's en netto baten per scenario bij lineaire stremmingsschade.



In figuur 3.2 wordt de beslisboom met scenario's en de netto baten¹⁴ per scenario weergegeven voor de lineaire schadecijfers. Wanneer in de schutsluis (M3)

¹⁴ De netto baten zijn de som van de vermeden stremmingsschade, minus de investeringskosten in 2013, de verdisconteerde investeringskosten in 2023 en de jaarlijkse beheerkosten (verdisconteerd). Het nulalternatief

wordt geïnvesteerd heeft deze positieve netto baten bij de hoge stremmingsscenario's (C: 40 dagen per jaar en D: 60 dagen per jaar). Wanneer wordt gekozen voor het nulalternatief en na 10 jaar wordt besloten om in het geval van veel stremmingen deze alsnog om te bouwen tot een schutsluis (M3), dan geeft dit alleen positieve netto baten bij het hoogste stremmingsscenario D. In tegenstelling tot de originele MKBA (waarbij werd uitgegaan van stremmingsscenario A) is het nu op het oog niet onmiddellijk duidelijk wat de beste investeringsbeslissing is: schutsluis M3 doet het beter onder scenario's C en D, terwijl direct investeren in de keersluis het beter doet onder scenario's A en B.

Merk op dat een beslisboom, zoals die van de Meppelerdiepsluis in figuur 3.2, doorgaans de *gemonetariseerde* baten van de MKBA en gevoeligheidsanalyse bevat. Na toepassing van de beslisboommethodiek moeten posten die niet zijn gemonetariseerd, in dit geval veiligheid en zichtverlies, niet worden vergeten bij de uiteindelijke beoordeling van de alternatieven.

De optimale keuze is nu afhankelijk van de kansen van de verschillende stremmingsscenario's en de stremmingsschade per scenario. De netto baten van de investeringsalternatieven (j) zijn gelijk aan de som van scenario's (P_i) maal uitkomst ($W_j^*(s_i)$) gegeven de optimale investering in 2023 en een stremmingsscenario, hieronder aangeduid met s_i . De scenario-afhankelijke investering in 2023 is aangegeven met een (*) in Figuur 3.2. Voor investering in alternatief K is de verwachte Netto Contante Waarde gelijk aan:

$$E(NCW_K) = \sum_{i=1}^N P_i W_K^*(s_i)$$

En idem voor investering in optie M3:

$$E(NCW_M) = \sum_{i=1}^N P_i W_{M3}^*(s_i)$$

De optimale keuze voor K of M3 in 2013 volgt uit:

$$\max_{\{K, M3\}} \{E(NCW_K), E(NCW_M)\}$$

Onderstaande tabel vat de casus samen. Hierbij worden de resultaten weergegeven bij de veronderstelling van lineaire baten en bij niet-lineaire baten. Ook onderscheiden we drie verschillende kansverdelingen. De uniforme kansverdeling met gelijke kansen voor elk scenario is voor deze casus een extreme veronderstelling. Deze verdeling is toegevoegd om later de bovengrens van de waarde van de

van handhaving van de huidige keersluis maar met de extra vloeddeuren kost 4 miljoen euro; voor deze variant zijn geen beheerkosten verondersteld. Ook zijn de stremmingbaten onder elk scenario voor de referentievariant zonder investering in 2023 gelijk aan nul. Verder zijn de vermeden stremmingsschade in alle andere gevallen vereenvoudigd op basis van constante jaarlijkse vermeden schades.

aanpassingsoptie te illustreren. Uniforme kansen worden normaliter alleen aangenomen bij volledige kans-onbekendheid (zie hoofdstuk 2). Daarvan is hier geen sprake. De andere twee onderliggende kansverdelingen, scheef met wel of geen dikke staart, zijn meer plausibel.

Tabel 3.3 Stremmingskansen en netto baten voor de keersluisvariant (K) en de schutsluisvariant (M) bij 2 beslismomenten.

Stremmingsscenario	Kansverdeling uniform	Scheef en dikke staart	Scheef en geen dikke staart
A: 20 dagen / jaar	0,25	0,50	0,60
B: 28 dagen / jaar	0,25	0,35	0,30
C: 40 dagen / jaar	0,25	0,10	0,10
D: 60 dagen / jaar	0,25	0,05	0,00
$E(NCW_K)$: lineair	-2,8	-3,7	-4,0
$E(NCW_M)$: lineair	-1,6	-6,4	-7,5
Vershil M t.o.v. K	1,2	-2,7	-3,5
$E(NCW_K)$: niet-lineair	9,2	-0,8	-2,8
$E(NCW_M)$: niet-lineair	20,4	0,9	-3,7
Vershil M t.o.v. K	11,2	1,7	-0,9

Lineaire of niet-lineaire schade?

De reële optieanalyse van deze casestudie laat zien dat de uitkomsten gevoelig zijn voor de functionele vorm van de schadefunctie. Minder waarschijnlijke scenario's drukken hard op de verwachte Netto Contante Waarde wanneer de veranderingen van de baten onder deze scenario's aanzienlijk groter zijn dan onder de meer gangbare scenario's. Het is daarom belangrijk om goed na te denken over de vraag of de vermeden schade zich lineair of niet-lineair gedraagt.

In een gevoeligheidsanalyse van het aantal stremmingsdagen, die is uitgevoerd in aanvulling op de MKBA van de Meppelerdiepsluis, is uitgegaan van schade die lineair toeneemt met het aantal stremmingsdagen (Bozuwa, 2007). Maar deze conclusie ligt niet voor de hand wanneer wordt gekeken naar de onderliggende kansverdeling van de stremmingsdagen en de relatie met de kosten van de stremming:

- Een groter aantal gemiddelde stremmingsdagen per jaar veroorzaakt namelijk een meer dan evenredige toename in het aantal lange verstoringen, dat wil zeggen verstoringen van meer dan 2 dagen.
- De kosten van stremming kunnen meer dan evenredig toenemen met het aantal stremmingsdagen.

Ter illustratie: als ervan uit wordt gegaan dat stremmingsgebeurtenissen onafhankelijk van elkaar optreden (een zogenaamd Poisson proces), dan neemt de kans op een lange verstoring (> 2 dagen) sterk toe met het aantal stremmingen. In het

basisscenario is bij deze aanname de jaarlijkse kans op meer dan 2 dagen verstoring nog geen 2%; bij het hoogste stremmingsscenario neemt dit toe tot 57%.¹⁵

De aanname van onafhankelijke stremmingsgebeurtenissen in bovenstaand rekenvoorbeeld onderschat echter de kans op lange stremmingen. Stremmingen worden veroorzaakt door opstuwing en het kan even duren voordat de waterstanden in het watersysteem zijn hersteld na een periode van hoog water. Als de aanname van onafhankelijke stremmingen wordt losgelaten, neemt de kans op lange verstoringen nog meer toe dan het rekenvoorbeeld aangeeft, zeker in jaren met relatief veel stremmingsdagen.

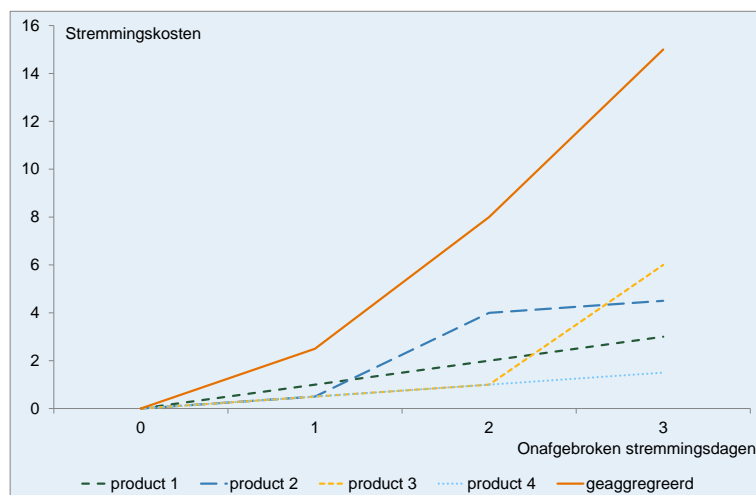
De lange verstoringen zijn volgens de toelichting op de gevoeligheidsanalyse in de MKBA meer dan evenredig kostbaarder dan korte verstoringen. De precieze schade hangt af van de scheepslading, maar 3-daagse verstoringen zijn voor de meeste scheepsladingen (cement, grind, zand, containers, olie) meer dan evenredig duurder dan 1- of 2-daagse verstoringen. Bij 1- of 2-daagse verstoringen zijn er geen of nauwelijks extra kosten van vervangend vervoer en voorraadbeheer (kosten nee verkopen), maar deze nemen voor de meeste scheepsladingen sterk toe bij langere verstoringen.

Als de verstoring daarna nog langer aanhoudt, is het in het algemeen plausibel dat de kosten per stremmingsdag weer gaan dalen, aangezien het dan voor ondernemers lonend wordt naar andere en veel goedkopere oplossingen te gaan kijken, bijvoorbeeld grotere voorraden. Als die er niet zijn kan het uiteindelijk zelfs betekenen dat ondernemers voor structureel geheel andere oplossingen gaan kiezen, zoals keuze voor een andere vervoersmodaliteit of andere locatiekeuze.

De precieze niet-lineaire relatie tussen kosten van stremming en het aantal stremmingsdagen verschilt per scheepslading. Voor bulkladingen als zand en grind zullen voorraadproblemen niet snel optreden, terwijl voor sommige containerladingen deze schade aanzienlijk kan zijn als de vertraging oploopt boven een bepaald punt. De aggregatie van stremmingskosten per ladingcategorie zal vaak leiden tot niet-lineaire schade op een groter tijdsinterval van stremmingen dan bij individuele studie van de kosten van ladingcategorieën. Dit wordt geïllustreerd in onderstaande figuur.

¹⁵ Volgt uit aanname van een Poisson proces voor een stremming dag met onafhankelijkheid tussen opeenvolgende stremmingsdagen. Deze aanname van een Poisson proces zorgt ook voor een negatief exponentiële verdeling van het aantal stremmingsdagen.

Figuur 3.3 Voorbeeld van stremmingskosten per product en resulterende niet-lineaire functie van totale stremmingskosten.



De waarde van informatie en de waarde van de aanpassingsoptie¹⁶

De informatie over de ontwikkeling van het aantal stremmingen heeft waarde, wanneer de keersluis wordt behouden. De keersluis kan immers alsnog worden omgebouwd als blijkt dat het aantal stremmingsdagen sterk toeneemt. De waarde van deze informatie is meegenomen in de uitkomsten van de keersluis in tabel 3.3. Zoals de beslisboom (figuur 3.2) laat zien hangen de baten van de keersluis ten dele af van de mogelijkheid dat deze alsnog kan worden omgebouwd. Daarentegen is de waarde van informatie over het aantal stremmingen nihil bij keuze voor directe investering in het schutsluisalternatief (M3). Ongeacht het stremmingsscenario zal geen latere investering plaatsvinden.

De verwachte waarde van informatie kan als volgt worden geschat. Bij behoud van de keersluis zal bij bekendheid van het stremmingsscenario na 10 jaar, alsnog tot ombouw in een schutsluis worden overgegaan onder stremmingsscenario's C en D. Dit bleek eerder al uit de beslisboomanalyse zonder de expliciete toewijzing van kansen (figuur 3.2). De verwachte waarde van de stremmingsinformatie is gelijk aan de som van scenariokansen maal het voordeel dat wordt behaald als alsnog besloten wordt te investeren in de schutsluis. Onderstaande tabel laat zien dat de schattingen van de verwachte waarde van informatie sterk uiteen lopen onder verschillende aannames voor de scenariokansen en stremmingsschade.

¹⁶ Het verkrijgen van nieuwe informatie is in dit rapport exogeen. De aanname daarbij is dat de realisatie van scenario's niet afhankelijk is van investeringsbeslissingen. Er kunnen in werkelijkheid interacties optreden tussen toekomstige toestanden van de wereld en huidige beslissingen, bijvoorbeeld als de kans op een toename van lokale economische groei groter wordt bij de verbreiding van een snelweg of bij het inwinnen van nieuwe kennis door het ondernemen van een pilotproject. Conceptueel kunnen dergelijke interacties in een beslisboom op worden genomen door middel van conditionele kansen en/of scenario's. Het is wel een vraag of dergelijke interacties dermate groot zijn, dat dit ook praktisch nodig is.

Tabel 3.4 Waarde van informatie (contante waarde) bij direct keuze voor keersluisvariant.

Stremmingsscenario	Kansverdeling			Contante waarde van de aanpassingsbaten van latere ombouw	
	Uniforme kansen	Scheef en dikke staart	Scheef en geen dikke staart	Lineaire stremmingschade	Niet-lineaire stremmingschade
				mln euro	mln euro
C: 40 dagen / jaar	0,25	0,10	0,10	0,2	11,8
D: 60 dagen / jaar	0,25	0,05	0,00	4,8	40,9
Waarde van informatie	mln euro	mln euro	mln euro		
Lineaire stremmingschade	1,3	0,3	0,0		
Niet-lineaire stremmingschade	13,2	3,2	1,2		

In dit geval is de verwachte waarde van de aanpassingsoptie gelijk aan de verwachte waarde van informatie, omdat er in deze casestudie maar één aanpassingsoptie is. De verwachte waarde van de aanpassingsoptie is de contante waarde van het kansgewogen gemiddelde van de flexibiliteitsbaten onder de scenario's. Deze verwachte waarden worden gerapporteerd in de twee onderste rijen van bovenstaande tabel voor verschillende kans-aannames. De aanpassingsoptie heeft minder waarde bij lineaire stremmingsbaten dan bij niet-lineaire baten (meest rechtste twee kolommen van bovenstaande tabel). De toekomstige waarde van de optie verschilt per scenario en is nul onder scenario A en B. De mogelijkheid tot latere ombouw tot schutsluis wordt onder deze scenario's immers niet uitgevoerd.

Bij lineaire stremmingschade en uniforme scenariokansen, ofwel een gezamenlijke kans van 50% op de extreme scenario's C en D, bedraagt de verwachte waarde van informatie: $0,25 \times 0,2 \text{ mln euro} + 0,25 \times 4,8 \text{ mln euro} = 1,3 \text{ mln euro}$.¹⁷ Bij uniforme kansen en niet-lineaire schade is de waarde van informatie 13,2 mln euro. In de derde en vierde kolom van bovenstaande tabel wordt minder gewicht aan de scenario's C en D toegekend. Uitgaande van deze meer realistische scenariokansen, is de verwachte waarde van informatie beperkt.

3.2.4 Conclusies Meppelerdiepsluis

Verschillende veronderstellingen over de kansen en verstoringsschade leveren verschillende netto baten van de investeringsalternatieven op (zie tabel 3.3). Deze netto baten kunnen worden vergeleken met die uit de MKBA, die is uitgegaan van 100% kans op 20 dagen stremming per jaar. Op basis van deze MKBA is het behoud van de keersluis 4,2 miljoen euro goedkoper dan het schutsluisalternatief. De analyse van de waarde van flexibiliteit, hier de optie tot latere ombouw als eerst wordt gekozen tot behoud van de keersluis, is daarbij buiten beeld gebleven.

¹⁷ Zonder aangepaste risico-opslagen; zie casestudie Ramspolbrug en bijlage C.

De beslisboomanalyse van de Meppelerdiepsluis levert de volgende inzichten op:

- Er is flexibiliteit als eerst wordt besloten tot behoud van de keersluis, omdat dan de mogelijkheid open blijft om deze later alsnog om te bouwen tot schutsluis. Dit betekent dat de verwachte baten van behoud van de keersluis inclusief de waardering van flexibiliteit hoger zijn dan zonder de waarde van flexibiliteit. De huidige schatting van de verwachte baten van het schutsluisalternatief blijven daarentegen ongewijzigd, ongeacht het scenario dat zich daadwerkelijk voltrekt, door het gebrek aan flexibiliteit;
- Bij lineaire stremmingsschade is eerst kiezen voor het behoud van de keersluis het meest rendabel. Indien in de toekomst het aantal stremmingdagen aanzienlijk toeneemt, is het later alsnog rendabel om een schutsluis te realiseren;
- De stremmingsscenario's en de kansen die worden toegewezen zijn van invloed op de verwachte waarde van de optie van uitgestelde ombouw;
- Direct de schutsluis aanleggen is alleen rendabel bij niet-lineair oplopende stremmingsschade en een scheve kansverdeling met dikke staart.

3.3 Vervanging Ramspolbrug

3.3.1 Schets van het probleem

De Ramspolbrug verbindt de Noordoostpolder met Overijssel, dat wil zeggen de A6 bij Emmeloord met de A28/A50 bij Kampen en Zwolle. Deze brug over het Ramsdiep ligt op de vaarroute van het IJsselmeer naar Meppel voor de binnenvaart en fungeert ook als verbindingroute met Friesland voor de recreatievaart. De Ramspolbrug wordt jaarlijks gepasseerd door circa 5500 vrachtschepen en 15.000 recreatieschepen. De oude Ramspolbrug had een 2 x 1-strooks wegprofiel, dat wil zeggen tegengestelde eenbaanswegen, en een doorvaarthoogte van 5,65 meter. Drie of vier laags containerschepen konden in de oude situatie alleen passeren bij brugopening met hinder van het wegverkeer tot gevolg.

In de loop van de tijd veranderde het verkeer over de smalle tweebaansweg van de Ramspolbrug: het aantal landbouwvoertuigen en vrachtwagens nam sterk toe en de landbouwvoertuigen werden steeds breder. Dit leverde verkeersonveiligheid op en de brug bleek –ondanks enkele versterkingen– niet geschikt voor zoveel zwaar verkeer. Ook namen de stremmingen voor het wegverkeer en de scheepvaart toe. Als oplossing is in eerste instantie gekozen voor een nieuwe en wat bredere en hogere brug (7 meter hoog in plaats van 5,65 meter) en een gescheiden weggedeelte voor langzaam verkeer, dat wil zeggen, de landbouwvoertuigen. Dit is ook het nulalternatief in de kentallen kosten-batenanalyse (kKBA), dat wil zeggen een brug met 2x1 wegprofiel en 7 meter doorvaarthoogte; zie RWS (2006; p. 5).

3.3.2 Vergelijking van alternatieven zonder reële optieanalyse

Vervolgens was de vraag of, en zo ja, in hoeverre de brughoogte en het aantal rijstroken verder moesten worden verhoogd en vergroot. Daarvoor zijn 3 brughoogtes onderzocht: 7, 10 en 13 meter voor zowel een 2 x 1-strooks wegprofiel als een 2 x 2-strooks wegprofiel. Alle investeringsalternatieven hebben een parallelweg voor lokaal en langzaam verkeer en busdiensten. Volgens deze kKBA hebben al deze alternatieven een negatief kosten-batensaldo ten opzichte van het nulalternatief; zie onderstaande tabel voor (lage) basisscenario's voor wegverkeer en recreatievaart. Er is een gevoeligheidsanalyse opgenomen met hogere prognoses voor het wegverkeer en de recreatievaart (RWS; 2006).¹⁸

Tabel 3.5 Kosten en baten van 5 projectalternatieven voor de Ramspolbrug.

Alternatief	Baten reistijd	Kosten	Netto baten	B/K-ratio
	mln euro	mln euro	mln euro	
2x1 str. - 10m	1,3	6	-4,6	0,2
2x1 str. - 13m	2,9	10,5	-7,6	0,3
2x2 str. - 7m	1	4,1	-3,1	0,3
2x2 str. - 10m	2,3	9,4	-7,0	0,3
2x2 str. - 13m	3,1	14,6	-11,5	0,2

3.3.3 Vergelijking van alternatieven met reële optieanalyse

De analyse in de kKBA breiden we met behulp van beslisboomanalyse in twee opzichten uit:

- Toevoeging van een extra hoog scenario voor de recreatievaart die het hoge scenario uit de gevoeligheidsanalyse na 2020 overstijgt;
- Een tweede beslismoment waarop de brug alsnog verder zou kunnen worden verhoogd tegen herbouwkosten; in de kKBA wordt verondersteld dat alleen in 2006 een investeringsbeslissing wordt genomen en dat uitbreiding van de weg of brug later onmogelijk is.

Wederom gebruiken we beslisboomanalyse als een grafische tool en hiervoor moet het aantal scenario's en alternatieven worden beperkt tot de kern van het probleem. Met dit doel brengen we het aantal alternatieven en scenario's uit de kKBA van de Ramspolbrug terug.

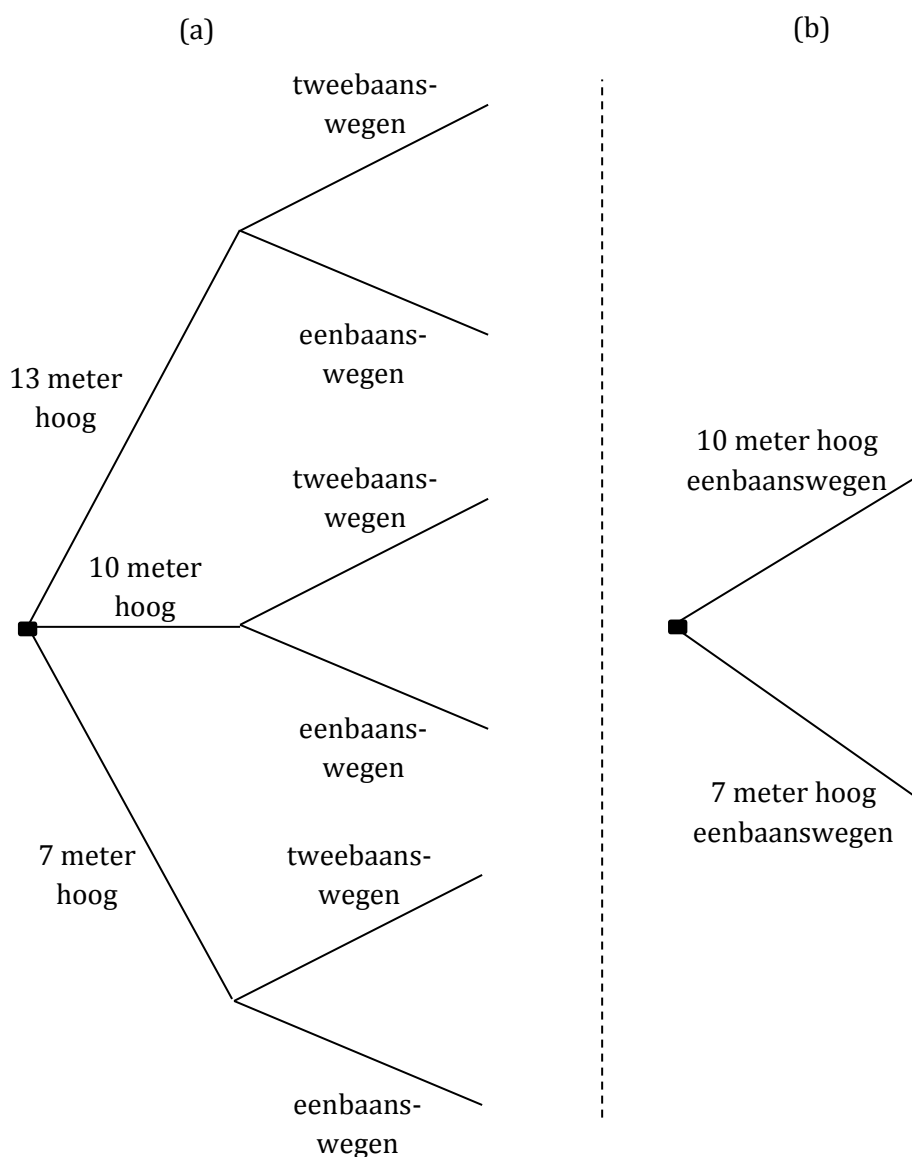
Daarna wordt een extra hoog recreatiescenario aan de analyse toegevoegd en wordt een analyse gemaakt met een beslismoment, waarbij kansen aan de verschillende scenario's worden toegedeeld. Tot slot wordt een tweede beslismoment toegevoegd en wordt bekeken of dit nieuwe inzichten oplevert.

¹⁸ De kKBA is uitgevoerd met een te korte tijdshorizon (55 jaar) en incorrecte discontovoeten: 4% zonder risico-opslag voor de investeringskosten en 7% voor de verdiscontering van de baten. We gebruiken deze uitkomsten niet in wat volgt.

Minder investeringsalternatieven: van 6 naar 2

De beslisboom met één beslismoment (investeringsbeslissing in 2006) bevat zes investeringsalternatieven met 7, 10 en 13 meter doorvaarthoogte met een 2 x 1-strooks wegprofiel of een 2 x 2-strooks wegprofiel. Dit is weergegeven in het linker paneel van figuur 3.5. Op basis van de informatie uit de kKBA kan alleen het alternatief van 10 meter doorvaarthoogte met een 2x1-strooks wegprofiel goed worden vergelijkt met het nulalternatief onder de wegverkeer- en recreatievaartsenario's. De andere alternatieven zijn daarom uit de vereenvoudigde beslisboom verwijderd (rechter paneel van figuur 3.4).

Figuur 3.4 Van een uitgebreide beslisboom op basis van de kKBA (linker paneel) en een vereenvoudigde beslisboom (rechter paneel).



Het bovenstaande laat een algemeen nadeel van het gebruik van beslisboomanalyse als evaluatie-instrument zien. In veel gevallen zal de informatie uit de MKBA niet voldoende gedetailleerd of volledig zijn om *ex post* een volledige flexibiliteitsanalyse te kunnen uitvoeren. Of dit erg is verschilt van geval tot geval.

De verwijdering van een aantal investeringsalternatieven leidt in het geval van de Ramspolbrug niet tot informatieverlies: uit de kKBA was al bekend dat een 13 meter hoge brug en een 10 meter hoge brug met een 2 x 2 wegprofiel een sterk negatief kosten-batensaldo hebben, ook onder de hoge scenario's. Het is daarom niet waarschijnlijk dat de waarde van flexibiliteit bij een inflexibel kunstwerk als de Ramspolbrug, voldoende hoog is om dergelijke verschillen te overbruggen. Dit kan echter pas met zekerheid worden geconcludeerd na indicatieve waardering van de optie om de brug later verder te verhogen naar 10 meter. Dit volgt later in onze analyse.

Minder scenario's maar inclusief één extra hoog scenario

In de gevoeligheidsanalyse van de kKBA zijn uitkomsten geanalyseerd voor hogere scenario's van de ontwikkeling van het wegverkeer, de recreatievaart en de containervaart (RWS, 2006; p. 45-48). Door alle scenario's te combineren ontstaan in totaal 8 scenariocombinaties (zie figuur 3.5).

Deze scenarioboorn kan als volgt worden vereenvoudigd:

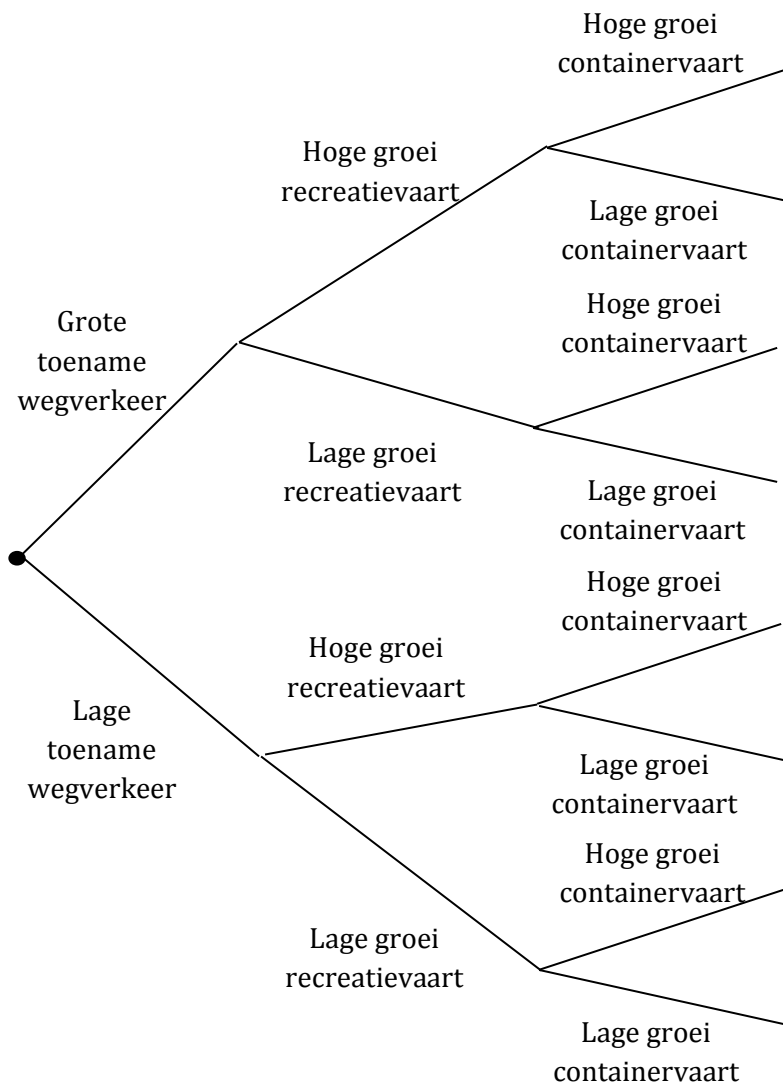
- Verwijder overbodige autonome scenario's. Reistijdverliezen onder een sterke ontwikkeling van de containervaart blijken beperkt. Dit is nuttige informatie, maar deze scenario's hoeven niet meegenomen te worden in de vereenvoudigde scenarioboorn. Alleen de scenario's voor wegverkeer en recreatievaart blijven over. Voor de containervaart wordt uitgegaan van de lage ontwikkeling.
- Verwijder scenariocombinaties die weinig toevoegen aan de spreiding van de uitkomsten, zoals grote toename wegvervoer met een lage groei van de recreatievaart.

In combinatie met een extra hoge scenario voor de recreatievaart levert dit drie scenario's op:

- Laag: op basis van prognoses van de toename van het wegverkeer (3% groei t/m 2020, 1% erna) en een aanname over de toename van de recreatievaart (1% groei t/m 2020, 0,5% in 2021-2040 en 0% in 2041-2060);
- Hoog: grote toename wegverkeer en grote toename recreatievaart;
- Extra hoog: grote toename wegverkeer en extra grote toename recreatievaart.

Een extra laag scenario zou wellicht een goede aanvulling zijn geweest, maar deze is niet bestudeerd in de oorspronkelijke analyse en wordt buiten beschouwing gelaten.

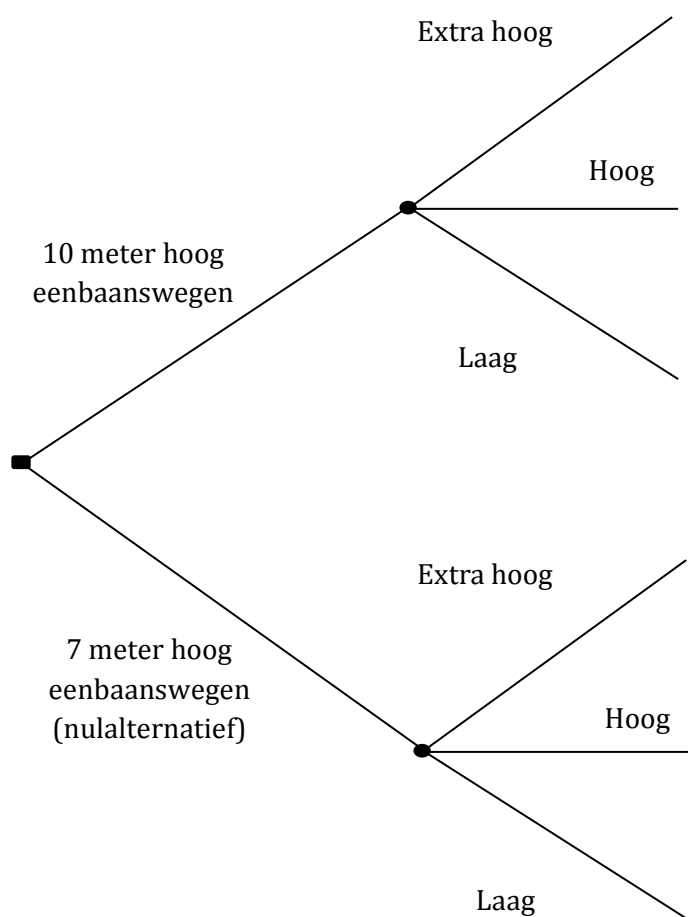
Figuur 3.5 Scenariboom met 8 scenario's.



Eenvoudige beslisboom voor één beslismoment

De beperking van het aantal scenario's en investeringsalternatieven levert de onderstaande vereenvoudigde beslisboom op.

Figuur 3.6 Vereenvoudigde beslisboom met overgebleven gecombineerde scenario's.



Eén extra hoog scenario voor recreatievaart

Voor de beslisboomanalyse zijn de groeiscenario's uit de kKBA voor de recreatievaart uitgebreid met een extra hoog scenario voor de recreatievaart (zie onderstaande tabel). In de twee oorspronkelijke scenario's voor de recreatievaart is een afname in de groei tussen 2021 en 2040 verondersteld, welke is gebaseerd op de aanname dat de lokale bevolkingsgroei afneemt.

Het onzekerheidsinterval van de bevolkingsgroeiprognoses van het CBS (2014) laat echter een kans zien van 1 op 3 dat de nationale bevolkingsgroei niet of nauwelijks zal afnemen tussen 2021 en 2040. Als de lokale bevolkingstrend niet afwijkt van dit gemiddelde en als de recreatievaart niet door andere trends of belemmeringen afneemt, dan blijft er een redelijke kans over op een scenario voor de recreatievaart dat het hoge scenario overstijgt na 2020.

Het extra hoge scenario dat we definiëren heeft dezelfde groei van de recreatievaart als in het hoge scenario in de periode 2005-2020. De groei blijft daarna 1,5% in de periode van 2021-2040. In het hoge scenario valt de groei van de recreatievaart in

deze periode terug tot 1,0% per jaar en in het lage scenario tot 0,5% per jaar. In alle scenario's wordt een 0% groei van de recreatievaart aangenomen voor de periode na 2040.

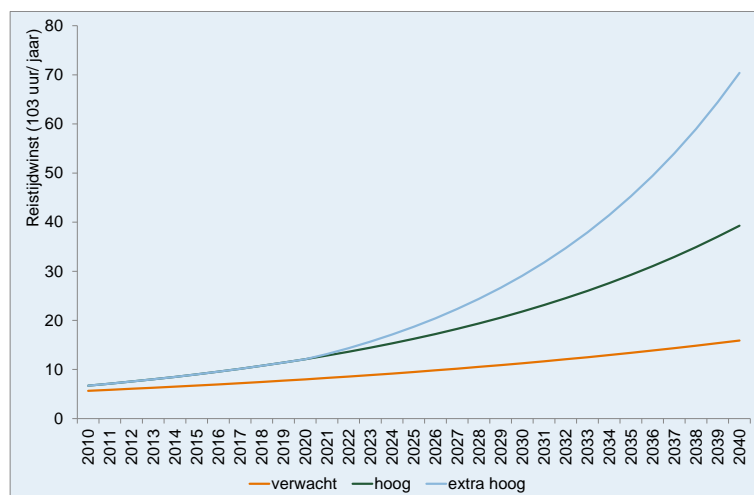
Tabel 3.6 Scenario's voor de recreatievaart met extra hoog scenario.

Scenario	Jaar	Groei van de recreatievaart (%)
Laag	2005-2020	1,0
Laag	2021-2040	0,5
Hoog	2005-2020	1,5
Hoog	2021-2040	1,0
Extra hoog	2005-2020	1,5
Extra hoog	2021-2040	1,5

Reistijdwinst neemt exponentieel toe

Onderstaande figuur geeft de reistijdwinst weer voor het lage, hoge en extra hoge scenario voor het 10 meter 2x1-alternatief. Onder het hoge scenario neemt de reistijdwinst exponentieel toe ten opzichte van het nulalternatief.¹⁹ Bij een groei van het recreatieverkeer van 1,5% in de periode 2021-2040 (het extra hoge scenario) neemt de reistijdwinst nog verder toe.

Figuur 3.7 Reistijdwinst (uren/jaar) wegverkeer voor het 10 meter 2x1 alternatief ten opzichte van het nulalternatief.



Beslisboomanalyse met 1 beslismoment

De netto baten van de 10 meter hoge brug in vergelijking met de 7 meter hoge brug zijn -2,7 mln euro onder het lage scenario.²⁰ Onder het hoge scenario neemt dit

¹⁹ Dit blijkt uit de gevoeligheidsanalyse van de kKBA uit verkeerssimulatiemodel SIVAK.

²⁰ De berekening is uitgevoerd met een risicovrije discontovoet van 2,5%, een risico-opslag van 3% op zowel de baten als de kosten en een tijdshorizon van 100 jaar. De reistijdwinst van de scheepvaart is nihil verondersteld en voor de monetarisering van de reistijdwinst van het wegverkeer zijn de aannames over reële groei in reistijdwaardering overgenomen zoals beschreven in de aanvullende kKBA.

nadeel van de 10 meter hoge brug sterk af (0,3 mln euro), terwijl dit bij het extra hoge scenario omslaat naar een duidelijk voordeel (3,4 mln euro).

Tabel 3.7 Netto baten (in contante waarde) van een 10 meter hoge brug ten opzichte van het nulalternatief (7 meter hoge brug).

Verkeersscenario	Kosten	Baten	Netto baten	Scenariokans	Scenariokans	Scenariokans
Laag	5,8	3,1	-2,7	0,33	0,6	0,8
Hoog	5,8	6,2	0,3	0,33	0,3	0,2
Extra hoog	5,8	9,2	3,4	0,33	0,1	0,0
Netto baten				0,3	-1,2	-2,1

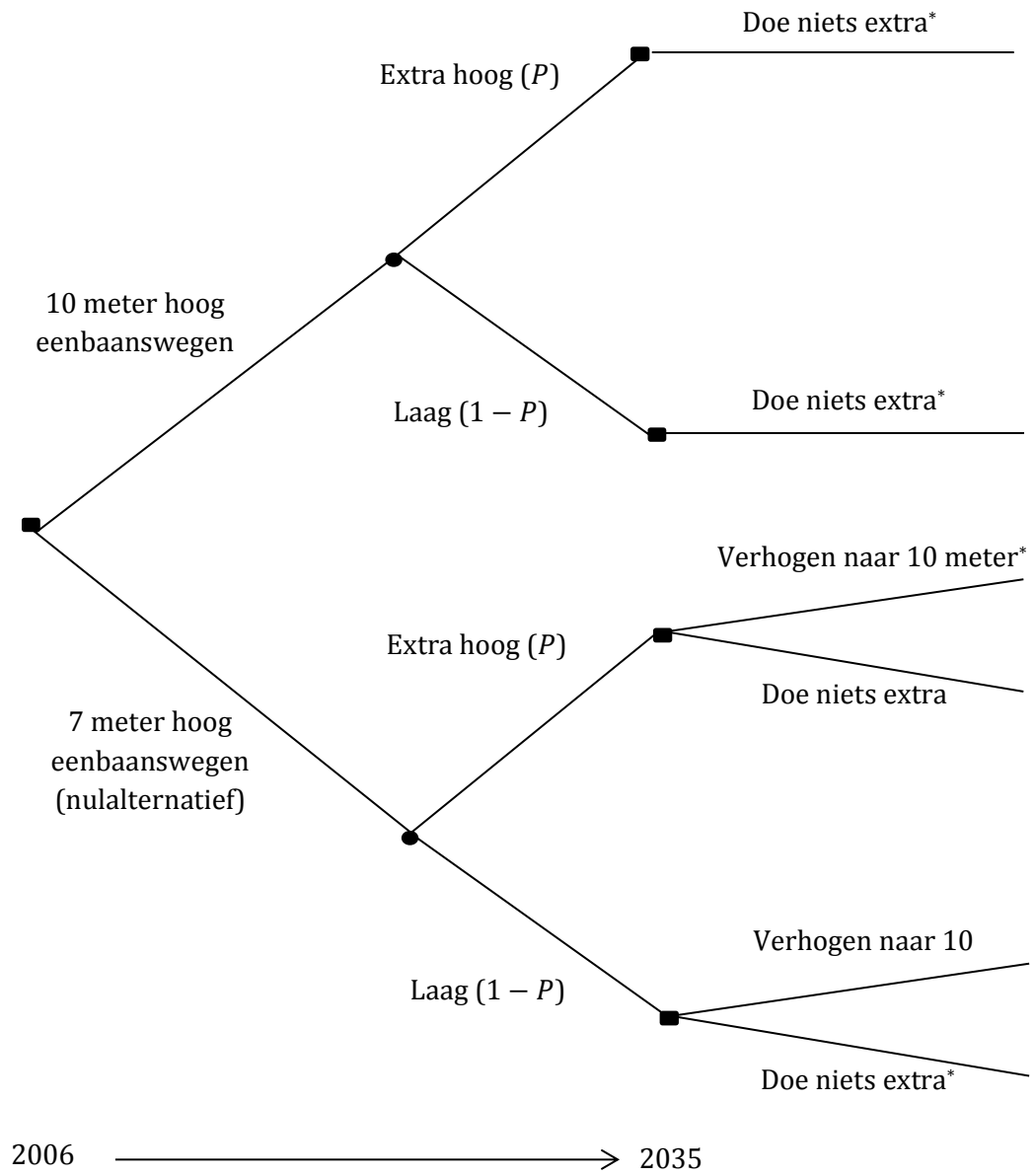
We gaven eerder aan dat het extra hoge scenario nog steeds plausibel is. Bij gelijke kansen voor de drie scenario's heeft de 10 meter hoge brug een beperkt voordeel in vergelijking met de 7 meter hoge brug (0,3 mln euro). Als de kansen die worden toegerekend aan de hoge en extra hoge scenario's kleiner zijn, dan zijn de netto baten negatief (twee rechter kolommen van bovenstaande tabel).

Vergelijking van alternatieven met beslisboomanalyse met 2 beslismomenten

In de kKBA voor de Ramspolbrug is uitgegaan van slechts 1 beslismoment, terwijl in principe meerdere beslismomenten relevant kunnen zijn. Bijvoorbeeld: eerst zou kunnen worden gekozen voor een brughoogte van 7 meter en later eventueel een 10 meter hoge brug. Dit kan wel leiden tot aanzienlijke extra kosten. Daarentegen is een directe investering in een brug van 13 meter hoog duurder dan een brug van 7 meter hoog. Met andere woorden: wanneer wordt geïnvesteerd in een 7 meter hoge brug blijft de optie open, dat wil zeggen de mogelijkheid maar niet de verplichting, om deze later te verhogen tot een 13 meter hoge brug tegen aanzienlijke extra kosten.

Voor een inzichtelijke grafische beslisboomanalyse met twee beslismomenten moet eerst weer een beslisboom worden opgesteld met een beperkt aantal beslissingen en scenario's die de kern van het investeringsprobleem samenvat. Deze is in bovenstaande figuur weergegeven. Hiervoor worden slechts twee scenario's (extra hoog en laag) en de keuze van de hoogte van de brug getoond; voor het aantal rijstroken is aangenomen dat alleen 2 x 1 mogelijk is.

Figuur 3.8 Vereenvoudigde beslisboom voor de Ramspolbrug met 2 beslismomenten en 2 scenario's.



Extra kosten en risico-opslag bij later investeringsmoment

Rekening houden met meerdere beslismomenten is vooral nuttig indien in de loop van de tijd nieuwe informatie beschikbaar komt. Gedacht kan worden aan de ontwikkeling van het wegverkeer en de scheepvaart of over technische oplossingen (goedkopere innovatieve oplossingen). In de loop van de tijd wordt bijvoorbeeld duidelijk of de prognoses van de toename van de recreatievaart en het wegverkeer kloppen, of voor- of achterlopen. Op basis daarvan kan een inschatting worden gemaakt of het zinvol is om de Ramspolbrug alsnog verder te verhogen tot 10 of 13 meter. Het verhogen van een brug kan goedkoper zijn dan volledige vervanging, omdat delen van de bestaande brug kunnen worden hergebruikt als deze technisch nog niet zijn afgeschreven. Een boogbrug kan bijvoorbeeld op tijdelijke pijlers worden geplaatst waarna op- en afritten en pijlers kunnen worden verhoogd. Vervolgens kan de brug worden teruggeplaatst.

Het is technische mogelijk om de Ramspolbrug te verhogen. Door de constructie van de vaste brug en de basculekelder is dit echter een relatief dure ingreep. De kosten van volledige vervanging zijn voor het 10 meter hoge alternatief met 2x1 rijstroken ten minste 73 miljoen euro (niet-verdisconteerd). We veronderstellen dat verhoging van de brug naar 10 meter goedkoper is dan complete vervanging en 40 miljoen euro (niet verdisconteerd) kost.²¹ Uitgaande van een constante discontovoet van 5,5% (risicovrije voet + risico-opslag) is het later verhogen van de brug tot 10 meter, bijvoorbeeld in 2020, 2030 of 2040, niet rendabel (zie onderstaande tabel). Niet verhogen is – gegeven de aanleg van een 7 meter hoge brug – dan een no regret-oplossing.

Tabel 3.8 Netto baten van verhogen brug tot 10 meter, extra hoge scenario, standaarddiscontovoet en bij geen risico-opslag.

Discontovoet	Ophogingsjaar	Baten	Kosten	Netto baten
Standaard: met risico-opslag	2020	8,2	18,9	-10,7
	2030	6,9	11,1	-4,1
	2040	4,9	6,5	-1,6
Verdwenen onzekerheid: geen risico-opslag	2020	30	28,3	1,7
	2030	27,8	22,1	5,7
	2040	23	17,3	5,7

Als een investeringsbeslissing op een later tijdstip wordt genomen, kan deze worden gebaseerd op nieuwe en betere informatie. Denk bijvoorbeeld aan het beschikbaar komen van meer verkeersobservaties om een betere inschatting te maken van verkeersontwikkelingen. Er bestaat dan nog steeds onzekerheid over toekomstige ontwikkelingen, maar het is dan wel bekend of de op dat moment bestaande wegcapaciteit toereikend is of niet. Kortom: onzekerheden lossen doorgaans niet op, maar verminderen meestal wel. Er kan eventueel rekening worden gehouden met de

²¹ Volgens Hoefsloot en van Ommeren (2006) kost verhogen van de brug naar 13 meter 52 miljoen euro.

vermindering van het risico, dus een lagere risico-opslag in dit deel van de beslisboomanalyse.

De meest extreme, theoretische veronderstelling is dat de onzekerheid is verdwenen op het laatste (hier: tweede) beslismoment.²² Hiermee worden de baten van reële opties meestal overschat. De risico-opslag vanaf het tweede beslismoment in de beslisboomanalyse is onder deze aanname 0% in plaats van de standaard risico-opslag van 3%. Dit is een theoretische aanname (er is vanaf dan immers *per definitie* geen risico meer). In de praktijk zal er vrijwel altijd resterende onzekerheid zijn. De onzekerheid kan wel afnemen, naarmate de resterende levensduur van een kunstwerk afneemt en de betreffende optie niet voorziet in volledige vervanging van het kunstwerk (bijvoorbeeld bij uitbreidingsopties).

In bovenstaande tabel is ter illustratie de berekening toegepast met standaard risico-opslag tot 2035 en zonder risico-opslag vanaf 2035. Dan wordt het naderhand verhogen van de brug naar 10 meter rendabel in het extra hoge scenario. Merk op dat de berekening ook kan worden uitgevoerd zonder verandering van de risico-opslag over de tijd, zoals dat bij de voorgaande casus is gedaan.

Een standaard risico-opslag maakt geen onderscheid tussen verschillen in risico's tussen investeringen en over de tijd. Bijlage C gaat in op het onderwerp van risico-aangepaste verdiscontering en past deze methode ter vergelijking toe op dezelfde casus.

Wat is de optiewaarde van verhogen tot 10 meter in 2035?

Stel dat in 2006 de beslissing is genomen om te investeren in een 7 meter hoge brug. In het jaar 2035 bestaat het recht, maar niet de verplichting, om de brug naar 10 meter te verhogen op basis van de dan beschikbare informatie.²³ Wat is dan de optiewaarde van dit recht in 2035?

Bij het lage toekomstscenario wordt de brugverhogingsoptie in 2035 niet uitgeoefend (niet alsnog in 2035 extra verhoging) en heeft de optie geen waarde. Bij het extra hoge toekomstscenario is extra verhoging in 2035 wel rendabel, nl. 12,9 miljoen euro in 2035 (niet verdisconteerd, zie onderstaande tabel).²⁴

²² In het binomiale model van Cox et al. (1979) en andere optiemodellen is dit bijvoorbeeld per definitie het geval op de uiterste uitoefendatum. Dan kan de waarde van een financiële optie immers niet meer veranderen.

²³ Deze reële investeringsoptie is vergelijkbaar met een financiële call-optie volgens de Europese stijl.

²⁴ Er is aangenomen dat de reële groei van de verhogingskosten 0% bedraagt.

Tabel 3.9 Toekomstige optiewaarde van de verhoging van de brug tot 10 meter in 2035 onder scenario laag of extra hoog (niet verdisconteerd naar 2006).

Scenario	Baten (mln euro)	Kosten (mln euro)	Optiewaarde in 2035 na aftrek kosten (mln euro)	Verhogen
Laag	12,2	40	$\max(-27,8; 0) = 0$	Nee
Extra hoog	52,9	40	$\max(12,9; 0) = 12,9$	Ja

Onder de extreme veronderstelling dat de vervoersonzekerheid in 2035 is opgelost, kan de stroom van baten van brugverhoging risicovrij worden verdisconteerd naar 2035. Dit geeft een bovengrens voor de *toekomstige optiewaarde* van de tweede brugverhoging bij de verschillende scenario's. De totale baten van verhoging van de brug tot 10 meter hebben in 2035 (t_1) een waarde van:

$$\sum_{t_1=0}^{70} \frac{B_t(s)}{(1 + \delta)^t}$$

Met $B_t(s)$ de reistijdbaten in jaar t onder scenario s (reistijdwinst in uren maal reële reistijdwaardering) van een 10 meter hoge brug, δ is de reële risicovrije discontovoet (2,5%).

Uit de waarden van de optie in 2035 onder de scenario's kan de *verwachte optiewaarde* in 2006 worden berekend. Dit kan door de 12,9 mln euro contant te maken met een discontovoet van 5,5% en te vermenigvuldigen met de scenariokans van het extra hoge toekomstscenario. Hierbij wordt een risico-opslag van 3% toegepast omdat zowel de baten als de kosten van de optie onzeker zijn in 2006 en alleen optreden bij realisatie van het extra hoge scenario. Bij bijvoorbeeld een kans van $\frac{1}{2}$ op het extra hoge scenario zou dit resulteren in *een verwachte optiewaarde* van de tweede verhoging van de brug (tot 10 meter) van: $\frac{1}{2} * (12,9 / 1,055^{29}) = 1,4$ miljoen euro. Bij een lagere kans voor het extra hoge scenario wordt de verwachte optiewaarde kleiner.

Een beperking van deze waardering is dat het nog geen rekening houdt met het verschil in risico tussen de optie en het inflexibele project in de periode 2006-2035. Vanuit dit perspectief is de zojuist berekende verwachte optiewaarde te hoog. De discontovoet van de optie kan eventueel worden aangepast aan het project-specifieke risico door middel van een risico-aangepaste discontovoet. Dit wordt uitgewerkt in bijlage C.

3.3.4 Conclusies casestudie Ramspolbrug

De conclusie is dat de brugverhogingsoptie in dit geval een relatief lage (monetaire) waarde heeft. Dit is niet verwonderlijk, aangezien:

- Een eventuele tweede verhoging en de baten daarvan ver in de toekomst liggen;
- De optie alleen onder een plausibel, maar minder waarschijnlijk (extra hoog) scenario wordt uitgeoefend;
- Brugverhoging bij dit type brug erg duur is.

De verwachte waarde van de brugverhogingsoptie is hierdoor relatief laag. Ook intuïtief is dat goed te beredeneren: een basculebrug wordt voor lange tijd gebouwd.

Reële-optieanalyse minder geschikt voor innovatiebaten

Het ontwerp van de Ramspolbrug is onderscheiden met de Gouden Mier voor innovatief ontwerp en heeft in 2013 de betonprijs gekregen voor bijzonder gebruik van beton. De brug maakt gebruik van duurzame materialen en is energieneutraal. De brug is uitgerust met accu's die energie opslaan uit het afremmen van de beweegbare klep en zonne-energie die er overdag wordt opgewekt.

In de praktijk is het vaak lastig om innovatiebaten mee te nemen in een MKBA. Een reële optiebenadering voegt door inherente methodische beperkingen weinig toe voor het waarderen van innovatiebaten. Het betreft namelijk meestal een diffuus kennis- en leerproces betreft zonder duidelijke relatie met toekomstige kostenbesparingen of extra opbrengsten. Er is hier sprake van een zogenaamd endogeen leerproces: de staat van kennis in de toekomst is afhankelijk van de huidige beslissing voor een innovatief ontwerp. Deze kennis kan later in andere projecten worden ingezet, maar of, waar, wanneer en hoe deze kennis wordt gebruikt is onzeker. Dit leerproces kan wel gestileerd worden gemodelleerd samen met eventueel voortvloeiende baten, maar dat zal geen betrouwbare schatting van de innovatiebaten opleveren. Een reële optiebenadering voor het waarderen van innovatiebaten uit een diffuus kennis –en leerproces, gekenmerkt door onduidelijke spillovers naar andere projecten, lijkt daarom voor praktische toepassing minder geschikt.

De volgende lessen kunnen worden getrokken uit de aanvullende reële optieanalyse van deze casestudie.

- Bij niet-lineaire baten en plausibele, extra hoge scenario's worden toekomst-vaste oplossingen vaak aantrekkelijker. In kwantitatieve zin drukken deze scenario's dan relatief hard op de verwachte kosten-batensaldo's, ook in een analyse zonder flexibiliteit. Uit de analyse van de Ramspolbrug blijkt dat bij bepaalde weging van de scenario's een ander alternatief (10 meter doorvaarthoogte) naar verwachting het meest rendabel is.
- Beslisboomanalyse kan worden gebruikt om flexibiliteitsopties te waarderen. Lage baten van een optie zijn een indicatie voor weinig flexibiliteit.
- Als er weinig flexibiliteit is, zal dat eerder leiden tot de conclusie dat toekomst-vaste oplossingen (hier: hogere brug) nodig zijn. Of dit zo is, volgt uit de beslisboomanalyse met 1 beslismoment. Anders gezegd: als aanpassingen maken later erg kostbaar is, dan wordt het vaak aantrekkelijker om direct grotere investeringen te doen, bijvoorbeeld een hogere brug of een weg met meer capaciteit.

3.4 Uitbreiding snelweg met tunnel

3.4.1 Schets van het probleem

De capaciteit van het Nederlandse hoofdwegennet wordt met enige regelmaat uitgebreid om de doorstroming te verbeteren en overbelasting van het wegennet te voorkomen. Deze weginfrastructuurprojecten beperken daarmee reistijdverliezen en vergroten de bereikbaarheid van woon-, werk- en recreatielocaties.

Kunstwerken, zoals viaducten en tunnels, vormen in veel gevallen grote kostenposten van een weginfrastructuurproject. Dit komt niet alleen door de technische complexiteit en de kosten van voorbereiding, materialen en inrichting, maar ook door de relatief hoge inpassingskosten die met de constructie gepaard gaan door de aanwezigheid van nabije bebouwing op knelpunten. Bovendien is het kostbaar om kunstwerken later aan te passen, wanneer er eerder geen rekening is gehouden met de mogelijkheid van aanpassing in het ontwerp.

Beslisboomanalyse kan bij dergelijke projecten met dure kunstwerken worden uitgevoerd in verschillende fases en niveaus van de besluitvorming. De beslisboommethode kan bijvoorbeeld worden gebruikt voor de analyse van integrale investeringsbeslissingen en inpassingsvarianten, maar ook later in het proces voor de deelanalyse van ontwerpen van kunstwerken op knelpunten. Dit laatste wordt hieronder gedemonstreerd.

Het inbouwen van flexibiliteit in het ontwerp van kunstwerken kan later besparingen opleveren. Als er bijvoorbeeld ruimte wordt gereserveerd in een landtunnel voor wegwitbreiding, dan voorkomt dit dat later nieuwe tunnelbuizen moeten worden gerealiseerd of dat de tunnel grotendeels weer moeten worden afgebroken om de wegcapaciteit verder uit te kunnen breiden. Dit is vaak kostbaar. In het geval van een landtunnel betekent ruimtereservering dat een bredere tunnel nodig is of een extra tunnelbuis. Beslisboomanalyse kan helpen om de afweging tussen de waarde en de kosten van flexibiliteit bij een ontwerp eenvoudig en snel inzichtelijk te maken.

3.4.2 Vergelijking van ontwerpen zonder reële optieanalyse

Als voorbeeld nemen we de aanleg van een fictieve landtunnel. In deze tunnel kan ruimte worden gereserveerd tegen meerkosten. De ruimtereservering zal aanvankelijk als calamiteitenstrook dienen, maar kan eventueel later voor een extra rijstrook worden gebruikt. We passen nu de beslisboommethodiek toe om ruimtereservering in deze tunnel economisch te evalueren.

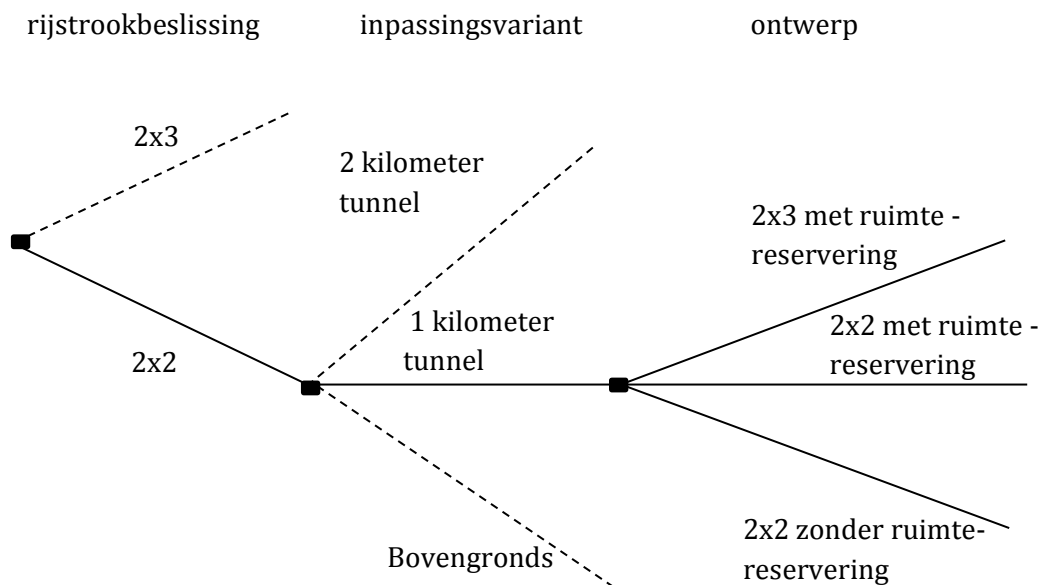
De hoofdkeuzes rond het project vormen het startpunt voor keuzes rond het ontwerp. De keuze voor het ontwerp van de tunnel kan namelijk niet los worden gezien van integrale hoofdbeslissingen, bijvoorbeeld over het aantal rijstroken van omliggende wegen. Het is bijvoorbeeld inefficiënt om een tunnel met 2x4 stroken aan te leggen als

de omliggende snelwegen een heel andere rijstrookconfiguratie hebben. Deze vereiste van een 'logisch pakket' verkleint het aantal keuzes. De beslisboom wordt navenant kleiner.

Er zijn drie hoofdkeuzes te onderscheiden: hoofdkeuzes over het aantal rijstroken, de inpassingsvarianten en ontwerpen van de gekozen variant. In ons tunnelvoorbeeld zijn dit respectievelijk:

- Het aantal rijstroken van de wegen rond de tunnel. Deze volgt uit de logische pakketkeuze: bijvoorbeeld 2x2 of 2x3 rijstroken.
- Hoe in te passen, bijvoorbeeld de keuze om al dan niet een tunnel te maken, en de lengte van de tunnel (bijvoorbeeld 1 of 2 kilometer lang en het type tunnel).
- En het ontwerp van de variant, zoals een tunnel met of zonder ruimtereservering.

Figuur 3.9 Illustratie van een beslisboom met één beslismoment voor het ontwerp van een fictief deelproject: een snelweg-ondertunneling.



In bovenstaande figuur nemen we aan dat al gekozen is voor 2x2 rijstroken van omliggende wegen met daartussen een tunnel met een lengte van 1 kilometer. Alleen bij het ontwerp zijn nog enkele belangrijke keuzes over (zie laatste deel van de beslisboom).

Van onder naar boven zijn dat:

- Een 2x2 tunnel zonder ruimtereservering voor een extra rijstrook later.
- Een 2x2 tunnel met ruimtereservering voor een extra rijstrook naar 2x3.
- Een 2x3 tunnel met ruimtereservering voor nog een extra rijstrook naar 2x4.

Wanneer op t_0 (2015) zou worden gekozen voor een tunnel met twee buizen zonder ruimtereservering, is het technisch gezien mogelijk om de landtunnel later aan te passen naar een 2x3 tunnel. Dit zal veelal duurder zijn dan de constructie van een nieuwe tunnel (hier met 2x2 rijstroken), omdat delen van de oude tunnel moeten worden afgebroken en reistijdverliezen optreden tijdens de werkzaamheden. Verder is eenrichtingsverkeer per tunnelbuis gewenst, wat ook tot extra kosten kan leiden. Dit alternatief is om deze redenen niet verder in beschouwing genomen.

Hoewel het opwaarderen van een 2x2 naar een 2x3 tunnel zonder ruimtereservering dus inefficiënt is, kan wel worden overwogen om *direct* een 2x2 met ruimtereservering of een 2x3 tunnel (maximaal 2x4 rijstroken) aan te leggen. Vandaar dat deze zijn opgenomen de integrale beslisboom in figuur 3.9. De meerkosten van ruimtereservering in de 2x3 tunnel moet dan eerst worden afgewogen tegen de kans dat 2x4 rijstroken in de toekomst ook daadwerkelijk worden gebruikt. Dit kan worden onderzocht door het (verkeerskundig) analyseren van een 'bovengrens' scenario (extra, extra hoog scenario) voor de verkeersvraag ter plaatse. In de break-evenanalyse gaan we ervan uit dat deze analyse aangeeft dat een uitbreiding naar 2x4 rijstroken gedurende de levensduur van de tunnel niet opportuun is.

Ruimtereserveringen in een tunnel worden, totdat deze in gebruik wordt genomen als rijstrook, gebruikt als uitwijkplaats bij calamiteiten. Hierdoor heeft een ruimtereservering onder alle scenario's baten.

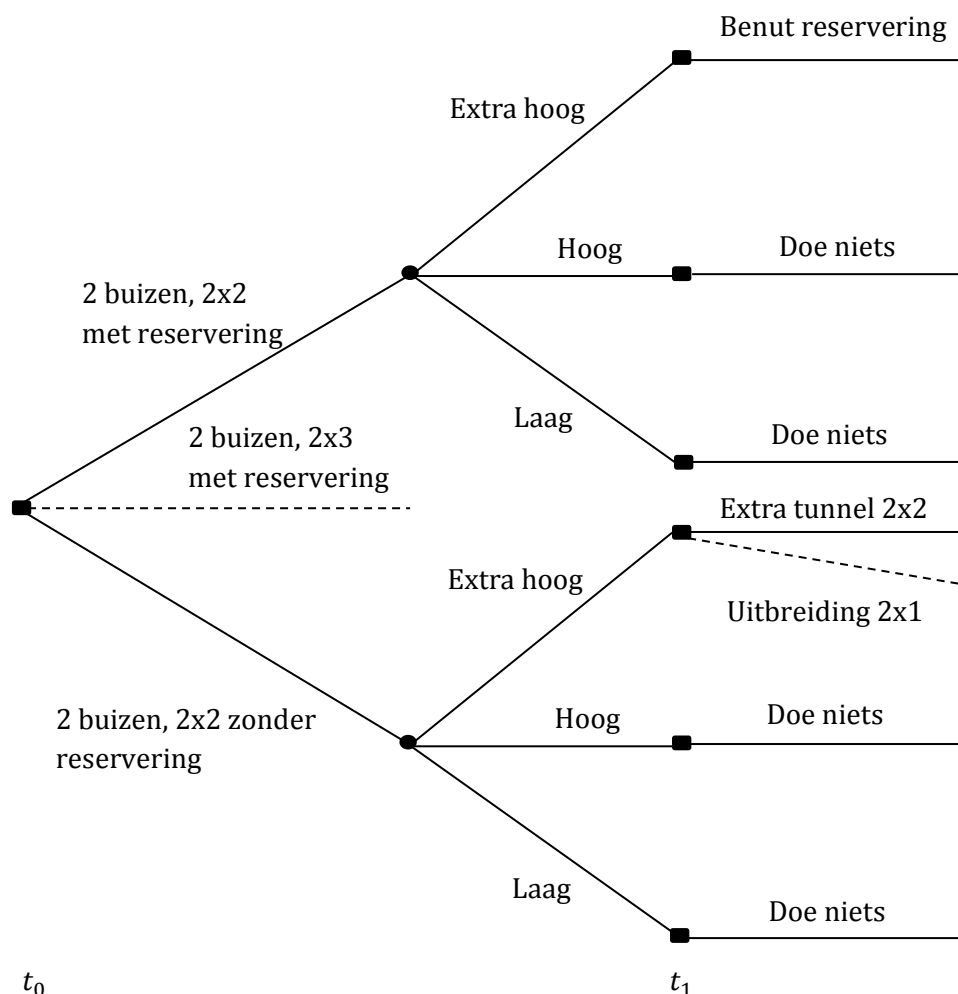
3.4.3 Vergelijking van ontwerpen met reële optieanalyse

Om een kwalitatief overzicht van het investeringsprobleem te krijgen, wordt de beslisboom rond het ontwerp van de landtunnel eerst uitgebreid met scenario's zonder uitkomsten per tak of kansen. Daarna wordt een break-evenanalyse verricht.

De keuze gaat nu tussen een 2x2 tunnel met of zonder ruimtereservering. Figuur 3.10 geeft een beslisboom met twee beslismomenten voor het ontwerp van de tunnel. Er zijn drie scenario's gedefinieerd: laag, hoog en extra hoog. Bij het ontwerp met ruimtereservering zal de ruimtereservering alleen benut worden als extra rijstrook onder het extra hoge scenario. Flexibiliteit is dus alleen aanwezig bij het ontwerp met ruimtereservering. De optie bestaat uit de mogelijkheid om later van de calamiteitsstrook een extra rijstrook te maken. De waarde van de optie wordt

bepaald door de reistijdwinst die optreedt bij uitoefening van de optie. Daar staan de kosten van de optie, dat wil zeggen de kosten van ruimtereservering, tegenover.

Figuur 3.10 Vereenvoudigde beslisboom met twee beslismomenten voor deanalyse van het ontwerp van de voorbeeldtunnel.



Aan scenario's kunnen niet altijd kansen worden toegewezen.²⁵ Net zoals bij de eerdere casestudies kan toch indicatief worden bepaald of de kosten van flexibiliteit opwegen tegen de verwachte baten door middel van een break-evenanalyse. Bij dit type analyse wordt geen optiewaarde verkregen. Gelet op de extra kosten van ruimtereservering in een tunnel is deze alleen rendabel wanneer er voldoende kans bestaat dat deze ook daadwerkelijk wordt gebruikt. Deze kans kan eenvoudig worden berekend. Dit gaat als volgt.

²⁵ De nieuwe WLO-scenario's geven bijvoorbeeld een consistente set van toekomstbeelden van economische groei (zonder kansen). Deze scenario's kunnen worden overwogen voor beslisboomanalyse van weginfrastructuur, maar moeten wel worden aangepast voor lokale factoren en omstandigheden. Een alternatieve benadering met kansen is de benadering van een continue distributie met discrete scenario's, zoals beschreven in hoofdstuk 2.

Break-evenanalyse voor ruimtereservering in de voorbeeldtunnel.

Stel dat de ontwerpkeuze gaat tussen een tunnel van 2x2 stroken met óf zonder ruimtereservering. Wat is vanuit een reële optiebenadering met break-evenanalyse dan de beste keuze?

Laten we aannemen dat de 2x2 ontwerpvariant met ruimtereservering 120 miljoen euro kost en zonder ruimtereservering 100 miljoen euro. De optie om de wegcapaciteit later uit te breiden kost dus 20 miljoen euro en we nemen aan dat deze geen baten als deze niet wordt uitgeoefend.²⁶

Het belangrijkste nadeel van de variant zonder ruimtereservering is dat eventuele capaciteitsuitbreiding na 2025 duur is, omdat voor latere uitbreiding twee nieuwe tunnelbuizen zouden moeten worden gerealiseerd. Wanneer capaciteitsuitbreiding in 2025 dan toch (precies) rendabel is onder het extra hoge scenario, kan een extra tunnel worden gemaakt van weer 100 miljoen met een contante waarde van 59 miljoen euro (uitgaande van een discontovoet van 5,5%; dat wil zeggen $\frac{100}{1,055^{10}}$).

Bovenstaande informatie is al voldoende om de break-evenkans te berekenen. De kosten van capaciteitsuitbreiding (59 miljoen euro) worden onder het extra hoge scenario bespaard als in 2015 direct wordt gekozen voor ruimtereservering (met meerkosten van 20 miljoen euro). Wanneer de kans op een extra hoog scenario met rendabele uitbreiding in 2025 ruim een derde ($20/59 = 34\%$) is, dan is deze ruimtereservering van 20 miljoen euro rendabel.

Bovenstaande kans geeft een ondergrens van de break-evenkans van de optie om de wegcapaciteit uit te breiden, omdat we hebben aangenomen dat de extra capaciteit onder het extra hoge scenario al snel nodig is, namelijk in 2025. Een grotere kans op het extra hoge scenario is nodig, als de wegcapaciteit pas later wordt gebruikt onder het extra hoge scenario. Dit komt doordat bij latere benutting van de ruimtereservering de verwachte waarde van de uitbreidingsoptie afneemt: de verwachte baten van de optie worden immers verdisconteerd. Wanneer de ruimtereservering bijvoorbeeld pas in 2030 wordt gebruikt, dan is een kans op het extra hoge scenario van 45% in plaats van 34% nodig. In de limiet ($t_1 \rightarrow \infty$) is de waarde van de informatie dat het extra hoge scenario plaatsvindt, waardeloos. Wanneer de ruimtereservering bijvoorbeeld pas na een eeuw zou worden gebruikt, dan maakt het niet meer uit wat de kans hierop is. De directe kosten (20 miljoen) van de optie wegen dan nooit op tegen de verdisconteerde baten van de optie bij een discontovoet van 5,5%. In dat geval kan dus beter een 2x2 tunnel zonder ruimtereservering worden aangelegd.

²⁶ In werkelijkheid zijn er wel baten van de calamiteitenstrook, bijvoorbeeld extra veiligheid. In dit rekenvoorbeeld laten we deze baten buiten beschouwing om het voorbeeld zo compact mogelijk te houden. Ook de kosten van overlast (reistijdverliezen) tijdens werkzaamheden laten we hier voor de eenvoud van het voorbeeld buiten beschouwing. Deze zijn overigens zeker niet verwaarloosbaar.

3.4.4 Conclusies casestudie snelweg met tunnel

De conclusie is dat ruimtereservering in een tunnel een nuttige vorm van flexibiliteit biedt, maar dat er wel voldoende kans moet bestaan dat deze ook daadwerkelijk wordt gebruikt. Extra flexibiliteit bij tunnels is kostbaar. Toekomst-vast ontwerpen kent daarom grenzen en een break-evenanalyse geeft inzicht in deze grenzen.

In meer algemene zin leert deze casus dat:

- Beslisboomanalyse niet alleen kan worden gebruikt voor de analyse van projectalternatieven, maar ook bij keuzes rond het ontwerp van kunstwerken;
- Break-evenanalyse een eenvoudig alternatief is voor beslisboomanalyse met kans-aannames: zonder veel informatie kan met een paar simpele 'back of the envelope' berekeningen inzichtelijk worden gemaakt of een bepaalde investering in flexibiliteit wel of niet uit kan en wat hierbij de kritieke veronderstellingen zijn.

3.5 Conclusies casestudies

De drie casestudies laten zien hoe beslisboomanalyse kan worden gebruikt om opties voor flexibiliteit te evalueren en zo mogelijk te waarderen. Beslisboomanalyse geeft inzicht onder welke scenario's bepaalde projectalternatieven, inpassingsvarianten of ontwerpbeslissingen zichzelf terugverdienen door de mogelijkheden van o.a. uitgestelde vervanging (Meppelerdiep), latere aanpassing (Ramspol) of uitbreiding van capaciteit (snelwegvoorbeeld). De meerwaarde van beslisboomanalyse voor grote infrastructuurprojecten ligt in de toepassing op de meest kostbare knelpunten van deelprojecten, zoals bij viaducten en tunnels die zijn gelegen op knelpunten.

Beslisboomanalyse is een aanvulling op een gewone MKBA en is soms bewerkelijk. In veel gevallen zal de 'standaard' MKBA-opstelling echter een aanzienlijk deel van de benodigde informatie bevatten om een beslisboomanalyse op hoofdlijnen te kunnen uitvoeren. Bij een break-evenanalyse kan zonder de toewijzing van specifieke kansen soms voldoende inzicht worden verkregen in de waarde van flexibiliteit zonder de beslisboom in detail uit te werken.

Samengevat laten de casestudies zien dat:

- Extra hoge scenario's, niet-lineaire kosten en baten, nieuwe informatie en meerdere beslismomenten relevant zijn voor de analyse van reële opties;
- Flexibiliteitsopties kunnen worden geëvalueerd door middel van grafische beslisboomanalyse zonder toewijzing van kansen, met een break-evenanalyse of gevoeligheidsanalyse met verschillende kansen. Bij break-evenanalyse wordt de flexibiliteitsoptie niet expliciet gewaardeerd maar wel kwantitatief geëvalueerd, bij kans-gevoeligheidsanalyse wordt wel een indicatie van optiewaardes verkregen;

- Beslisboomanalyse geeft vooral inzicht als de analyse wordt geconcentreerd op een beperkt aantal alternatieven en de belangrijkste onzekerheden.
Beslisboomanalyse als grafische tool is niet geschikt voor analyse van grote aantallen alternatieven en combinaties van meerdere onzekerheden;
- Een evaluatie of waardering van flexibiliteitsopties door beslisboomanalyse nuttig kan zijn in diverse stadia van de besluitvorming.

4 Beslisboomanalyse versus andere reële optiemethoden

4.1 Inleiding

In dit hoofdstuk worden vier andere reële optiemethoden²⁷ beschreven en vergeleken met de beslisboommethodiek, zoals die is toegepast in deze notitie. De vier andere reële optiemethoden zijn:

- Continue contingent claims methoden, o.a. de Black-Scholes formule.
- Discrete contingent claims methoden, o.a. het binomiale model van Cox, Ross en Rubinstein.
- Investeringsoptimalisatie met dynamisch programmeren ('dynamisch programmeren').
- Monte-Carlosimulatie.

De werking en achtergrond van bovenstaande methoden is niet eenvoudig en daarom is het lezen van de paragrafen 4.2 (beschrijving van de methoden), 4.3 (bruikbaarheid van de methoden) en 4.4 (toepassing van de methoden op de casestudie Twentekanalen) tijdrovend. De snelle lezer kan volstaan met het lezen van de conclusies van dit hoofdstuk in sectie 4.5. Bijlage D geeft een nadere toelichting op de bruikbaarheid van de verschillende reële optiemethoden.

4.2 Beschrijving van reële optiemethoden

4.2.1 Continue contingent claims methoden

Met contingent claims methoden in continue tijd, kortweg continue contingent claims, wordt de waarde van een financiële of reële optie bepaald op basis van formule met enkele variabelen.

²⁷ Er zijn diverse andere indelingen van reële optiemethoden in de literatuur in omloop. In onze indeling is vooral gekeken naar verschillen in gebruiksgemak en de gebruikte aannames. Nadere toelichting op onze indeling is te vinden in Lander en Pinches (1998, bespreking van de voordelen van eenvoudige beslisboomanalyse en de praktische nadelen van andere methoden), Hé (1990, over convergentie van contingent claims modellen in discrete en continue tijd), Insley en Wirjanto (2010, voor een vergelijking van contingent claims en dynamisch programmeren) en Boyle (1977, over Monte-Carlosimulatie voor optiewaardering).

Uitleg Black-Scholes formule.

Een financiële calloptie geeft het recht maar niet de verplichting om een aandeel tegen een vooraf afgesproken prijs te kopen, de zogenaamde uitoefenprijs (K). Europese callopties hebben een vast uitoefenmoment (T), dat wil zeggen een enkel moment in de toekomst waarop de optie kan worden uitgeoefend. De Black-Scholes formule voor de prijs $O(S, t)$ van een Europese calloptie wordt gegeven door (Black en Scholes, 1973):

$$O(S, t) = SN(d_1) - ce^{r(t-T)}N(d_2), \quad (4.1)$$

waarin:

$$d_1 = \frac{\ln \frac{S}{K} + \left(r + \frac{1}{2}\sigma^2\right)(T - t)}{\sigma\sqrt{T - t}}, \quad (4.2)$$

$$d_2 = \frac{\ln \frac{S}{K} + \left(r - \frac{1}{2}\sigma^2\right)(T - t)}{\sigma\sqrt{T - t}}. \quad (4.3)$$

In deze formule is S de huidige prijs van het aandeel. De huidige datum wordt gegeven door t . De tijd tot uitoefening is dus $T - t$. Verder wordt de jaarlijkse standaarddeviatie van het koersrendement gegeven door σ en de risicovrije discontovoet door r . $N(\cdot)$ is de cumulatieve distributie van de standaard normale verdeling. Zie Black en Scholes (1973) voor onderliggende aannames.

Onderstaande tabel geeft de waarde van een Europese calloptie voor een aantal verschillende waarden van S en σ voor $K = 105$, $T - t = 3$ jaar en $r = 0,025$ resulterend uit de Black-Scholes formule. Dit illustreert dat:

Tabel 4.1 getallenvoorbeeld Black-Scholes.

	$S = 92,5$	$S = 97,5$	$S = 102,5$
$\sigma = 0,1$	4,4	6,8	9,7
$\sigma = 0,5$	29,4	32,7	36,1

- Een optie heeft waarde ($O(S, t) > 0$), zelfs als dat bij directe uitoefening niet het geval is ($K - S \geq 0$), zolang de prijs van het aandeel volatiel is ($\sigma > 0$) en het uitoefenmoment in de toekomst ligt ($T - t > 0$);
- De waarde van de optie loopt op met de volatilititeit: de optie wordt meer waard als de onzekerheid toeneemt.

We leggen continue contingent claims methoden uit voor financiële opties. Daar vinden deze methoden hun oorsprong. Het meest bekende voorbeeld hiervan is de Black-Scholes formule (Merton, 1973; Black and Scholes, 1973; Merton, 1998). In bovenstaande box wordt de Black-Scholes formule uitgelegd. Met behulp van een getallenvoorbeeld illustreren we de toepassing ervan.

De Black-Scholes formule heeft betrekking op een financiële calloptie volgens de Europese stijl, dat wil zeggen een financiële optie die het recht maar niet de verplichting geeft om een bepaald aandeel te kopen op een vooraf vastgestelde datum tegen een vooraf gesproken bedrag. De optieprijs volgt uit: (i) de prijs van het

aandeel, (ii) de uitoefenprijs, dat wil zeggen de prijs waartegen het aandeel mag worden gekocht, (iii) de discontovoet, (iv) de volatiliteit van de prijs van het aandeel en (v) de tijd tot uitoefening van de optie. De prijsvolatiliteit van het aandeel maakt dat de prijs van de financiële optie niet nul is, zelfs niet wanneer de waarde nul is als deze onmiddellijk zou kunnen worden uitgeoefend. Als de prijs van het aandeel namelijk toeneemt voordat de optie is verlopen, dan kan de optiewaarde alsnog positief worden.

Een *uitgestelde* investering in infrastructuur is vergelijkbaar met een financiële calloptie: het recht maar niet de verplichting om later te investeren. De Black-Scholes-formule maakt daarbij een aantal strenge aannames (Benaroch en Kauffman, 1999; p. 76), waaronder constante volatiliteit, complete markten en de kansverdeling van de baten. Deze aannames zijn vaak omstreden. Dit bespreken we verderop in dit hoofdstuk.

Een voorbeeld van een toepassing: in de MKBA wordt een duurder investeringsalternatief vergeleken met het referentiealternatief. Nu is de vraag of het zinvol is om eerst te investeren in het referentiealternatief en eventuele uitbreiding naar het duurdere alternatief uit te stellen tot een later moment.

Als – met de nadruk op als – het investeringsproject voldoet aan de aannames van het Black-Scholesmodel, dient een invulling te worden gegeven aan de symbolen. In deze context hebben sommige symbolen in de formule een andere betekenis:

- S is niet langer de prijs van een aandeel, maar de Contante Waarde van de verwachte (bruto) batenstroom van het duurdere investeringsalternatief op dit moment;
- de uitoefendatum (T) is nu een tweede vooraf gedefinieerde investeringsmoment, waarop uitbreiding naar het dure alternatief zal worden overwogen indien direct voor het referentie-alternatief wordt gekozen;
- K is niet langer de uitoefenprijs van een financiële optie, maar vertegenwoordigt nu de niet-verdisconteerde kosten van de reële uitbreidingsoptie wanneer de tot uitbreiding wordt over gegaan op het tweede beslismoment (T). Dit zijn de extra kosten die moeten worden gemaakt als het referentiealternatief wordt uitgebreid naar het duurdere alternatief.

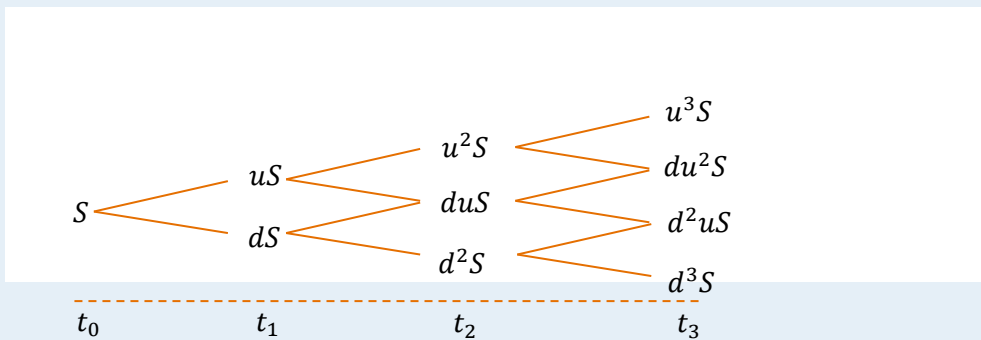
4.2.2 Discrete contingent claims methoden

Discrete contingent claims modellen worden wel 'lattice' ('raster') modellen genoemd. Het bekendste lattice model is het multiplicatieve binomiale model van Cox et al. (1979) voor het waarderen van *Amerikaanse* callopties in discrete tijd. De optie kan daarmee, in tegenstelling tot het eerder gepresenteerde Black-Scholes model, eerder worden uitgeoefend dan de uiterste uitoefendatum (T) van de calloptie. In dit model worden verschillende tijdstippen onderscheiden en na elke tijdstip kan de

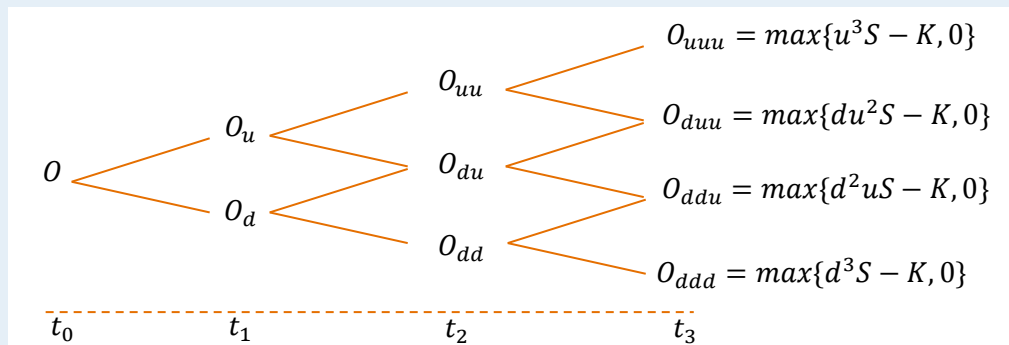
prijs van het aandeel toenemen of afnemen met een vaste factor. De prijs van de optie kan hieruit vervolgens worden afgeleid. Het binomiale model in onderstaande box zal niet hetzelfde resultaat opleveren als het Black-Scholes model; dit komt door het verschil in (call)optietype.

Uitleg binomiaal boommodel van Cox et al. (1979).

Een aandeel met prijs S op t_0 wordt verondersteld elke tijdstap toe te kunnen nemen met een factor u met kans P of af te nemen met een factor d met kans $(1 - P)$. De binomiale boom recombineert, wat wil zeggen dat de verschillende stappen omhoog en omlaag weer bij elkaar komen en niet tussen het 'raster' invallen.



De prijs van de optie op de verloopdatum $T = 3$ is direct duidelijk en is afhankelijk van de prijs van het aandeel op dat moment. Bijvoorbeeld: $O_{uuu} = u^3S - K$. De optieprijs op verschillende tijdstippen wordt als volgt weergegeven:



Om de prijs van de optie op t_2 af te leiden kunnen – onder bepaalde aannames - *risiconeutrale* kansen worden gebruikt. Deze zijn gedefinieerd door $Q := \frac{(1+r)-d}{u-d}$ en $1 - Q$, waarbij $Q \neq P$. De optieprijs in de voorgaande periode volgt vervolgens uit de som van de risico-vrij verdisconteerde mogelijke optieprijsen in de volgende periode vermenigvuldigd met de risicovrije kansen, bijvoorbeeld:

$$O_{uu} = \frac{Q O_{uuu} + (1 - Q) O_{duu}}{1 + r} \quad (4.4)$$

Wanneer alle mogelijke optieprijsen voor t_2 zijn uitgerekend kunnen vervolgens de mogelijke optieprijsen op t_1 op dezelfde wijze worden berekend. In een laatste iteratie volgt optieprijs op t_0 .

Er zijn ook andere varianten van het binomiale boommodel in omloop, bijvoorbeeld met een extra tak voor elke mogelijke verandering van de prijs van het onderliggende product (een 'trinomiaal' boommodel) en bomen waarbij de waarde van het onderliggende product niet multiplicatief maar additief wijzigt.

Net zoals bij het Black en Scholes-model kan het binomiale model in sommige gevallen direct zonder aanpassing van het standaardmodel worden toegepast om reële investeringsopties te waarderen. Dan moeten wel de restrictieve modelaanname van toepassing zijn, welke nagenoeg gelijk zijn aan die van het Black-Scholes-model (zie wederom Benaroch en Kauffman, 1999; p. 76). Dit betekent dat er weer een goed onderliggend product nodig is (complete marktaanname) die de verwachte projectbaten en de volatiliteit van deze (bruto) baten van het project beschrijft. Na het berekenen van de optiewaarden uit de binomiale boom (zie box in paragraaf 4.2) kan dan een beslisboom worden geconstrueerd en opgelost.

Een positieve optiewaarde betekent niet dat uitstel per definitie beter is. Alleen als de verwachte waarde van uitstel groter is dan van direct investeren, dan wordt de investering verder uitgesteld. Santos et al. (2014) laten zien hoe dit werkt bij toepassing van het binomiale model: stapsgewijs worden (bruto) optiewaarden berekend (p. 592), waaruit de optimale investeringsbeslissingen worden afgeleid (p. 593). Michailidis en Mattas (2007) is een voorbeeld van binomiale boomanalyse van investering in een dam. Het binomiale boommodel kan ook worden toegepast voor samengestelde reële opties (zie Copeland en Tufano, 2004; p.6).

Het binomiale boommodel van Cox et al. (1979) en andere lattice-modellen (discrete tijd contingent claims methoden) hebben in vergelijking met het Black-Scholes model (een continue contingent claims methode) twee voordelen:

- Eenvoudigere wiskunde: de waarde van de reële optie kan worden opgelost met eenvoudige rekenkundige berekeningen: optellen, aftrekken, delen, vermenigvuldigen. Kennis van hogere wiskunde in de vorm van partiële differentiaalvergelijkingen is hiervoor niet nodig.
- Algemener en flexibeler: Het model geeft bij dezelfde aannames en in de limiet, dat wil zeggen bij het opvoeren van het aantal tijdstappen, hetzelfde resultaat als een corresponderend continu model (zie Hé, 1990). Maar het model laat ook ruimte voor andere aannames, samengestelde opties en minder tijdstappen. Juist voor veel infrastructuuropties zal dit van belang zijn, bijvoorbeeld omdat herinvestering niet op elk moment in de tijd kan en infrastructuuropties zelden enkelvoudig zijn.

4.2.3 Dynamisch programmeren

Dynamisch programmeren (Bellman, 1954) is een oplossingsmethode voor een wiskundig probleem. Met behulp van deze methode kan bijvoorbeeld gegeven ex-ante ingeschatte toekomstige onzekerheid en de flexibiliteit die in de verschillende investeringsstrategieën aanwezig is, de optimale investering 'per tijdvak' en 'per scenario/ mogelijke toekomstige situatie' worden berekend (zie onderstaande box).

Uitleg dynamisch programmeren.

Dynamisch programmeren is een methode om een optimale investeringsstrategie te bepalen. Het werkt als volgt.

Stel: in de MKBA zijn we op zoek naar een welvaart-optimale investeringsstrategie $(u_{t=0}, u_{t=1}, \dots)$, waarbij een investering in een jaar (u_t) kan worden toegevoegd aan het totaal van investeringen (x_t) . In de context van waterveiligheid zou x_t bijvoorbeeld de hoogte van een dijk kunnen zijn in jaar t in de toekomst en u_t een dijkverhoging in dat jaar. Het volgende kosten-batenprobleem moet worden opgelost:

$$NPV = \max_{u_t} \sum_{t=0}^{\infty} \frac{B(x_t, u_t) - C(x_t, u_t)}{(1 + \delta)^t} \quad (4.5)$$

Deze formule beschrijft dat de investeringsstrategie zo wordt gekozen dat de stroom van de verdisconteerde netto baten maximaal is. Hierin representeert $B(x_t, u_t)$ de baten van de dijk in het jaar t , bijvoorbeeld de vermijden overstromingsschade. Deze baten hangen in dit voorbeeld af van het totaal van voorgaande investeringen in de dijk (x_t) en de investeringsbeslissing in dat jaar (u_t) . Formeel kan dit worden geschreven als: $x_{t+1} = x_t + u_t$. De kosten van een dijkverhoging worden gegeven door $C(x_t, u_t)$. De kosten en baten worden verdisconteerd ($\delta > 0$).

Bovenstaand probleem kan moeilijk zijn om op te lossen, bijvoorbeeld wanneer het aantal investeringskeuzes groot is. Zo kan een dijk in één keer worden verhoogd met een meter, maar ook met kleinere ophogingen, bijvoorbeeld meerdere keren per eeuw.

Dit complexe investeringsprobleem kan worden opgelost door het 'in tijdsvakken' op te knippen en het deelprobleem per tijdvak op te lossen. Deze zogenaamde *recursieve* formulering van het kosten-batenprobleem is:

$$V_t(x) = \max_u \left(B(x, u) - C(x, u) + \frac{V_{t+1}(x_{t+1})}{(1 + \delta)} \right) \quad (4.6)$$

Hierin is $V_t(x)$ de zogenaamde waardefunctie. Deze functie geeft de netto batenstroom *vanaf* een bepaald jaar t voor verschillende dijkhoogtes. De netto baten van de dijk vanaf jaar t bestaan uit de netto baten in dit jaar $(B(x, u) - C(x, u))$ en de baten in de jaren erna, namelijk V_{t+1} . Hiermee kunnen vervolgens de optimale dijkhoogtes per deelprobleem en daarmee de totale oplossing worden bepaald.

Met dynamische programmeren kunnen niet alleen optimale investeringsstrategieën worden berekend, maar ook de waarde van flexibiliteit gegeven een bepaalde probleemstelling. Door de vrijheid in het modelleren van de probleemstelling zijn er

bovendien andere toepassingen mogelijk dan bij de eerder besproken contingent claims methoden. Ook worden geen replicating portfoliotechniek of een risico-neutrale waardering toegepast, wat kenmerkend is voor contingent claims methoden. Dat betekent dat er bij dynamisch programmeren wordt gewerkt met een exogene discontovoet zonder de veronderstelling van een complete markt toe te passen om risico-opslagen te bepalen (Dixit en Pindyck, 1994; p. 114, 120-124).

De methode is geschikt voor gedetailleerde kosten-batenoptimalisatie van grote investeringsvraagstukken, bijvoorbeeld voor het bepalen van optimale dijkhoogtes (Brekemans et al., 2012; van der Pijl en Oosterlee, 2012). Optimale oplossingen kunnen overigens ook worden uitgerekend met andere wiskundige methoden. Eijgenraam (2005) gebruikt hiertoe analytisch afgeleide formules voor het bepalen van optimale dijkhoogtes en Zwaneveld en Verweij (2014) gebruiken branch-and-cut methoden.

In de wetenschappelijke reële optieliteratuur wordt het berekenen van een optimale investeringsstrategie en de waarde van flexibiliteit vaak vereenzelvigd met dynamisch programmeren (Dixit en Pindyck, 1994; Huchzermeier en Loch, 2001; Kumbaroğlu et al. 2008; Insley en Wirjanto, 2010). Vandaar dat we deze methode 'optimalisatie met dynamisch programmeren' hebben genoemd. Alleen 'berekenen optimale investeringsstrategie' zou de lading ook dekken, wanneer de interesse alleen ligt in het bepalen van deze optimale strategieën.

Dynamisch programmeren kan worden gebruikt voor het identificeren van optimale investeringsstrategieën wanneer:

- Geen analytische oplossing voor het kosten-baten probleem bestaat.
- Het probleem niet geschikt is voor contingent claims methoden.
- Een gedetailleerde economische analyse van flexibele investeringsstrategieën is gewenst.

4.2.4 Monte-Carlosimulatie

Uitkomsten kunnen worden gesimuleerd door voor diverse onzekere kernvariabelen een kansverdeling te definiëren (Boardman et al., 2006; pp. 175-184). Op basis van een zeer groot aantal trekkingen uit deze kansverdelingen wordt vervolgens een einduitkomstendistributie verkregen. Deze einduitkomsten dienen vervolgens verdisconteerd te worden en gewogen om de waarde van een investeringsoptie te bepalen (Boyle, 1977). Deze laatste stap wordt in de praktijk voor reële optiewaardering niet vaak gedaan. In de MKBA waterveiligheid 21^e eeuw is bijvoorbeeld met Monte-Carlosimulatie een kansverdeling verkregen voor de economisch optimale overstromingskans (Deltares, 2011); hierbij is onder andere gerekend met verschillende discontovoeten. Maar de Monte-Carlosimulatie is in deze MKBA niet gebruikt voor het waarderen van opties.

Bij samengestelde opties kan het nodig zijn om simulatiemethoden te combineren met een optimalisatiemethode. Zhao et al. (2004) doen dit bijvoorbeeld in een studie over snelwegverbreding. Simulatie kan ook worden gebruikt voor kleinere investeringsproblemen, bijvoorbeeld om de waarde van flexibiliteit tussen twee ontwerpen te vergelijken (Deng et al., 2013). Simulatie-optimalisatiemethoden kunnen daarnaast grote investeringsvraagstukken aan van complexe systemen met meerdere onzekerheden, investeringsmogelijkheden en beslismomenten. Wel moeten dan alle aspecten van het vraagstuk correct worden vervat in wiskundige formules en kansverdelingen.

4.3 Praktische bruikbaarheid van reële optiemethoden

In dit rapport staat de praktische toepasbaarheid van de beslisboommethode centraal. Om dit te kunnen vergelijken met de praktische toepasbaarheid van andere reële optiemethoden gebruiken we vier criteria:

- Relatie met MKBA: is de methode gemakkelijk te integreren in een gewone MKBA met enkele alternatieven en een beperkte gevoeligheidsanalyse voor enkele onzekerheden?
- Transparantie en toegankelijkheid: zijn de methode en aannames begrijpelijk voor eindgebruikers die beperkte wiskundige kennis hebben? Zijn de vergelijkingen en berekeningen te volgen en de uitkomsten voor eindgebruikers handmatig na te rekenen?
- Eenvoud van implementatie: vereist de methode gespecialiseerd programmeerwerk? Of kan het gewoon in een spreadsheet (eventueel met standaard add-in maar zonder programmeerwerk)? Kan telkens dezelfde aanpak of formule worden gebruikt?
- Realisme: zijn de aannames plausibel? Geeft de methode bruikbare uitkomsten?

4.3.1 Relatie met MKBA, transparantie en toegankelijkheid

Ten aanzien van de eerste twee van bovenstaande criteria (relatie met MKBA²⁸ en transparantie & toegankelijkheid) bestaat een breedgedragen consensus dat eenvoudige beslisboomanalyse van de reële optieanalysemethoden de winnaar is. Dat de stap van een gewone MKBA naar een eenvoudige beslisboomanalyse het kleinst is ten opzichte van andere reële optiemethoden staat buiten kijf. Ook is een grafische beslisboomanalyse relatief transparant en toegankelijk voor een breed publiek. Daarbij zijn de resultaten relatief gemakkelijk na te rekenen en te gebruiken in publieke discussies. Bij de andere methoden zijn de aannames technisch en is de werking van de methoden complex; narekenen is dan ook niet goed mogelijk.

²⁸ Eenvoudige beslisboomanalyse wordt in tegenstelling tot contingent claims of dynamisch programmeren methoden al wel genoemd in de MKBA richtlijnen voor infrastructuur (OEI-leidraad, zie Eijgenraam et al., 2001; pp. 78-81). De nieuwe, meer algemene, leidraad voor MKBA (Romijn en Renes, 2012; p. 162) benadrukt dat toepassing van reële optieanalyse in theorie goed mogelijk is, maar dat er voor toepassing in de praktijk van MKBA's nog belangrijke struikelpunten zijn.

Het belang van volledige transparantie en toegankelijkheid moet wel wat worden genuanceerd. Het is niet strikt noodzakelijk om de principes van de reële optiemodellen te doorgronden om de resultaten op een goede wijze te kunnen gebruiken; zeker als een goede algemene toelichting aanwezig is over de voor- en nadelen van de gebruikte methode.

4.3.2 Eenvoud van implementatie

Het is niet vanzelfsprekend welke reële optiemethode het eenvoudigst is om uit te voeren. Een eenvoudige beslisboomanalyse is niet heel moeilijk te implementeren. Dit kan vaak op hoofdlijnen al met een bestaande MKBA. Contingent claims methoden zijn vaak ook niet heel moeilijk om te implementeren. Deze maken gebruik van een standaardmodel en de benodigde inputs voor het model, bijvoorbeeld volatiliteit, kunnen relatief eenvoudig worden geschat met historische data. Ook Monte-Carlosimulatie is in beginsel niet al te ingewikkeld indien geschikte software wordt gebruikt. Monte-Carlosimulatie kan bijvoorbeeld worden verricht met een add-in voor Excel ('At Risk'). In tegenstelling tot de andere methoden is er voor dynamisch programmeren geen standaard implementatie beschikbaar. Dynamisch programmeren is daarom meestal specialistisch en tijdrovend.

4.3.3 Realisme

De bruikbaarheid van verschillende reële optiemethoden valt of staat vooral met het laatste criterium: realisme. Een eenvoudige beslisboom kan maar een zeer beperkte hoeveelheid keuzes en scenario's grafisch weergeven. Eenvoudige beslisboomanalyse gaat erg gestileerd om met het beschikbaar komen van nieuwe informatie over de tijd, waaruit de verwachte waarde van informatie of opties kan worden berekend (Conrad, 1980). Er zijn daarbij diverse boomstructuren en vormen van onzekerheidsreductie mogelijk.²⁹ De indicatieve optiewaardering die kan worden verkregen op basis van een eenvoudige beslisboom is heel grof.

Contingent claims methoden

Veel reële opties zijn in essentie vergelijkbaar met (gestapelde) Amerikaanse callopties. Dit is het hoofdargument voor de toepassing van contingent claims methoden, zoals (variaties op) het binomiale boommodel van Cox et al. (1979).

Zowel discrete als continue contingent claims methoden hebben een belangrijke beperking voor de praktische toepassing op reële investeringsprojecten. Contingent claims methoden worden gekenmerkt door risico-neutrale prijswaardering (of risico-eliminatie). Hiervoor moet een duidelijke en actuele waarde van het onderliggende product beschikbaar zijn. Dit is bijvoorbeeld het geval bij mijninvesteringsprojecten (Cortazar en Casassus, 1998). Erts uit de mijn heeft immers op elk moment in de tijd

²⁹ Zie bijvoorbeeld Woodward et al. (2011) en De Bruin en Ansink (2011) voor voorbeelden bij investeringen rond overstromingsrisico's.

een prijs en deze prijs bepaalt de verwachte opbrengsten van een investering in de mijn. Hieruit volgt vervolgens de prijs van de optie om te mogen investeren in een mijn gegeven de kosten van de investering. Een ander voorbeeld is de waarde van een kantoorgebouw die afhangt van de waarde van de verwachte toekomstige verhuurprijzen (zie Poort et al., 2006). Een belangrijke beperking bij deze toepassing zijn de marktimperfecties, zoals grote leegstand van kantoorpanden en ondoorzichtige en vaak vertrouwelijke huurtarieven.

Duidelijke en actuele waardering van onderliggende variabelen bestaan niet altijd voor publieke infrastructuur, zoals wegen, viaducten, tunnels, bruggen, sluizen en dijken. We bespreken weg- en waterinfrastructuur apart, omdat er fundamentele verschillen in onzekerheden tussen deze twee soorten infrastructuur bestaan.

Contingent claims methoden bij weginfrastructuur

Reële optieanalyse van weginfrastructuur met contingent claims methoden is in beginsel mogelijk. In de literatuur zijn hiervan diverse voorbeelden te vinden, met name voor tolwegen (Zhao et al., 2004; Galera en Soliño, 2009). Hierbij ligt de nadruk op het private rendement gerelateerd aan de tolopbrengsten en niet op het publieke rendement in termen van bijvoorbeeld reistijdwinsten. Historische volatiliteit van wegverkeer is goed te schatten met historische wegverkeerdata. Ook zal in sommige gevallen deze volatiliteit wellicht in de toekomst niet zo heel snel veranderen, wat zou betekenen dat deze op middellange termijn constant kan worden verondersteld. Of de vereiste stochastische aannames verder recht doen aan onzekerheden in de in scenario's geschetste toekomstige ontwikkelingen, zoals de groei van steden bij snelwegprojectenproject, moet hierbij wel altijd onderwerp van discussie zijn. De ervaring leert dat de groei van individuele steden zeer moeilijk is in te schatten. De grootte van een stad is uiteraard een bepalende factor voor de drukte op de weg en daarmee de reistijdwinsten die mogelijk zijn.

Contingent claims methoden kunnen verder goed overweg met opeenvolgende uitbreidingsbeslissingen van wegen, zoals beslissingen over extra rijstroken. Het toepassen van deze methode wordt echter al snel complex bij meer ingewikkelde opties; bijvoorbeeld wanneer beslissingen over het aantal extra rijstroken gepaard gaan met aanpassing van kunstwerken. En in de praktijk is dit doorgaans het geval.

Meer in het algemeen kan worden gesteld dat contingent claims analyse bij wegen mogelijk is, vooral bij analyse van het private rendement van tolwegen. Maar de veronderstellingen van dit type analyse, zoals constante volatiliteit, zullen niet altijd van toepassing zijn.

Contingent claims methoden bij waterinfrastructuur

Voor veel waterinfrastructuur, bijvoorbeeld wanneer het gaat over waterkeringen, is de toepassing van contingent claims methoden minder geschikt. Dit komt doordat klimaatverandering voor waterinfrastructuur een van de belangrijkste onzekerheden

is en de effecten op overstromingsrisico's onzeker zijn. Hierdoor zijn de veronderstellingen van de contingent claims methoden niet realistisch.

Door klimaatverandering kunnen de kansverdelingen van bijvoorbeeld waterstanden niet langer constant worden verondersteld (Milly et al., 2008). De veranderingen van deze kansverdelingen over de tijd zijn bovendien erg onzeker. De stochastische aannames voor het waarderen van opties met contingent claims methoden zijn hierdoor vaak moeilijk verdedigbaar voor waterinfrastructuur. Dit wordt verder verergerd bij een stapeling van andere onzekerheden.

Daarnaast zijn de schattingen van relevante historische kansverdelingen en parameters gebaseerd op een beperkt aantal relevante observaties (zogenaamde extreme waarden). Hierdoor hebben ook de schattingen van historische volatiliteit een beperkte betrouwbaarheid.

De conclusie is dan ook dat de baten van waterinfrastructuur zeer onzeker zijn door de klimaatverandering. Dit is een groot probleem voor de praktische toepasbaarheid van contingent claims methoden op waterinfrastructuur.

Dynamisch programmeren

Bij dynamisch programmeren kunnen uiteenlopende modelbeschrijvingen worden gemaakt die het best aansluiten bij de praktijk en de te verwachten leereffecten of het ontbreken daarvan. In tegenstelling tot contingent claims methoden kan bovendien een oneindige tijdshorizon zonder onzekerheidsreductie of -oplossing worden bestudeerd.

Dynamisch programmeren heeft als nadeel dat er in vergelijking met de contingent claims methoden meestal een arbitraire vaste discontovoet wordt toegepast; dit is een overeenkomst met beslisboomanalyse. Voor het realisme is het een voordeel dat bij dynamisch programmeren veel verschillende aannames kunnen worden gemaakt. Net als bij beslisboomanalyse en contingent claims methoden is vervolgens wel de vraag hoe realistisch die aannames zijn.

Monte-Carlosimulatie

Bij Monte-Carlosimulatie zijn meerdere kansverdelingen nodig om uitkomsten te simuleren. Een voordeel voor het realisme is dat vele onzekerheden kunnen worden meegenomen en dat gekozen kan worden uit oneindig veel verschillende aannames voor de kansverdelingen. Ook hier is echter weer de vraag op basis waarvan de juiste kansverdelingen kunnen worden bepaald.

Geen harde scheidslijnen tussen verschillende methoden

De scheidslijnen tussen de verschillende reële optiemethoden zijn niet hard. Dit betekent ook dat de verschillen in realisme sterk samenhangen met de precieze manier waarop een reële optiemethode wordt toegepast. Bij de verschillende reële

optiemethoden veel verschillende aannames mogelijk. Bij eenvoudige beslisboomanalyse wordt bijvoorbeeld uitgegaan van minimaal twee beslismomenten om flexibiliteit te waarderen. Een eenvoudige beslisboom kan echter in principe worden uitgebreid naar N beslisperioden. Dan is deze niet meer te tekenen maar wel op te lossen. Dergelijke exercities eindigen al snel bij dynamisch programmeren of contingent claims methoden.

4.4 Illustratie reële optiemethoden voor casus Twentekanalen

De belangrijkste verschillen van deze methoden kunnen verder worden verduidelijkt door dit te illustreren met een concreet voorbeeld. We nemen hiervoor de verruiming van de Twentekanalen. Hiervoor is door Reitsma (2010) al een discrete contingent claims analyse gemaakt.

De bereikbaarheid van Twente voor grote schepen kan worden vergroot door verbreding en verdieping van de Twentekanalen. In een MKBA zijn diverse alternatieven met verschillende breedtes en dieptes van de verschillende delen van kanalen onderzocht (RWS, 2012, p.10). Ook is gekeken naar aanpassing van de sluis bij Eefde. In totaal zijn de kosten en baten van 8 projectalternatieven vergeleken met een referentiealternatief. Vier projectalternatieven vertoonden een positief MKBA-saldo ten opzichte van het referentiealternatief.

Hoe zou de analyse van de verruiming van de Twentekanalen eruitzien voor de vijf verschillende reële optiemethoden? Dit verkennen we op kwalitatieve wijze in de volgende vijf sub-paragrafen.

4.4.1 Eenvoudige beslisboomanalyse

Een beslisboomanalyse voor de Twentekanalen kan worden gebruikt om te bepalen of fasering van verruiming van de kanalen zinvol is. Hiervoor is een beslisboom met ten minste twee beslismomenten nodig. Deze kan worden gemaakt met de informatie uit de MKBA zoals dat ook bij de andere casestudies is gedaan.

Nadeel van een eenvoudige beslisboomanalyse voor deze casestudie is dat het grofmazige uitkomsten zal geven. Het aantal investeringsalternatieven is bij deze casus relatief groot. Wanneer extra beslismomenten worden geïntroduceerd zal de grafische beslisboom snel groeien, zeker wanneer deze worden gecombineerd met de in de MKBA uitgewerkte vier scenario's voor het binnenvaartvervoer.

Een gedetailleerde studie van de faseringstiming en kanaaldieptes zal een eenvoudige beslisboomanalyse in een grafische weergave daarom niet opleveren. Ook worden de leereffecten met een eenvoudige beslisboomanalyse gemodelleerd door middel van sprongsgewijze onzekerheidsreductie. Voor optiewaardering is dit een vereenvoudigde aanname, aangezien steeds nieuwe scheepvaartdata beschikbaar

komt. Eenvoudige beslisboomanalyse is geschikt voor nadere analyse van de meest kansrijke alternatieven, waarbij slechts naar een beperkt aantal alternatieven wordt gekeken.

4.4.2 Continue contingent claims methoden

Contingent claims methoden voor reële opties zijn ontwikkeld naar analogie van de waardering van financiële opties. Bij een financiële optie, zoals een optie om een aandeel over twee jaar te kopen, wordt de onderliggende investering (aandeel) en de financiële optie zelf regulier verhandeld op markten. Dit is duidelijk niet het geval bij verruiming van Twentekanalen: publieke investeringen als Twentekanalen worden in Nederland niet verkocht en hetzelfde geldt nog sterker voor de reële optie om de Twentekanalen te verruimen. Ook zijn de opbrengsten geen waarneembare geldstromen, zoals dividend, rente of tolopbrengsten, maar publieke baten. Volgens de MKBA betreft het hier vooral minder transportkosten en minder uitstoot van schadelijke gassen en roetdeeltjes (CO₂, NO_x, fijnstof); gemonetariseerd zijn de baten van minder uitstoot ongeveer 40% van de bespaarde transportkosten.

De Black-Scholes formule is gemaakt voor de waardering van enkelvoudige financiële opties. Wanneer deze wordt toegepast op verruiming van de Twentekanalen, geeft deze alleen een optiewaarde voor een enkele uitstelbeslissing, bijvoorbeeld straks het geheel van de Twentekanalen verruimen of een enkel specifiek deel.

Wat niet kan met deze formule is om zogenaamde gestapelde opties te waarderen, dat zijn opties op opties. Bij de Twentekanalen zijn een aantal logische combinaties van verruiming mogelijk in de tijd. Na verdieping van het eerste kanaal bestaat de optie om een volgend kanaal te verdiepen, met daarmee de optie om het volgende kanaal te verdiepen enzovoorts. Deze reeks van opties begint altijd bij de sluis van Eefde en eindigt bij de verdieping van de kanalen naar Enschede en Almelo. Dat betekent dat de optie tot latere uitbreiding van bepaalde kanalen alleen mogelijk als eerder is besloten om aanliggende kanalen reeds te verruimen.

4.4.3 Discrete contingent claims methoden

De verdieping van de Twentekanalen, als samengestelde uitsteloptie, kan worden bestudeerd met discrete contingent claims methoden, zoals het binomiale model (Herath en Park, 2002). Dit is gedaan door Reitsma (2010). De stochastiek van de projectbaten is hierbij geschat op basis van de standaarddeviatie van bulk transport naar Almelo, Enschede en Hengelo in de periode 1996-2006. De optiewaarden zijn bepaald als jaarlijks kan worden gekozen voor verruiming en als zelfs 10 keer per jaar kan worden gekozen. De reële optiewaarde is hoger als 10 keer per jaar kan worden gekozen, want dan is de timing van de flexibiliteit nauwkeuriger. De uitkomsten van deze analyse bestaat uit de optimale kanaalverruiming nu, de eventueel toekomstige verdiepingen en de waarde van flexibiliteit.

Voordeel van discrete contingent claims bij bestudering van de Twentekanalen is dat de stochastiek van de projectbaten, op basis van de volatiliteit van bulktransport, veel gedetailleerder kan worden meegenomen dan bij eenvoudige beslisboomanalyse.

Er zijn wel een aantal inhoudelijke kanttekeningen te plaatsen. In de studie van Reitsma (2010) wordt verondersteld dat toekomstige volatiliteit van het bulktransport hetzelfde blijft als in het verleden, wat kenmerkend is voor dit binomiale model. Ook wordt aangenomen dat toekomstige projectbaten ontwikkelen volgens een geometrische Brownian motion. Hiervoor ontbreekt echter bewijs. De resultaten die worden verkregen met contingent claims methoden zijn gevoelig voor deze aannames.

Praktisch nadeel is dat de methode moeilijk communiceerbaar is, omdat de aannames een technisch karakter hebben. Het model gaat gestileerd om met de beslismomenten, de volatiliteit van de verwachte projectbaten en de onzekerheden, zoals de overstap naar grotere schepen en de ontwikkeling van containervaart. Een gevoeligheidsanalyse met alternatieve aannames over de diverse onzekerheden kan dan een oplossing zijn om beter zicht te krijgen op de robuustheid van de resultaten.

4.4.4 Dynamisch programmeren

Dynamisch programmeren kan worden gebruikt om optimale investeringsstrategieën voor verruiming van de Twentekanalen over de tijd af te leiden. De beslissing nu wordt gekoppeld aan optimale beslissingen in de toekomst, welke afhankelijk zijn van de dan beschikbare informatie.

Nadeel van dynamisch programmeren is dat kostenfuncties van kanaalinvesteringen moeten worden afgeleid uit de MKBA. De standaardinformatie in een MKBA is vaak niet gedetailleerd genoeg om deze nauwkeurig af te kunnen leiden, bijvoorbeeld omdat geen onderscheid wordt gemaakt tussen vaste en variabele kosten. Verder moet het model en de implementatie voor een groot deel steeds opnieuw worden opgebouwd, omdat het hier om maatwerk gaat. Dit in tegenstelling tot de standaard contingent claims modellen die zonder aanpassingen kunnen worden toegepast voor andere economische analyses.

Verder kan optimalisatie met dynamisch programmeren lange rekentijd hebben door het aantal kanaalgedeelten met elk ten minste twee 'state variables', diepte en breedte, en de meerdere onzekerheden, zoals bulktransport en overstap op grotere schepen. Rekentijdproblemen kunnen hierbij vaak worden opgelost, maar daarvoor is weer specialistische kennis en extra tijd vereist. Een laatste nadeel is de doorgaans vaste discontovoet, hoewel dit ook als een praktisch voordeel kan worden uitgelegd. In de huidige MKBA praktijk wordt ook met vaste discontovoeten gewerkt.

Dynamisch programmeren is gedetailleerder dan eenvoudige, grafische boomanalyse en is niet gebonden aan een beperkt aantal investeringsmomenten. Ook kan dynamisch programmeren nauwkeuriger invulling geven aan beschikbare scenario's. Tegenover deze voordelen staan echter implementatiekosten, terwijl de resultaten in hoofdlijnen niet veel hoeven af te wijken van de resultaten uit een eenvoudige beslisboomanalyse. Dit geldt des te sterker naarmate het aantal beslismomenten in een eenvoudige beslisboomanalyse verder wordt opgevoerd.

4.4.5 Simulatie

Voor analyse van verruiming van Twentekanalen komen elke nieuwe scheepvaartobservaties beschikbaar. Op basis van deze informatie kan worden besloten of een nieuw kanaal al dan niet moet worden verdiept.

Scheepvaartbewegingen en diverse andere onzekerheden kunnen worden gesimuleerd over de tijd om een uitkomstendistributie te verkrijgen, en daarmee optiewaarden van kanaalverdieping.

Simulatie heeft nadelen wat betreft de kosten voor het verzamelen van de benodigde inputgegevens. Dit betreft vooral de specificaties van de kansverdelingen over bijvoorbeeld de overstap op grotere binnenvaartschepen. Ook is het niet altijd mogelijk om deze kansverdelingen te definiëren.

Een nog geavanceerdere economische analyse combineert simulatie met een optimalisatiemodule, bijvoorbeeld met dynamisch programmeren. Het aardige hiervan is dat in tegenstelling tot eenvoudige beslisboomanalyse geen arbitraire beslismomenten hoeven te worden gedefinieerd en dat trend-vrije variatie in scheepvaartobservaties en andere factoren kunnen worden meegenomen in de timing van de verdieping van de kanalen. Voor de gevallen waarbij geen optimalisatie nodig is, is een voordeel van simulatie dat er minder specialistische werkzaamheden zijn dan bij contingent claims of dynamisch programmeren methoden.

Voor de simulatie van het toekomstig bulktransport kunnen de huidige data worden gebruikt en een of meer toekomstscenario's. Met simulatie kunnen bovendien meerdere onzekerheden worden meegenomen, bijvoorbeeld het verloop van de overstap op grotere schepen. Vervolgens dient ingeschat te worden wanneer welke investeringen van welke kanaalgedeelten op zijn plaats zijn. De baten van deze investeringen dienen te worden gesimuleerd. Op basis hiervan moet ingeschat worden wat de 'beste' omstandigheden zijn voor bepaalde investeringen. Ook kan inzicht worden verkregen welke ontwikkelingen cruciaal zijn voor de baten van de investeringen.

4.5 Conclusies vergelijking van methoden

Onderstaande tabel vat de beschrijvingen van de verschillende reële optiemethoden samen en geeft de voor- en nadelen.

Eenvoudige beslisboomanalyse zoals gepresenteerd in dit rapport kan relatief eenvoudig worden gecombineerd met een MKBA. Ook is de methode toegankelijk voor een breed publiek in vergelijking met andere reële optiemethoden. Daar staat tegenover dat de verkregen oplossingen grofmazig zijn door het beperkte aantal beslismomenten en de veranderingen in informatie. Ook gaat de methode gestileerd om met de kansen op deze veranderingen uit de beschikbare historische informatie.

De essentie van elke reële optiebenadering is hetzelfde: alle reële optiemethoden evalueren de waarde van flexibiliteit, werken met kans-aannames, verwachte waarden van uitkomsten en nieuwe informatie en alle methoden leiden latere beslissingen af op basis van eerder genomen beslissingen en de beschikbare informatie. Afhankelijk van de gekozen modelspecificaties zijn de verschillen tussen de methoden klein of zelfs afwezig. Zo kan het aantal beslismomenten bij een eenvoudige beslisboomanalyse worden opgevoerd en kunnen er eventueel risico-aangepaste discontovoeten worden gebruikt (bijlage C).

De methodevergelijking in dit hoofdstuk is hoofdzakelijk kwalitatief van aard. Voor een kwantitatieve vergelijking van resultaten of een vergelijking op basis van criteria als toegankelijkheid, transparantie en eenvoud van implementatie zouden de verschillende reële optiemethoden systematisch op een of meer identieke casestudies moeten worden toegepast.

Tabel 4.2 **Overzicht van reële optiemethoden met hun voor- en nadelen.**

Methode	Beschrijving	Voordelen	Nadelen
Eenvoudige beslisboom	Beslisboom met uitkomsten en kansen voor enkele toekomstscenario's en 1 of enkele beslismomenten. Waarde van de optie wordt bepaald door analyse van hele beslisboom of delen daarvan.	Praktisch, kan makkelijk worden gecombineerd met MKBA (vaste discontovoeten, enkele scenario's, startpunt vanuit 1 beslismoment). Transparante berekeningen en aannames.	Grofmazig met beperkt aantal keuzes en toekomstscenario's. Subjectieve kansen. Pragmatische aanname over nieuwe informatie. Beperkte stochastiek netto baten in de tijd.
Continue contingent claims methoden (o.a. Black-Scholes formule)	Waarde van optie wordt bepaald op basis van formule met enkele variabelen zoals de waarde van het onderliggende product, volatiliteit en de risicovrije rentevoet .	Waarde optie kan bij sommige veronderstellingen makkelijk worden bepaald. Beperkt aantal aannames. Nauwkeurige optiewaardering.	Veronderstellingen, zoals complete markt met duidelijke en actuele waarde over het onderliggende product, passen misschien niet bij specifieke infra-project. Moeilijke wiskunde. Vaste modelspecificaties.
Discrete contingent claims methoden (o.a. binomiale model Cox)	Een boom van de projectwaarde over de tijd op basis van de volatiliteit van de variabele die bepalend is voor de batenstroom. Uit deze boom worden beslissingen afgeleid en de waarde van de opties.	Eenvoudige wiskunde. Nauwkeurige optiewaardering. Algemener dan contingent claims model in continue tijd. Kan oplossing continu model benaderen.	Veronderstellingen zoals complete markt passen niet altijd bij specifieke infra-project. Implementatie is specialistisch werk. Uitkomsten kunnen moeilijk worden geverifieerd door eindgebruikers.
Dynamisch programmeren	De investeringskeuzes worden bepaald door deze op te knippen en de beste 'per tijdvak' te bepalen. Zonder expliciete waardering van opties kunnen de beste investeringskeuzes worden gemaakt.	Gedetailleerd. Geschikt voor grote investeringsvraagstukken. Flexibele modelspecificatie.	Implementatie is maatwerk, specialistisch en tijdrovend en moeilijk te controleren door eindgebruikers. Vaak uitgevoerd met een constante discontovoet.
Monte-Carlosimulatie	Onzekerheden worden gesimuleerd op basis van verschillende kansverdelingen voor belangrijke variabelen. De waarde van de optie wordt bepaald op basis van deze uitkomsten.	Geschikt voor complexe investeringsprojecten met samengestelde opties en veel onzekere variabelen. Transparant. Simulatie van mogelijke uitkomsten kan in een spreadsheet.	Veel aannames voor kansverdelingen nodig. Verdeling van mogelijke uitkomsten is vaak niet voldoende voor de waardering van flexibiliteit en investeringsselectie. Implementatie is soms specialistisch werk.

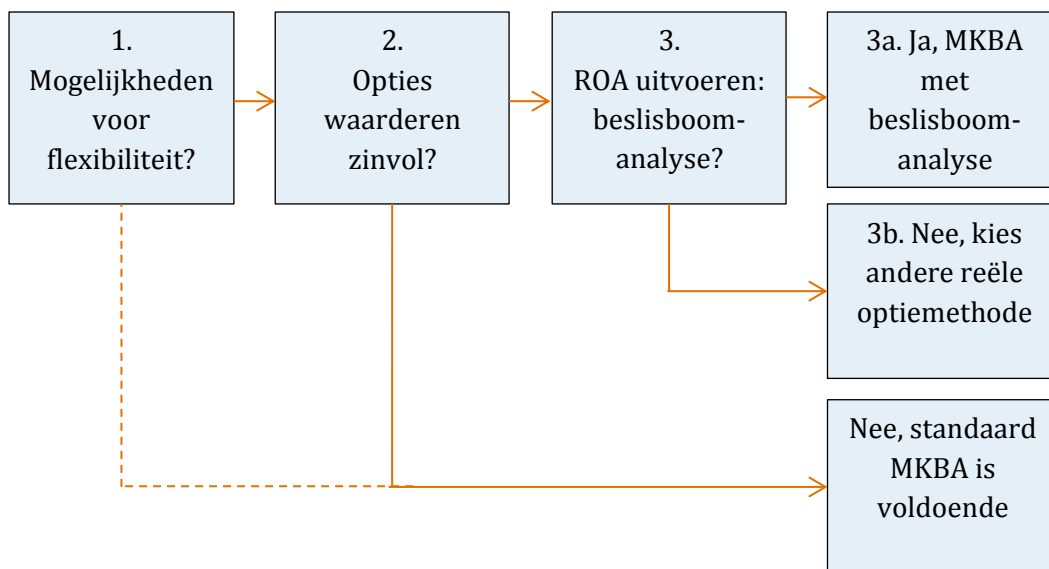
5 Stappenplan voor reële optieanalyse in MKBA infrastructuur

In dit onderzoek is de praktische toepassing van reële optieanalyse uitgewerkt. In hoofdstuk 1 worden drie stappen onderscheiden voor de praktische toepassing van de reële optiebenadering binnen een MKBA.³⁰ Deze drie stappen staan hieronder nogmaals weergegeven. Elke stap is geformuleerd als een vraag. Alleen bij een bevestigend antwoord op de vraag, hoeft verder gegaan te worden:

1. Zijn er mogelijkheden voor flexibiliteit?
2. Is het zinvol om een reële optieanalyse met waardering uit te voeren?
3. Is beslisboomanalyse hiervoor geschikt?

Deze drie stappen zullen we eerst kort toelichten. Daarna wordt uitgelegd hoe een beslisboomanalyse kan worden verricht. Hiertoe wordt een aanvullend stappenplan gepresenteerd om een beslisboomanalyse uit te werken.

Figuur 5.1 Beslisdiagram voor combineren MKBA met beslisboomanalyse.



³⁰ Deze stappen zijn algemener geformuleerd dan in de vorige CPB-studie naar reële opties (Bos en Zwaneveld, 2014).

5.1 Stap 1: Mogelijkheden voor flexibiliteit?

Voor de toepassing van reële optie-methoden is het allereerst noodzakelijk om te bepalen of en welke mogelijkheden er zijn voor flexibiliteit. Een uitgebreide set met voorbeelden van flexibiliteit bij investeringen in natte infrastructuur is te vinden in Tabel 1.1. De opties voor flexibiliteit kunnen in drie categorieën worden ingedeeld:

- Soort maatregel (wat en hoe?);
- Timing (wanneer?);
- Schaal (hoe groot, hoe veel?).

Soort maatregel

Om een specifiek probleem op te lossen zijn vaak diverse oplossingen en uitvoeringen mogelijk. Autoverkeer kan bijvoorbeeld een rivier oversteken via een pont, een brug, een viaduct of een tunnel. En voor elk van deze oplossingen zijn weer verschillende ontwerpen en materiaalkeuzes mogelijk. Al dergelijke verschillende maatregelen en uitvoeringen kunnen leiden tot verschillen in de mate van flexibiliteit en levensduur. Ook kan door het combineren van verschillende maatregelen flexibiliteit worden vergroot en risico's worden verkleind. Aanleg van een weg kan bijvoorbeeld worden gecombineerd met reservering van ruimte voor wegverbreding. Als het autoverkeer sterk toeneemt kan ook aan combinatie met beprijzing worden gedacht, bijvoorbeeld tolheffing tijdens de spits. Meer flexibiliteit kan dus ook worden verkregen met dergelijke alternatieven voor de uitbreiding van infrastructuur.

Kennisontwikkeling en informatieverzameling kunnen als zelfstandige maatregelen worden gezien, maar kunnen ook onderdeel uitmaken van een (innovatief) investeringsproject. Met enige vertraging kan dit grote investeringsvoordelen door besparing op kosten of extra baten opleveren. De waarde hiervan is echter vaak wel moeilijk te waarderen.

Timing

Een van de meest voorkomende opties voor flexibiliteit is aanpassing van timing. Is het bijvoorbeeld mogelijk om de voorgenomen investering(en) uit te stellen? Of is het mogelijk in de toekomst extra te investeren of van investering(en) af te zien bij nieuwe inzichten?

Schaal

Bij investeringen in infrastructuur kan ook veel worden gevarieerd in schaal, bijvoorbeeld het aantal rijstroken, de grootte en breedte van een brug en de breedte en diepte van een kanaal.

Wanneer het duidelijk is dat er geen noemenswaardige flexibiliteit is (geen van bovenstaande opties) dan is het overbodig om een MKBA uit te breiden met een studie van reële opties.

5.2 Stap 2: Opties waarderen zinvol?

In eerdere studies (bijvoorbeeld Stratelligence, 2012 en Bos en Zwaneveld, 2014) is reeds uitgebreid beschreven dat een flexibiliteitsstudie met waardering van reële opties meerwaarde kan hebben, maar dat dat zeker niet altijd het geval is.

Bij de keuze tussen verschillende projectalternatieven heeft waardering van reële opties meerwaarde als geen sprake is van een no regret-alternatief, dat wil zeggen een alternatief dat bij alle toekomstscenario's de voorkeur verdient. Hierbij moet niet alleen worden gekeken naar gematigde scenario's met een grote waarschijnlijkheid, maar ook naar extra hoge scenario's met een beperkte kans. Relatief goedkope opties of opties met mogelijk zeer hoge baten kunnen namelijk ook rendabel zijn bij scenario's met een kleine kans, vooral wanneer in dergelijke scenario's de baten of bespaarde kosten exponentieel toenemen in vergelijking met de meer gematigde scenario's. Een belangrijk voorbeeld van een no regret-alternatief kan uitstel of fasering zijn als dit vrijwel kosteloos kan, dat wil zeggen zonder vrijwel enig verlies van toekomstige baten of zonder grote extra investeringskosten door het uitstel of de fasering.

Als er veel spreiding mogelijk is in de uitkomsten, zal het investeren in een goede analyse van de waarde van flexibiliteit een belangrijk verschil kunnen maken op de verwachte kosten. Als er weinig spreiding in de uitkomsten is, maakt kennelijk de keuze van het investeringsalternatief weinig uit en zullen daarom ook de voordelen van reële optieanalyse beperkt blijven.

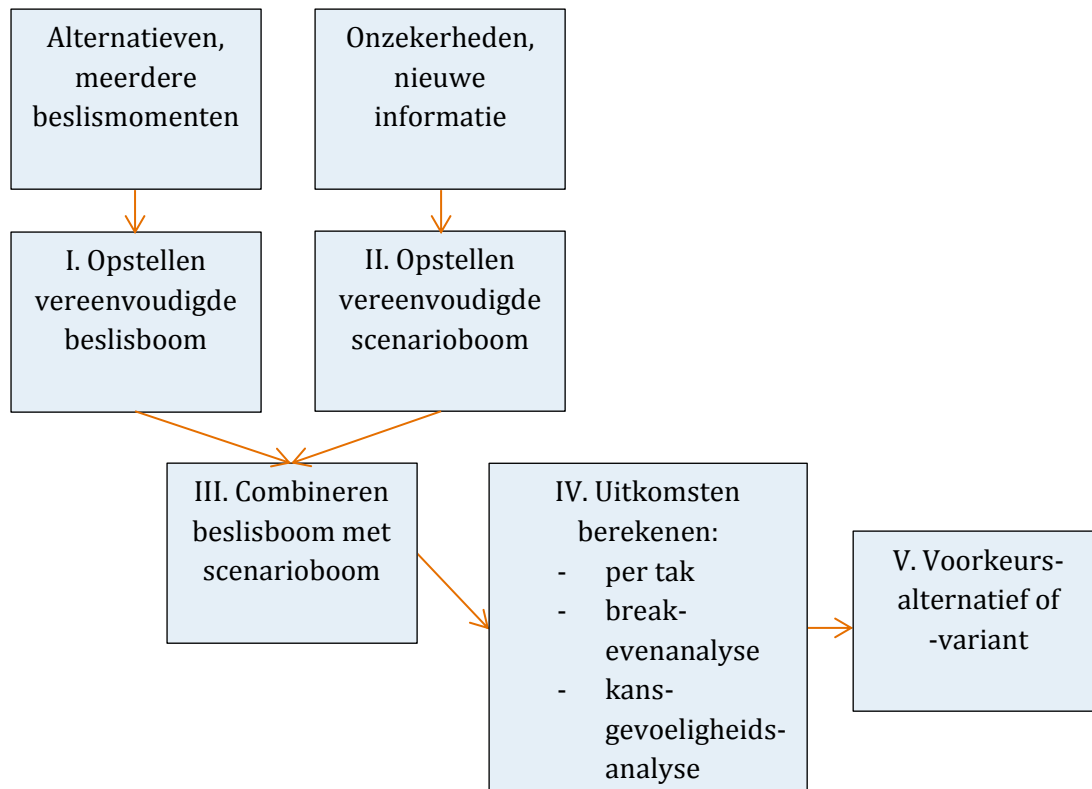
Bij een innovatief kennis- en leerproces zijn de directe spin-offs in termen van kostenbesparing of extra opbrengsten vaak onduidelijk. Dit maakt het moeilijker hier een goede waardering van de baten van experimenteren en onderzoek aan te geven. Hetzelfde geldt in principe voor alle niet-monetaire kosten en baten.

5.3 Stap 3: ROA uitvoeren

Als duidelijk is dat het probleem geschikt is voor ROA, moet worden besloten of het probleem kan worden geanalyseerd met beslisboomanalyse of een andere reële optiemethode (zie hoofdstuk 4).

Figuur 5.2 presenteert een stappenplan voor de implementatie van een eenvoudige beslisboomanalyse. Let wel: deze is alleen nodig wanneer het zinvol lijkt om deze uit te voeren en een keuze is gemaakt voor beslisboomanalyse (dat wil zeggen stappen 1-3; figuur 5.1). Onderstaande figuur vat het stappenplan samen dat kan worden gebruikt bij de uitwerking van een beslisboomanalyse.

Figuur 5.2 Stappenplan eenvoudige beslisboomanalyse.



In de eerste stap van bovenstaand stappenplan worden alle beslissingen in kaart gebracht. Dat zijn niet alleen de investeringsalternatieven, inpassingsvarianten en ontwerpen uit de MKBA, maar ook de opties voor flexibiliteit (uitstel van deelprojecten, latere aanpassingen van kunstwerken, uitbreiding van capaciteit enz.) en de momenten waarop deze nieuwe investeringen kunnen worden gedaan. Uit al deze beslissingen kan een grote / volledige beslisboom worden gemaakt. Daarna kan een vereenvoudigde beslisboom worden gemaakt met alleen de belangrijkste beslissingen, bij voorkeur met minimaal twee beslismomenten. Het maken van een grote beslisboom en eenvoudige beslisboom levert vaak nieuwe inzichten over het probleem en de mogelijke alternatieven, varianten en uitwerkingen. Dit leidt dan tot nieuwe beslisbomen. Het maken van de grote en eenvoudige beslisboom is daarom meestal een interactief proces waarin telkens nieuwe versies van deze beslisbomen worden gemaakt.

In de tweede stap wordt een vereenvoudigde scenarioboorn met alleen de belangrijkste onzekerheden gemaakt. Eerst worden alle onzekerheden en scenario's op basis van de MKBA in kaart gebracht. Ook worden meer extreme scenario's geanalyseerd en wordt kwalitatief benoemd welke nieuwe informatie met de tijd beschikbaar komt of kan komen (bijvoorbeeld nieuwe wegverkeer- en scheepvaartobservaties). Vervolgens kan worden bekeken wat de belangrijkste

onzekerheden zijn en of er combinaties van kunnen worden gemaakt. Hieruit kan tot slot een vereenvoudigde scenarioboorn worden opgesteld.

De derde stap combineert de beslisboom uit de eerste stap en de scenarioboorn uit de tweede stap.

In de vierde stap worden uitkomsten per tak berekend om inzicht te krijgen in de waarde van flexibiliteit zonder kansen. Daarna worden indien mogelijk kansen toegewezen voor gevoeligheidsanalyse of worden break-evenkansen berekend.

In de laatste stap kan de informatie uit de beslisboornanalyse (nogmaals) worden beschouwd bij het besluitvormingsproces rond de selectie van het betreffende voorkeursalternatief of -variant.

Voor het definiëren van beslismomenten en de tijdshorizon voor de beslisboornanalyse kunnen een aantal praktische vragen worden gesteld:

- Worden, kunnen of moeten er nu beslissingen over investeringen genomen? Dan vormt dit het 1^e beslismoment van de beslisboornanalyse.
- Is het technisch en functioneel mogelijk om de investering(en) uit te stellen? Zo ja, hoe lang ongeveer? Het antwoord geeft een mogelijk tweede beslismoment voor de beslisboornanalyse.
- Wat is een logisch tijdsinterval voor een nieuwe ronde van politieke besluitvorming over dit of nauw gerelateerde investeringsprojecten? Over 5, 10, 20 of 50 jaar?
- Zijn de technische levensduur van de investering (bijvoorbeeld een brug) gegeven en de kosten van de flexibiliteitsoptie (bijvoorbeeld van brugverhoging) bekend? Wanneer dit het geval is kunnen mogelijk uiterste uitoefeningsmomenten van de optie worden bepaald. Wanneer er geen duidelijk einde van de levensduur is (bijvoorbeeld bij dijken) is een eenvoudige beslisboornanalyse met enkele beslismomenten minder geschikt.
- Wanneer komt nieuwe informatie beschikbaar over belangrijke onzekerheden van het investeringsproject?

Referenties

Bellman, R., 1954, The Theory of dynamic programming, *Bulletin of the American Mathematical Society*, vol. 60(6): 503-515.

Benaroch, M., en R.J. Kauffman, 1999, A Case for using real options pricing analysis to evaluate information technology project investments, *Information Systems Research*, vol. 10(1): 70-86.

Black, F., en M. Scholes, 1973, The pricing of options and corporate liabilities, *Journal of Political Economy*, vol. 81(3): 637-654.

Boardman, A. E., D. H. Greenberg, A. R. Vining, en D. L. Weimer, 2006, *Cost-benefit analysis: concepts and practice*, Upper Saddle River, Pearson.

Bos, F. en P. Zwaneveld, 2014, Reële opties en de waarde van flexibiliteit bij investeringen in natte infrastructuur; Lessen op basis van de vervangingsopgaven rondom het Volkerak- Zoommeer en de Grevelingen, Den Haag, CPB.

Bos, F., Pol, T.D. van der en P. Zwaneveld, 2016, Beter omgaan met onzekerheid in MKBA's infrastructuur, *Economisch Statistische Berichten*, vol. 101: 234-237.

Boyle, P.P., 1977, Options: A Monte Carlo approach, *Journal of Financial Economics*, vol. 4(3): 323-338.

Bozuwa, J., 2007, KBA ombouw Meppelerdiepkeersluis: Aanvullende analyse laag- en hoogwaterstremmingen, Eindrapport, Rotterdam, Ecorys.

Brekelmans, R., D. den Hertog, K. Roos, en C. Eijgenraam, 2012, Safe dike heights at minimal costs: The nonhomogeneous case, *Operations Research*, vol. 60(6): 1342-1355.

Bruin, K. de, en E. Ansink, 2011, Investment in flood protection measures under climate change uncertainty, *Climate Change Economics*, vol. 2(4): 321-339.

CBS, 2014, CBS Bevolkingsprognose over 2014-2060, <http://www.nationaalkompas.nl/bevolking/toekomst>.

Conrad, J. M., 1980, Quasi-option value and the expected value of information. *The Quarterly Journal of Economics*, vol. 94(4): 813-820.

Copeland, T., en V. Antikarov, 2003, *Real options: A practitioner's guide*, New York, Texere.

- Copeland, T., en P. Tufano, 2004, A real-world way to manage real options, Harvard Business Review.
- Cortazar, G., en J. Casassus, 1998, Optimal timing of a mine expansion: Implementing a real options model, *The Quarterly Review of Economics and Finance*, vol. 38(3, Part 2): 755-769.
- Cox, J.C., S.A. Ross, en M. Rubinstein, 1979, Option pricing: A simplified approach. *Journal of Financial Economics*, vol. 7(3): 229-263.
- Deltares, 2011, Maatschappelijke kosten-batenanalyse waterveiligheid 21e eeuw, Deltares.
- Deng, Y., M.A. Cardin, V. Babovic, D. Santhanakrishnan, P. Schmitter, en A. Meshgi, 2013, Valuing flexibilities in the design of urban water management systems, *Water Research*, vol. 47(20): 7162-7174.
- Dixit, A.K. en R.S. Pindyck, 1994, Investment under uncertainty, Princeton, New Jersey, Princeton University Press.
- Eijgenraam, C.J.J., 2005, Veiligheid tegen overstromen: Kosten-batenanalyse voor Ruimte voor de Rivier, deel 1, Den Haag, CPB.
- Eijgenraam, C. J. J., C. C. Koopmans, P. J. G. Tang en A. C. P. Verster, 2001, Evaluatie van infrastructuurprojecten: leidraad voor kosten-baten analyse, Den Haag, CPB / NEI.
- Galera, A. L. L., en A. S. Soliño, 2009, A real options approach for the valuation of highway concessions, *Transportation Science*, vol. 44(3): 416-427.
- Huchzermeier, A., en C.H. Loch, 2001, Project management under risk: Using the real options approach to evaluate flexibility in R&D, *Management Science*, vol. 47(1): 85-101.
- He, H., 1990, Convergence from discrete- to continuous-time contingent claims prices. *The Review of Financial Studies*, vol. 3(4): 523-546.
- Herath, H.S.B., en C.S. Park, 2002, Multi-stage capital investment opportunities as compound real options, *The Engineering Economist*, vol. 47(1): 1-27.
- Hoefsloot, N. en K. van Ommeren, 2006, 2nd opinion KBA Ramspolbrug, Decisio.
- Hogarth, R.M., en H. Kunreuther, 1995, Decision making under ignorance: Arguing with yourself, *Journal of Risk and Uncertainty*, vol. 10(1): 15-36.

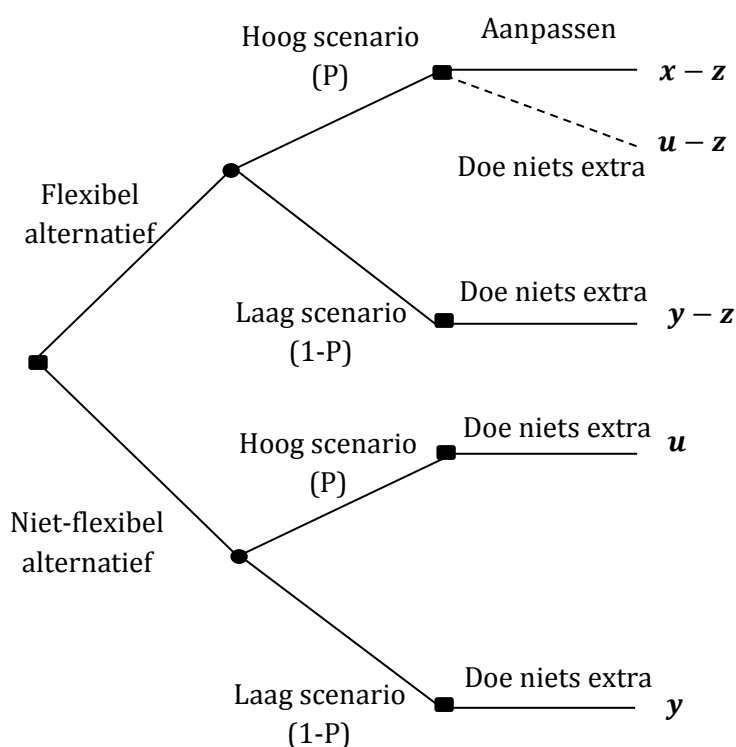
- Insley, M.C., en T.S. Wirjanto, 2010, Contrasting two approaches in real options valuation: Contingent claims versus dynamic programming, *Journal of Forest Economics*, vol. 16(2): 157-176.
- IPCC, 2014, Climate change 2014 synthesis report: Summary for policymakers, Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core writing team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland.
- Kumbaroglu, G., R. Madlener, en M. Demirel, 2008, A real options evaluation model for the diffusion prospects of new renewable power generation technologies. *Energy Economics*, vol. 30(4): 1882-1908.
- Lander, D.M., en G.E. Pinches, 1998, Challenges to the practical implementation of modeling and valuing real options, *The Quarterly Review of Economics and Finance*, vol. 38(3, Part 2): 537-567.
- Merton, R.C., 1998, Applications of option-pricing theory: Twenty-five years later, *The American Economic Review*, vol. 88(3): 323-349.
- Merton, R.C., 1973, Theory of rational option pricing, *The Bell Journal of Economics and Management Science*, vol. 4(1): 141-183.
- Ministerie van Infrastructuur en Milieu, 2012, Structuurvisie Infrastructuur en Ruimte: Nederland concurrerend, bereikbaar, leefbaar en veilig.
- Milly, P.C.D., J. Betancourt, M. Falkenmark, R.M. Hirsch, Z.W. Kundzewicz, D.P. Lettenmaier, and R.J. Stouffer, 2008, Stationarity is dead. *Science*, vol. 319(5863): 573-574.
- Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 2008, Werkwijzer OEI bij MIT-planstudies; hulpmiddel bij het invullen van de formats.
- Michailidis, A., en K. Mattas, 2007, Using real options theory to irrigation dam investment analysis: An application of binomial option pricing model, *Water Resources Management*, vol. 21(10): 1717-1733.
- Pijl, S.P. van der, en C. W. Oosterlee, 2012, An ENO-based method for second-order equations and application to the control of dike levels. *Journal of scientific computing*, vol. 50(2): 462-492.
- Poort, J., J. Hoo en J. W. Velthuisen, 2006, Opties op de Zuidas, Amsterdam, SEO.
- Romijn, G. en G. Renes, 2012, Algemene leidraad voor maatschappelijke kosten-batenanalyse, Den Haag, CPB & PBL.

- Reitsma, R., 2010, Valuation of real options in infrastructure projects: The cases of broadening the A27 highway and deepening the Twente canals. MSc thesis.
- RWS, 2006, Kentallen KBA Dimensionering Ramspolbrug: Brughoogte, wegprofiel en bedieningsregime, Rijkswaterstaat.
- RWS, 2008, Projectnota ombouw Meppelerdiepkeersluis tot schutsluis: Onderdeel van de MIT Planstudie Vaarweg Meppel - Ramspol, Arnhem, Rijkswaterstaat.
- RWS, 2012, Hoofdrapport voorkeursalternatief: Verruiming Twentekanalen fase 2.
- Santos, L., I. Soares, C. Mendes, en P. Ferreira, 2014, Real options versus traditional methods to assess renewable energy projects. *Renewable Energy*, vol. 68: 588-594.
- Schwartz, E.S. en L. Trigeorgis, 2001, *Real options and investment under uncertainty : classical readings and recent contributions*, Cambridge, The MIT Press.
- Snelder, M., A.P.M.Wagelmans, J.M.Schrijver, H.J.van Zuylen, en L.H.Immers, 2007, Optimal redesign of the Dutch road network. *Transportation Research Record*, vol. 2029: 72-79.
- Stratelligence, 2012, Reële optieanalyse: Waardevolle aanvulling op het evaluatie-instrumentarium van het Ministerie van Infrastructuur en Milieu?, Leiden, Stratelligence.
- Walker, W.E., S.A. Rahman en J. Cave, 2001, Adaptive policies, policy analysis and policy making, *European Journal of Operational Research*, 128, pp. 282-289.
- Werkgroep discontovoet, 2015, Rapport werkgroep discontovoet 2015.
- Woodward, M., B. Gouldby, Z. Kapelan, S.T. Khu, en I. Townend, 2011, Real Options in flood risk management decision making, *Journal of Flood Risk Management*, vol. 4(4): 339-349.
- Zhao, T., S. Sundararajan, en C. Tseng, 2004, Highway Development Decision-Making under Uncertainty: A Real Options Approach., *Journal of Infrastructure Systems*, vol. 10(1): 23-32.
- Zwaneveld, P. en G. Verweij, 2014, Safe dike heights at minimal costs: An integer programming sprochen, Den Haag, CPB.

Bijlage A Beslisboom met break-evenanalyse

In paragraaf 2.3 en 3.4 is break-evenanalyse met een beslisboom toegepast. Deze analyse kan ook in algemene termen worden geformuleerd. We kijken nogmaals naar onderstaande beslisboom met twee beslismomenten.

Figuur A.1 Beslisboomanalyse met twee beslissingsmomenten, twee project alternatieven en twee toekomstscenario's.



De eerste beslissing in bovenstaande figuur omvat de keuze tussen een investering in een niet-flexibel alternatief of investering in een flexibel alternatief dat iets duurder (namelijk bedrag z) is dan het niet-flexibele alternatief. Denk bijvoorbeeld aan een dijkophoging zonder ruimtereservering (niet flexibel) en een dijkophoging met ruimtereservering (flexibel).

We gaan ervan uit dat beide alternatieven vooraf al in een MKBA zijn geanalyseerd en dat de uitkomsten onder de twee scenario's bekend zijn. De netto baten van het niet-flexibele alternatief zijn u bij een hoog scenario en y bij een laag scenario. De baten van het flexibele alternatief bij een hoog scenario zijn $x - z$ na aanpassing en $y - z$ bij het lage scenario. De aanpassingsoptie bij een investering in het flexibele alternatief heeft waarde onder realisatie van het hoge scenario wanneer $x > u$. Dit is het geval

wanneer de extra baten de kosten van aanpassing overtreffen. Niets extra doen is voor dit geval als een stippellijn weergegeven in de figuur. De boom kan verder worden uitgebreid met eventuele andere beslissingen door het toevoegen van extra takken.

De tweede beslissing vindt plaats nadat bekend is geworden welk toekomstscenario plaatsvindt. We nemen hier aan dat het flexibele alternatief met uitoefening van de aanpassingsoptie het beter doet onder het hoge scenario ($x - z > u$), maar dat het niet-flexibele alternatief het beter doet onder het lage scenario ($y > y - z$). Merk op dat de aanpassingsoptie niet wordt uitgeoefend onder het lage scenario. De waarde van de optie is dus 0 bij voltrekking van het lage scenario.

In dit voorbeeld is er geen investeringsoptie die het onder elk scenario beter doet: er is geen duidelijke winnaar en een no regret-alternatief bestaat daarom niet. Zoals eerder beschreven is dit een voorwaarde voor zinvolle uitbreiding van een MKBA met reële opties. We kijken nu formeel naar de minimale kans op het hoge scenario, dat wil zeggen de break-evenkans, die nodig is om investering in het flexibele alternatief te rechtvaardigen.

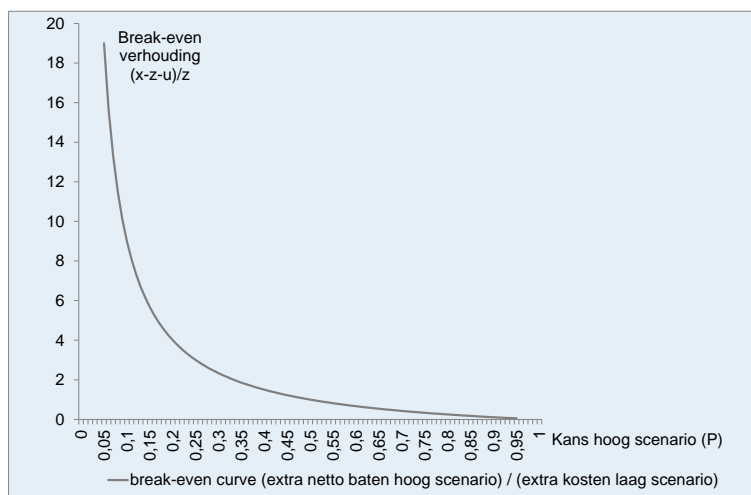
Een risico-neutrale economisch efficiënte beslissing wordt gegeven door investering in het alternatief dat de hoogste verwachte Netto Contante Waarde (NCW) heeft, mits deze groter is dan 0. In dit voorbeeld is de verwachte NCW voor het flexibele alternatief gelijk aan: $P(x - z) + (1 - P)(y - z)$. Voor het niet-flexibele alternatief is de verwachte NCW gelijk aan: $Pu + (1 - P)y$. De verwachte waarde van flexibiliteit is gelijk aan $P(x - u) - z > 0$. Dat wil zeggen dat de waarde van flexibiliteit positief is als de verwachte extra baten van het flexibele alternatief ($P(x - u)$) groter zijn dan de extra kosten van het flexibele alternatief (z).

Als de inschatting van de kansen onnauwkeurig is, dan kan het handig zijn om de formule aan te passen: welke kans rechtvaardigt precies de extra kosten en baten van het flexibele alternatief? Het break-evenpunt van deze kans kan worden geschreven als: $\frac{P}{1-P} = \frac{z}{x-z-u}$.³¹ In andere woorden: als de extra baten onder het hoge scenario ($x - z - u$) groot zijn ten opzichte van de extra kosten onder het lage scenario (z) en als de kans op het hoge scenario voldoende groot is (P), dan kan investering in het flexibele alternatief worden overwogen.

Bijvoorbeeld: als de kans op het hoge scenario op 'even waarschijnlijk als niet' wordt verondersteld (hier gedefinieerd als 33-66%, conform IPCC(2014)), dan is het een goed idee om het flexibele alternatief te implementeren als de extra baten onder het hoge scenario twee of meer keer zo groot zijn als de extra kosten (z) onder het lage scenario. De hele break-evencurve wordt weergegeven in onderstaande figuur.

³¹ Het break-evenpunt wordt gedefinieerd door: $P(x - z) + (1 - P)(y - z) = Pu + (1 - P)y$.

Figuur A.2 Break-evencurve voor relatieve verhoudingen van extra netto baten onder het hoge scenario en de kosten van flexibiliteit.



Bijlage B Kansverdeling toekomstscenario's

In deze studie wordt onderscheid gemaakt tussen drie manieren om te gaan met onzekerheid in een beslisboomanalyse, namelijk: zonder kansen, met een break-evenanalyse en met een kans-gevoeligheidsanalyse. Alleen voor een kans-gevoeligheidsanalyse is het nodig om kansen aan toekomstscenario's toe te kennen. Hoe kan dit worden gedaan? En op basis van welke informatie en veronderstellingen?

Voor een kans-gevoeligheidsanalyse kunnen soms schattingen van een onderliggende kansverdeling worden gebruikt. Veel mensen denken bij een kansverdeling aan een normale verdeling, maar deze verdeling past lang niet altijd bij de situatie. Bij de normale verdeling ligt 95% van observaties binnen twee maal de standaarddeviatie van het gemiddelde (en slechts 5% daar buiten). Bij kansverdelingen met dikkere staarten is dit echter veel minder waarschijnlijk.

Bij minder 'normale' en meer extreme kansverdelingen kan worden gebruik gemaakt van de ongelijkheid van Tsjebysjev.³² Deze geldt voor alle kansverdelingen en stelt dat maximaal $1/k^2$ van de kansverdeling meer dan k standaarddeviaties van het gemiddelde af kan liggen. Dit geeft dus een beeld van de maximaal mogelijke spreiding. Bij tweemaal de standaarddeviatie is dit een kwart van de kansverdeling, bij driemaal de standaarddeviatie is dit 11 procent van de kansverdeling en bij viermaal de standaarddeviatie is dit 6 procent van de kansverdeling. Uitgaande van een symmetrische kansverdeling zal dan de helft hiervan telkens aan de onderkant

³² https://nl.wikipedia.org/wiki/Pafnoeti_Tsjebysjev.

liggen en de andere helft aan de bovenkant. Deze vuistregels kunnen worden gebruikt om te bepalen welke (discrete) toekomstscenario's voldoende plausibel zijn om te worden meegenomen in de economische analyse.

Bij MKBA's zijn een laag en een hoog scenario, zoals van economische groei, demografie en klimaatontwikkeling, meestal aanwezig.³³ Dit kan dan ook de basis zijn om met behulp van veronderstellingen kansen en meer extreme scenario's te ontwikkelen. Stel dat kan worden aangenomen dat tussen het lage en het hoge scenario twee derde van de kansverdeling ligt. Uitgaande van de normale verdeling geeft dit een raming van het gemiddelde, namelijk het gemiddelde van het lage en het hoge scenario. Ook geeft deze veronderstelling dan een raming van de standaarddeviatie, aangezien de afstand van het gemiddelde tot het lage of hoge scenario dan gelijk is aan 1 maal de standaarddeviatie. Een extra laag of extra hoog scenario kan dan gelijk worden gesteld aan het gemiddelde minus (of plus) twee of drie maal de geschatte standaarddeviatie.

Kansen kunnen ook worden toegewezen op basis van de ongelijkheid van Tsjebysjev en een laag en hoog scenario. Op basis van het lage en hoge scenario kan een gemiddeld scenario ('midden-scenario') worden bepaald. Deze zal de grootste kans hebben. Zowel het lage als het hoge scenario krijgen dan lagere kansen toegewezen dan het midden-scenario. Stel dat er 12,5% kans is dat het werkelijke scenario onder het lage en 12,5% boven het hoge scenario zit (2 standaarddeviaties). Het lage scenario vertegenwoordigt dan ruwweg 25% van de distributiewaarden en het hoge scenario ook 25%; het midden-scenario krijgt vervolgens een kans van 50%.

Bij een dikke staartverdeling kunnen relatief kleine kansen worden toegewezen aan de meer extreme scenario's. Er kan bijvoorbeeld worden gedacht aan 60-30-10% bij 3 scenario's of 55-30-10-5% bij 4 scenario's.

Het toewijzen van kansen aan specifieke scenario's voor het doel van beslisboomanalyse is niet altijd mogelijk. Een alternatieve manier voor het maken van een beslisboomanalyse is dan het gebruik van een waarschijnlijkheidsindicatie voor de interpretatie van de resultaten van beslisboomanalyse met een break-evenanalyse (zie ook voorgaande bijlage en sectie 3.4). De IPCC (2014) definieert bijvoorbeeld waarschijnlijkheidsklassen: zo goed als zeker (99-100%), zeer waarschijnlijk (90-100%), waarschijnlijk (66-100%), even waarschijnlijk als niet (33-66%), onwaarschijnlijk (0-33%), zeer onwaarschijnlijk (0-10%) of exceptioneel onwaarschijnlijk (0-1%). Eventueel kunnen dergelijke klassen worden aangepast om kans-overlap tussen klassen te vermijden.

³³ Dit is sinds 2008 verplicht voor kosten-batenanalyses in het kader van het Meerjarenprogramma Infrastructuur en Transport van de rijksoverheid (zie Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 2008).

Bijlage C Discontovoet en aangepaste risico-opslag

In deze bijlage berekenen we nogmaals de waarde van de brugverhogingsoptie uit de casestudie over de Ramspolbrug. Nu berekenen we de waarde van de optie echter met een risico-aangepaste discontovoet voor deze optie in plaats van met een standaard risico-opslag. Hierbij wordt rekening gehouden met het verschil in risico tussen de optie en het niet-flexibele alternatief.

De aangepaste discontovoet wordt afgeleid door middel van een waarderingstechniek, waarin het risicoprofiel van het inflexibele alternatief wordt gebruikt om andere risico-opslagen af te leiden. In de klassieke optietheorie is het gebruikelijk om risico-opslagen van een optie aan te passen aan het risico van de optie (Cox et al., 1979).

In de uitwerking van de casestudies in de hoofdtekst en in de basisberekening in deze bijlage wordt uitgegaan van de in Nederland gebruikte standaard discontovoet van 5,5% (voor een nadere toelichting, zie Bos en Zwaneveld, 2014, paragraaf 2.4).³⁴ Dit is de som van een vaste risicovrije reële discontovoet en een algemene risico-opslag. De risicovrije rente was sinds 2007 vastgesteld op 2,5%. De algemene risico-opslag weerspiegelt het macro-economische risico en was sinds 2003 vastgesteld op 3%. Daarbovenop moet in beginsel worden gerekend met een project specifieke risico-opslag; deze kan zowel hoger als lager zijn dan het gemiddelde macro-economische risico.

Waardering brugverhogingsoptie met risico-aangepaste discontovoet

De optie in de casus over de Ramspolbrug was om de brug in 2035 verder te verhogen tot 10 meter na een eerdere verhoging tot 7 meter doorvaarthoogte in 2006. Deze optie wordt nu gewaardeerd met een risico-aangepaste discontovoet.

Reële opties zijn meestal³⁵ risicovoller dan het inflexibele project en dienen daarom verdisconteerd te worden met een hogere risico-opslag dan het inflexibele project. Merk op dat het hier niet gaat om de vergelijking van het risico van het flexibele investeringsalternatief mét optie, met het risico van het inflexibele alternatief zonder optie. Het betreft hier het risico van de reële optie zelf in vergelijking met het risico van het inflexibele project.

³⁴ Tijdens het schrijven van dit rapport is een nieuwe kabinetsrichtlijn uitgevaardigd over het gebruik van discontovoeten. Deze is in deze bijlage niet meegenomen (Werkgroep discontovoet, 2015; p. 10). Wij gaan in deze bijlage dus nog uit van het 'oude' kabinetsvoorschrift.

³⁵ Net zoals financiële opties hebben reële opties een relatief groot down side risico. De waarde van een optie is immers nul wanneer deze niet wordt uitgeoefend. Wanneer bijvoorbeeld ruimte in een tunnel wordt gereserveerd voor latere wegwitbreiding maar deze niet wordt gebruikt heeft deze geen waarde meer.

Wanneer we bij het eerste beslismoment in 2006 zouden vastleggen om de brug hoe dan ook in 2035 verder te verhogen en we uitgaan van een risicovrije discontovoet van 2,5%, dan is de netto contante waarde negatief onder het hoge scenario (-27,8 miljoen euro) en positief onder het extra hoge scenario (12,9 miljoen euro). Het betreft hier alle kosten en baten vanaf het jaar 2035, teruggerekend naar het jaar 2035; zie de vierde kolom van onderstaande tabel C.1. We rekenen hier met de risicovrije discontovoet omdat wij theoretisch veronderstellen dat alle onzekerheid is verdwenen na het jaar 2035.

Tabel C.1 Toekomstige waarde van brugverhoging in 2035 onder vastlegging vooraf of onder de mogelijkheid tot afstel.

Scenario	TW baten	TW kosten	TW netto baten Vooraf vastgelegd	TW netto baten Uitsteloptie brugverhoging
	mln euro	mln euro	mln euro	mln euro
Hoog	12,2	40	-27,8	0
Extra hoog	52,9	40	12,9	12,9

Bovenstaande tabel (zie laatste kolom) laat zien dat onder het extra hoge scenario de brugverhogingsoptie wordt uitgeoefend: de netto contante waarde is dan positief. Onder het hoge scenario wordt de optie niet uitgeoefend. De netto contante waarde is dan negatief (-27,8 mln euro in de vierde kolom), waardoor de uitsteloptie geen waarde heeft in de laatste kolom onder het hoge scenario.

Het risico van de optie verschilt van het risico van het inflexibele project zelf. Wiskundig kan dit worden vastgesteld door te testen of het mogelijk is om de waarde van de brugverhogingsoptie (laatste kolom in tabel C.1) te vermenigvuldigen met een constante factor om de netto baten van het inflexibele project (een na laatste kolom in tabel C.1) onder alle scenario's te reproduceren. Dit is hier niet mogelijk.

Uit de risicovrije discontovoet (2,5%), de standaard risico-opslag op de baten (3%) en de scenariokansen kan een risico-aangepaste discontovoet worden afgeleid voor de brugverhogingsoptie door zgn. risico-neutrale kansen te berekenen. Het berekenen van risico-neutrale kansen is een gevolg van portfolioreplicatie waarmee financiële opties correct kunnen worden gewaardeerd (zie Copeland en Antikarov (2003; p. 101-106 voor een voorbeeld). Het is ook mogelijk om een aangepaste discontovoet te berekenen op basis van de portfolioreplicatie (zie Cox et al., 1979).

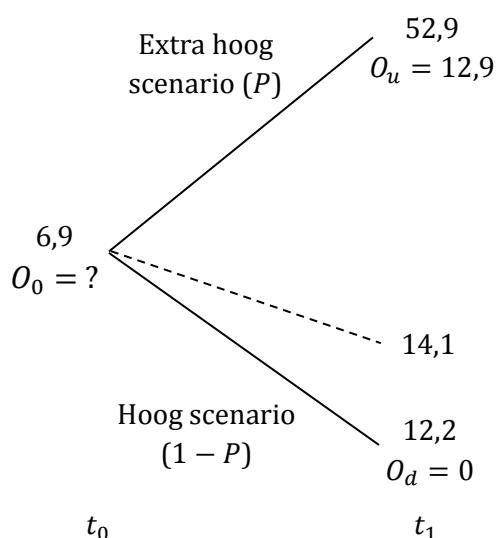
We illustreren beide methoden. Beide methoden geven hetzelfde antwoord en zijn gebaseerd op de wet van één prijs ('no arbitrage'): elk product kan volgens deze wet maar een enkele prijs hebben op elk moment in de tijd. Anders zou je geld kunnen

verdiene door een product met twee prijzen tegen de laagste prijs te kopen en onmiddellijk weer te verkopen tegen de hogere prijs.³⁶

We passen nu het binomiale model van Cox et al. (1979) met slechts twee perioden toe om de brugverhogingsoptie van de Ramspolbrug te waarderen met een risico-aangepaste discontovoet. Een rekenvoorbeeld is uitgewerkt in het overzichtswerk van Copeland en Antikarov (2003; pp.90-103).

De informatie die voor de berekening van risico-neutrale kansen nodig is, wordt samengevat in onderstaande figuur. Het bevat de verwachte bruto baten van het project samen op t_0 (2006) en de toekomstige baten onder het extra hoge en het hoge scenario op t_1 (2035), respectievelijk met subjectieve kans P en $1 - P$. De verhogingsoptie heeft een waarde van O_u of O_d in 2035 en is afhankelijk van het scenario.

Figuur C.1 Scenarioboom van de bruto baten van ophoging en de optiewaarden.



We gaan voor deze berekening uit van een hoge kans op het extra hoge scenario van 50% (P), en dus is de kans op het andere scenario (het hoge scenario) ook 50% ($1 - P$).³⁷

Allereest moeten we weten wat de verwachte baten van het niet-flexibele project zijn. De niet-verdisconteerde baten van het project bedragen 12,2 miljoen euro of 52,9 miljoen euro met beide 50% kansen. De contante waarde van de bruto baten volgt uit

³⁶ Dit heet rational pricing, wat inhoudt dat bij de correcte waardering van financiële opties geen mogelijkheden voor arbitragewinst ontstaan. Er bestaat natuurlijk geen financiële handel in Ramspolbrug-producten, maar van het inflexibele project is gegeven hoe de baten worden verdisconteerd. Deze discontovoet kan worden gebruikt om de optie te waarderen door te doen alsof de reële optie en het inflexibele project worden verhandeld. Deze aannames staan bekend als de Marketed Asset Disclaimer.

³⁷ Bij een kleinere kans wordt in dit geval de optiewaarde heel klein. Voor illustratiedoeleinden is hier gekozen is voor een hoge kans op het extra hoge scenario.

de standaard discontovoet van 5,5%: $\frac{1}{2} * 52,9 / 1,055^{29} + (1 - \frac{1}{2}) * 12,2 / 1,055^{29} = 6,9$ miljoen euro.

Figuur C.1 laat verder zien dat wanneer 6,9 miljoen euro risicovrij zou worden geïnvesteerd in 2006 tegen 2,5% reële rente per jaar, dit $6,9 * 1,025^{29} = 14,1$ miljoen euro waard is in 2035. Dit is het *zekerheidsequivalent* van een eenmalige uitbetaling in 2035 van ofwel 12,2 miljoen euro ofwel 52,9 miljoen euro (reëel) onder de gegeven scenariokansen.

Rekenschema 1: Copeland en Antikarov (2003) met risico-neutrale kansen

De waarde van de optie en de bijbehorende risico-aangepaste discontovoet voor deze optie volgt uit de volgende drie stappen (Copeland en Antikarov, 2003; p.90-103):

1. Bereken risico-neutrale kansen;
 2. Waardeer de optie;
 3. Bepaal de bijbehorende risico-aangepaste discontovoet.
1. De eerste stap is berekening van de risico-neutrale kansen: Uit de verwachte bruto baten van het project wordt de risico-neutrale kans Q berekend voor het extra hoge scenario. De vraag die wordt beantwoord is:³⁸ als de investeerder risico-neutraal zou zijn, met welke (risico-neutrale) kansen wordt de verwachte waarde van het project gereproduceerd bij risico-vrije verdiscontering van de mogelijke uitkomsten? Dat is het geval bij een risico-neutrale kans Q waarvoor geldt: $Q * 52,9 + (1 - Q) * 12,2 / (1,025)^{29} = 6,9$. Hieruit volgt de risico-neutrale kans op het extra hoge scenario³⁹: $Q = 0,05$.
 2. De tweede stap is waardering van de optie. De verwachte waarde van de optie op t_0 met risico-aangepaste discontovoet volgt uit de waarde van de optie op t_1 onder het extra hoge scenario vermenigvuldigd met de *risico-neutrale* kans Q verkregen uit stap 3 en verdisconteerd met de *risicovrije* discontovoet, dat wil zeggen: $O_0 = Q * 12,9 / 1,025^{29} = 0,3$ miljoen euro. Dit is een stuk lager dan 1,4 miljoen euro die we eerder vonden met klassieke beslisboomanalyse, dat wil zeggen zonder risico-aangepaste discontovoet (zie hoofdstuk 3.3).
 3. De derde en laatste stap is de bepaling van de bijbehorende risico-aangepaste discontovoet: De risico-aangepaste discontovoet (r_A) volgt uit:
 $P * O_1(\text{extra hoog scenario}) / (1 + r_A)^{29} = 0,3$. Hieruit volgt dat de risico-aangepaste discontovoet 11% is. De risico-opslag voor de optie is met deze methode dus 8,5%. Dat is aanmerkelijk hoger dan de standaard-opslag van 3%.

³⁸ Deze stap heeft een ingewikkelde theoretische achtergrond. De waarde van de brugverhogingsoptie kan worden geïnterpreteerd als de verwachting van de verdisconteerde toekomstige waarde van de optie in een risico-neutrale wereld. We verwijzen naar de Copeland en Antikarov (2003, pp. 90-106) voor een bewijs van correctheid van deze drie stappen. Deze auteurs baseren zich op oorspronkelijk werk van Cox et al. (1979).

³⁹ Deze kans volgt ook uit (Cox et al., 1979; p. 234): $Q = ((1 + \delta)^{29} - d) / (u - d)$, met $\delta = 0,025$, $u = 52,9/6,9$ en $d = 12,2/6,9$.

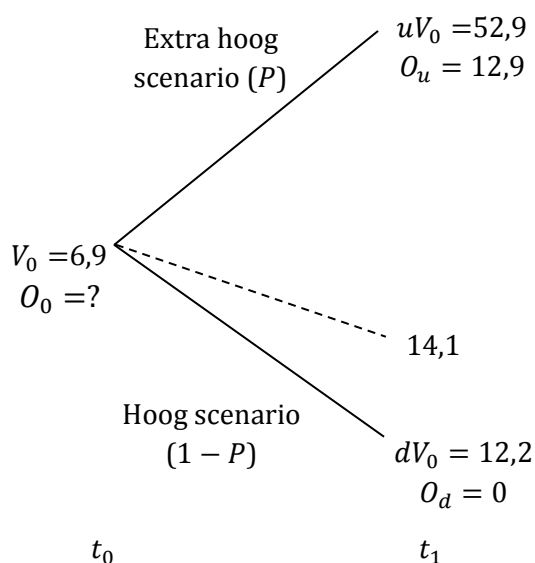
Rekenschema 2: Cox et al. (1979) op basis van een replicating portfolio

We kunnen exact *dezelfde* optiewaarde ook berekenen op basis van een replicating portfolio (Cox et al., 1979; pp. 229-234), door een fictieve portfolio te maken met hetzelfde risico als de optie.

De aannames voor deze berekening zijn identiek: er is een fictieve financiële markt voor aandelen van de Ramspolbrug (i.e.: de Marketed Asset Disclaimer aanname), de risicovrije discontovoet is constant, *short selling* is toegestaan en er zijn geen transactiekosten.

Laten we zeggen dat we Δ aandelen mogen kopen van het inflexibele Ramspolbrugproject en dat we ook risicovrije obligaties B mogen kopen tegen de risicovrije rentevoet van 2,5% per jaar en definieer $r_p = 1,025^{29} = 2,0$. In ons twee periode model is de waarde van 1 (fictief) Ramspolaandeel op dit moment V_0 : 6,9. Dat is de verwachte contante waarde het aanleggen van het inflexibele project (zie boven; bij een *veronderstelde* $P=0,5$). Deze waarde ontwikkelt als volgt:

Figuur C.2 Ontwikkeling aandeel Ramspol.



Uit figuur C.2 volgt dat: $u = \frac{59,9}{6,9} = 8,7$ en $d = \frac{12,2}{6,9} = 1,8$. Het is bij de verdere berekeningen noodzakelijk dat $u > r_p > d$. Deze ongelijkheden gelden hier.

De replicating portfolio, die onder beide scenario's op t_1 dezelfde uitkomst heeft als de brugverhogingsoptie, is als volgt:

$$\Delta uV_0 + r_p B = O_u \quad (C.1)$$

$$\Delta dV_0 + r_p B = O_d \quad (C.2)$$

Twee vergelijkingen met twee onbekenden (i.e. Δ en B) geeft per definitie een oplossing. De lezer kan verifiëren dat: $\Delta = 0,32$ en $B = -1,89$ ('short selling'). De waarde van de optie is: $O_0 = \Delta V_0 + B = 0,3$ miljoen euro.

Beide rekenschema's leveren dus een *identieke optiewaarde*. Dit komt doordat de uitgangspunten en aannames identiek zijn en de methodes mathematische equivalenten van elkaar zijn.

Bijlage D Kenmerken verschillende reële optiemethoden

De scheidlijnen tussen de verschillende reële optiemethoden zijn niet hard. De methoden zijn allemaal gebaseerd op dynamische optimalisatietheorie ('optimal stopping' problemen). Ook zijn alle reële optiemethoden gebaseerd op een setting van *risico*. De klassieke reële optieliteratuur is mede hierdoor complex en niet toegankelijk voor een breed lezerspubliek door de wiskunde die bij stochastische optimalisatie ('Ito calculus') komt kijken.

De reële optiemethoden onderscheiden zich onderling vooral in de manier van verdiscontering, de stochastiek en de mate van detail (continue tijd of discrete tijd met een groot aantal tijdstappen, continue of discrete toestandsruimte, het aantal onzekerheden). Voor meer informatie over de meer geavanceerde methoden verwijzen we graag door naar het overzichtswerk van Schwartz en Trigeorgis (2001).

Tabel D.1 geeft een overzicht van een aantal kenmerken van de methoden die kort zijn besproken. Een beslisboomanalyse heeft een flexibele specificatie: het kan worden uitgevoerd met een eindige of oneindige tijdshorizon, met weinig of veel beslismomenten, de tijdsintervallen tussen beslissingen kunnen variëren en nieuwe informatie kan op verschillende manieren worden gemodelleerd.

In dit rapport hebben we voor de analyses slechts enkele specifieke toekomstscenario's met 2 tijdsstappen gebruikt. Nadeel daarvan is dat de stochastiek (volatiliteit van de verwachte projectbaten) zeer beperkt wordt weergegeven en slechts een zeer grof beeld van de waarde van flexibiliteit wordt verkregen. Daar staan de diverse praktische voordelen, zoals die zijn besproken in hoofdstuk 4, tegenover.

Tabel D.1 Vergelijking van de kenmerken van de vijf reële optiemethoden.

Kenmerken	Eenvoudige beslisboom	Contingent claims (continu)	Contingent claims (discreet)	Dynamisch programmeren	Monte-Carlosimulatie
Praktische toepasbaarheid	+	-	+/-	-	+
Beslismomenten	Discrete beslismomenten van ongelijke of vaste grootte	Continu	Op discrete tijdstappen van vaste grootte	Discrete tijdstappen van vaste grootte of continu	Discrete tijdstappen van vaste grootte of continu
Nieuwe informatie	Op gedefinieerde beslismomenten	Continu	Elke tijdstap	Discreet of continu	Elke tijdstap of continu
Afname van onzekerheid in de tijd	ja of nee	Ja	Ja	ja of nee	Ja
Discontovoet	Vast (risicovrij met of zonder vaste risico-opslag) of beperkt variabel	Risicovrij (risico-neutrale waardering)	Variabel / risicovrij met risico-neutrale kansen	Vast (risicovrij met of zonder vaste risico-opslag)	Risicovrij
Modellering volatiliteit	Op basis van scenario's	Van onderliggende variabele	Van onderliggende variabele	Exogeen	Van onderliggende variabelen
Modelinputs	Vooraf gedefinieerde beslismomenten, pragmatische aanname voor onzekerheidsredactie, discontovoeten, scenario's, scenario-kansen, tijdshorizon	Huidige prijs van onderliggende variabele, prijsvolatiliteit, risicovrije discontovoet, tijdshorizon	Tijdstappen-aantal en -grootte, discrete multiplicatieve of additieve veranderingen van project-waarde over de tijd uit volatiliteit van onderliggende variabele, risicovrije discontovoet	Stochastisch proces, discontovoeten, tijdshorizon	Meerdere specificaties van kansverdelingen, tijdshorizon
Toestand-ruimte	Discreet of continu	Continu	Discreet	Continu	Continu
Tijdshorizon	Eindig of oneindig met een eindconditie	Eindig	Eindig	Eindig of oneindig	Eindig

Bijlage E Netwerkeffecten

Infrastructuur is doorgaans onderdeel van een netwerk. Een brugverbinding voor een snelweg is bijvoorbeeld onderdeel van het wegennet en een sluis is een onderdeel van een watersysteem. Wanneer wordt geïnvesteerd in een netwerkonderdeel draagt dit bij aan het functioneren van het netwerk als geheel.

Het is mogelijk om met een reële optiebenadering combinaties van investeringen te bekijken net zoals deze kunnen worden geanalyseerd in een standaard MKBA. Dit zal

bij de keuze voor de grafische beslisboommethodiek echter wel resulteren in een grotere beslisboom dan bij de bestudering van de individuele casussen in hoofdstuk 3, omdat het aantal beslissingen wordt uitgebreid met andere investeringsbeslissingen in het netwerk. Aangezien dit nadelig is voor de leesbaarheid en interpretatie van de resultaten is dit alleen aan te raden wanneer dit echt noodzakelijk is. Of er netwerkeffecten zijn blijkt vaak al uit een snelle inspectie van mogelijke combinaties van alternatieven die in een netwerk zijn gelegen.

De effecten van netwerkverbeteringen zijn vaak niet eenvoudig te berekenen, omdat netwerken doorgaans complexe systemen zijn. Netwerken kunnen bijvoorbeeld grensoverschrijdend zijn. Ook zijn netwerken vatbaar voor lock-in situaties uit eerdere investeringskeuzes.⁴⁰ De totale baten van een project kunnen bovendien in meer of mindere mate afhankelijk zijn van zwakste schakels. De effecten van netwerkverbeteringen moeten vaak blijken uit simulatie met bijvoorbeeld verkeersmodellen, waarvan de resultaten kunnen worden gebruikt in de beslisboomanalyse.

Vanuit netwerkperspectief is extra flexibiliteit bij een knooppunt vooral van waarde als het om een belangrijk en centraal gelegen knooppunt in het netwerk gaat (dus bijvoorbeeld direct en indirect relevant voor veel vervoersstromen) en er nog weinig sprake van flexibiliteit is. Een voorbeeld. Prof. Bert van Wee adviseerde om vertragingen op het spoor te verminderen door te investeren in duurdere, betere wissels, te beginnen bij Utrecht: "ProRail wilde deze wissels niet aanleggen omdat dat te duur zou zijn. Maar het hoeft ook niet meteen in het hele land. Begin bij Utrecht, dáár zijn die wissels rendabel. Rondom drukke spoorplekken zouden bijvoorbeeld ook bovenleidingen eerder moeten worden vervangen".⁴¹

Als in één netwerk meerdere investeringsprojecten worden overwogen, is het verstandig niet alleen kosten-batenanalyses te doen per investeringsproject, maar daarnaast ook voor het totaal of combinaties van deze investeringsprojecten.

Netwerkeffecten vaarweg Ramspol-Meppel

De Ramspol balgstuw, de Ramspolbrug en de Meppelerdiepsluis met brug zijn onderdeel van de vaarweg Ramspol-Meppel. Het betreft een zogenaamde 'overige hoofdvaarweg' die is verbonden met het hoofdvaarwegennetwerk via het Ketelmeer. Verbeteringen op de vaarweg Ramspol-Meppel resulteren niet of nauwelijks in verbetering van het functioneren van de rest van het hoofdvaarwegennet door de perifere ligging van de vaarweg in het netwerk. Met andere woorden: de plaats in het netwerk maakt veel uit voor de omvang van de baten van een project.

Ondanks de perifere ligging zijn er wel netwerkeffecten tussen Ramspol en Meppelerdiep, zoals de invloed van de balgstuw bij Ramspol op de keuze van een

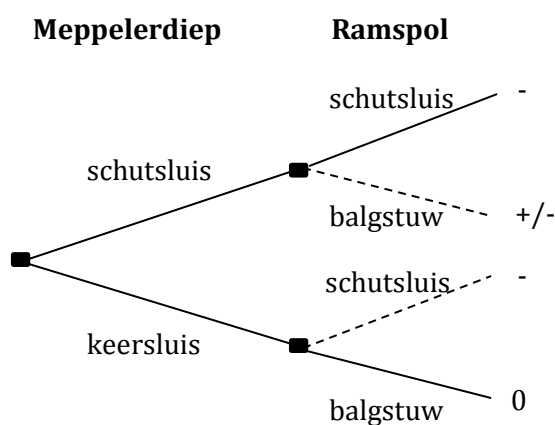
⁴⁰ Wanneer het Nederlandse wegennet bijvoorbeeld opnieuw zou worden ontworpen vanuit nulstaat zou dit een aanzienlijk efficiënter netwerk opleveren dan nu het geval is (Snelder et al., 2007).

⁴¹ Zie Bert van Wee (TU Delft): "Treinverkeer in Nederland erg goed", Treinreiziger.nl, 2 maart 2015.

keer- of schutsluis bij het Meppelerdiep. Wanneer de balgstuw in Ramspol wordt opgeblazen om opstuwend water uit het IJsselmeer te keren is de vaarroute Ramspol-Meppel niet langer toegankelijk. In deze gevallen worden de stremmingsbaten bij hoogwater van een schutsluis bij Meppelerdiep teniet gedaan; de binnenvaart kan dan immers dankzij de schutsluis wel vrij doorvaren bij Meppelerdiep maar kan Ramspol niet passeren. Er treedt dan alsnog stremmingschade op. Dit gebeurt naar verwachting een maal per jaar en deze frequentie zal toenemen door klimaatverandering. Dit illustreert dat partiële analyse van specifieke knooppunten zonder rekening te houden met de rest van het netwerk misleidend kan zijn.

Beslisboomanalyse met een beslismoment kan worden gebruikt om netwerkeffecten, inclusief zwakste schakels, te identificeren. De investeringsalternatieven van deelprojecten op aangrenzende delen van het netwerk kunnen in een beslisboom worden gecombineerd. De kosten-batenberekeningen met meerdere scenario's zal al snel tijdrovend worden, maar een kwalitatieve kosten-batenbeschouwing van de uitkomsten onder een midden-scenario kan al voldoende zijn om slechte keuzecombinaties te identificeren. Figuur E.1 geeft een voorbeeld voor Meppelerdiep en Ramspol. Bij het Meppelerdiep moet een keuze worden gemaakt tussen een keersluis en een schutsluis en bij de Ramspol een keuze tussen een opblaasbare balgstuw en een schutsluis.

Figuur E.1 Beslisboom Meppelerdiep-Ramspol bij grote afhankelijkheid van de stremmingsbaten.



We doorlopen bovenstaande beslisboom van onder naar boven.

De onderste tak van bovenstaande beslisboom representeert het referentie-alternatief. Dit behelst een keersluis bij de Meppelerdiep en een balgstuw bij de Ramspol. Op het moment van de kosten-baten analyse van de sluisalternatieven van het Meppelerdiep bestond de balgstuw bij Ramspol immers al (sinds 2002).

Een eerste alternatief is een keersluis bij Meppelerdiep en een schutsluis bij Ramspol. Dit alternatief is niet aantrekkelijk aangezien het in vergelijking met het nulalternatief tot aanzienlijk extra kosten leidt (schutsluis in plaats van huidige balgstuw), terwijl daar weinig baten tegenover staan aangezien de stremmingen door de balgstuw relatief beperkt zijn.

Een tweede alternatief is schutsluis/balgstuw. Als sprake is van een grote afhankelijkheid tussen de stremmingen bij de balgstuw bij Ramspol en de keersluis bij het Meppelerdiep, zullen de baten van een schutsluis bij het Meppelerdiep beperkt zijn, terwijl daar de hoge extra kosten van een schutsluis bij het Meppelerdiep tegenover staan.

Tot slot het derde alternatief: schutsluis/schutsluis. De stremmingsbaten van het gecombineerde investeringsproject zijn het hoogst wanneer niet alleen bij het Meppelerdiep maar ook bij Ramspol een schutsluis zou worden gerealiseerd. Tegenover deze stremmingsbaten staan dan echter niet alleen de extra kosten van een schutsluis bij het Meppelerdiep, maar ook die van een schutsluis bij de Ramspol. Dit illustreert dat de keuze van een schutsluis versus een keersluis bij het Meppelerdiep alleen los van de stremmingen van de balgstuw bij de Ramspol kan worden geanalyseerd als deze stremmingen door een opgeblazen balgstuw bij de Ramspol (vrijwel) nooit gelijktijdig optreden met de stremmingen door de keersluis bij het Meppelerdiep. Deze interacties zijn er in werkelijkheid wel en een partiële analyse kan dan leiden tot overschatting van de baten.

Conclusies netwerkeffecten

Deze korte beschouwing over netwerk-effecten leidt tot een aantal conclusies:

- Netwerkeffecten hangen af van de plaats in het netwerk; bij centrale ligging zijn de netwerkbaten vaak hoger dan bij een perifere ligging. Files rond de centraal gelegen grote steden hebben bijvoorbeeld uitstralingseffecten op het hoofdwegennet. Een gestremde doorvaart op het relatief perifeer gelegen Meppelerdiep heeft nauwelijks invloed op het functioneren van het hoofdvaarwegennetwerk. Populair gezegd bepaalt in het eerste voorbeeld de zwakste schakel de sterkte van de gehele ketting. In het tweede voorbeeld is de schakel een (perifeer) zijpad en dus niet belangrijk voor de ketting als geheel;
- Een quick-scan met een beslisboom van verschillende deelprojecten, eventueel met kwalitatieve kosten-batenbeschouwing, kan helpen om een beeld te vormen van het teken en de omvang van de netwerkeffecten.

Dit is een uitgave van:

Centraal Planbureau
Van Stolkweg 14
Postbus 80510 | 2508 GM Den Haag
T (070) 3383 380

info@cpb.nl | www.cpb.nl

April 2016