



Centraal Planbureau

CPB Notitie | 5 december 2017

Hoe omgaan met flexibiliteit in infrastructuurbeleid en MKBA's infrastructuur?

*Uitgevoerd op verzoek
van Rijkswaterstaat*



Centraal Planbureau
Bezuidenhoutseweg 30
2594 AV Den Haag
Postbus 80510
2508 GM Den Haag

T 088 9846000
I www.cpb.nl

Contactpersonen
Frits Bos en Gerbert Romijn

Aan: Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving (WVL)

Datum: 5-12-2017

Betreft: Hoe omgaan met flexibiliteit in infrastructuurbeleid en MKBA's
infrastructuur?

Samenvatting

De Nederlandse infrastructuur voor wegen, spoor en water is van hoge kwaliteit, mede door een lange traditie van meerjarige planning en besluitvorming. Ontwikkelingen zoals de zelfrijdende auto en de energie-transitie hebben de toekomst onzekerder gemaakt. Hierdoor is het risico om achteraf gezien verkeerde investeringen in infrastructuur te doen aanzienlijk vergroot. Dit maakt het nodig om infrastructuurbeleid flexibeler te maken. Op verzoek van Rijkswaterstaat heeft het CPB onderzocht wat dit betekent voor infrastructuurbeleid en kosten-batenanalyses van infrastructuurprojecten.

Wat is flexibiliteit van infrastructuur?

Investeringen in infrastructuur kunnen op diverse manieren flexibel zijn. Drie manieren kunnen worden onderscheiden. Ten eerste kan de timing worden aangepast, bijvoorbeeld door stapsgewijs investeren en meer kleine mitigerende maatregelen. Ten tweede kan de vormgeving en inrichting worden aangepast, bijvoorbeeld door extra stevige uitvoering van infrastructuur en ruimtereservering; hierdoor kan uitbreiding van vervoercapaciteit later relatief eenvoudig en goedkoop mogelijk worden. Ten derde kan worden geïnvesteerd in kennisvergroting door experimenteren, monitoring en onderzoek.

Kosten en baten van flexibiliteit

Door flexibiliteit in te bouwen in infrastructuurbeleid kan beter en eerder worden ingespeeld op toekomstige ontwikkelingen, zoals nieuwe constructietechnieken en -materialen en veranderde vraag naar mobiliteit. Ook kan dan op investeringskosten die achteraf gezien onnodig zijn, worden bespaard. Flexibiliteit kan daarom van grote waarde zijn, maar is niet kosteloos en heeft niet alleen voordelen. Door stapsgewijs

investeren kan bijvoorbeeld niet worden geprofiteerd van de schaalvoordelen van een grote eenmalige aanpassing; deze schaalvoordelen betreffen niet alleen de investeringskosten, maar ook de extra bestuurlijke en politieke inzet bij vele kleine en stapsgewijze aanpassingen.

Zeven aanbevelingen voor MKBA's infrastructuur

Om in een MKBA van infrastructuur goed rekening te houden met flexibiliteit zijn in deze notitie zeven aanbevelingen geformuleerd.

Aanbeveling 1. Zoek naar flexibiliteit.

Ga na welke vormen van flexibiliteit mogelijk zijn in een project. Gebruik hierbij de verschillende vormen van flexibiliteit uit paragraaf 2.4 als checklist. Neem flexibele varianten op als extra beleidsvarianten.

Aanbeveling 2. Meerdere beslismomenten.

Gebruik meerdere beslismomenten, want anders is flexibiliteit in de vorm van uitstel, fasering, combineren van maatregelen in de tijd niet mogelijk. Welke beslismomenten geschikt zijn hangt af van de soort analyse en specifieke situatie. Hierbij moet worden gelet op kantelpunten in kosten en baten: vanaf welk moment nemen deze sterk toe of af.

Aanbeveling 3. Minimaal twee scenario's.

Voor analyse en presentatie van de eindresultaten moeten minimaal twee scenario's voor de kernonzekerheid worden gebruikt. Dit laat zien hoe flexibel en robuust maatregelen zijn bij verschillende toekomstscenario's.

Aanbeveling 4. Kijk ook naar meer extreme scenario's en andere onzekerheden.

Ook de invloed op kosten en baten van meer extreme scenario's en andere onzekerheden moet in een MKBA worden onderzocht. Juist voor de kosten en baten van flexibiliteit zijn deze vaak van extra groot belang. Hieraan zal zelfs al in de probleemanalyse aandacht moeten worden besteed.

Aanbeveling 5. Zoek actief naar no-regret maatregelen.

Zoek actief naar no-regret of low-regret maatregelen, zoals uitstel of faseren van een grote investering. Doe bijvoorbeeld een gevoeligheidsanalyse met verschillende toekomstscenario's voor verschillende onzekerheden. Mogelijk blijkt dan dat het inbouwen van een bepaalde mate van flexibiliteit in een projectalternatief in alle scenario's rendabel is. Het bepalen van de kosten en baten van flexibiliteit is dan niet nodig en dit voorkomt vaak complexe en tijdsintensieve analyse.

Aanbeveling 6. Maak hoe dan ook een beslisboomanalyse.

Beslisboomanalyse is een eenvoudige en algemeen toegankelijke methode voor het identificeren en globaal waarderen van flexibiliteit en past goed in een MKBA. Laat allereerst de spreiding van de uitkomsten zien met behulp van een eenvoudige beslisboom. Als er geen no-regret maatregelen zijn, kan vervolgens op basis van

break-evenkansen en verschillende veronderstellingen over kansen indicatief de waarde van flexibiliteit worden bepaald. Voor het analyseren van optimale timing en maatvoering van investeringsprojecten is deze methode echter niet geschikt.

Aanbeveling 7. Als mogelijk vervolg andere analyses van flexibiliteit.

Overweeg daarna of het gebruik van andere methoden meerwaarde biedt, zoals first year rate of return of meer maatwerkanalyses met dynamisch programmeren modellen of simulatie. Standaardformules uit financiële en reële optietheorie, zoals die uit het binomiale model van Cox, Ross en Rubinstein, raden we in beginsel af.

Inhoudsopgave

Samenvatting.....	3
1 Inleiding	7
2 Zoeken naar kansrijke vormen van flexibiliteit.....	9
2.1 Inleiding	9
2.2 Perspectieven op flexibiliteit in beleid en analyse.....	12
2.3 Verschillende vormen van flexibiliteit.....	14
2.4 Flexibele alternatieven bij de Volkeraksluizen.....	22
2.5 MKBA en het zoeken naar flexibele alternatieven in het beleidsproces.....	24
3 Kosten en baten van flexibiliteit in MKBAs	25
3.1 Inleiding	25
3.2 Beslisboomanalyse	26
3.2.1 Algemene toelichting	26
3.2.2 Een beslisboom voor de brug bij Itteren	31
3.2.3 Kosten en baten van flexibiliteit bij de Volkeraksluizen	34
3.2.4 Kosten en baten van flexibiliteit bij de Meppelerdiepsluis	35
3.3 Andere analyses van flexibiliteit	38
3.4 Wanneer welke soort analyse?	41
4 Conclusies	41
Literatuur	44
Bijlage formele reële optiemethoden.....	49

1 Inleiding^{1 2}

Flexibel infrastructuurbeleid

De Nederlandse infrastructuur voor bereikbaarheid en waterbeheer is goed onderhouden en van hoge kwaliteit in vergelijking met andere Europese landen.³ Het waterbeheer in Nederland is zelfs een voorbeeld voor de rest van de wereld en met een jaarlijkse overheidsuitgave van 1,3% bbp ook relatief goedkoop (OESO, 2015). De goede infrastructuur tegen een relatief lage prijs kan mede komen door de meerjarige planning en spelregels voor besluitvorming over grote nationale infrastructuurprojecten (het Meerjarenprogramma Infrastructuur, Ruimte en Transport; MIRT).⁴

Een nadeel van de meerjarige planning van infrastructuurprojecten in Nederland is dat besluiten ver van tevoren worden genomen en moeilijk bij te sturen zijn, als later de omstandigheden of inzichten veranderen. Dit kan bijvoorbeeld gaan om demografische en economische ontwikkelingen, de spreiding over regio's en nieuwe technologie. Juist nu is de toekomstonzekerheid groot met ontwikkelingen, zoals de zelfrijdende auto en de energietransitie. Ook de afvlakkende bevolkingsgroei betekent dat het niet vanzelfsprekend is dat extra vervoercapaciteit altijd nuttig is.⁵ Een meer flexibel infrastructuurbeleid, bijvoorbeeld door meer stapsgewijs investeren en meer kleine maatregelen, kan dan voordelen hebben. Door het kabinet wordt het belang van flexibel infrastructuurbeleid als volgt gemotiveerd:

“In de afgelopen jaren heeft het kabinet een transitie van het MIRT ingezet met programma's als Beter Benutten, Nieuwe Aanpak Bereikbaarheid en de Vernieuwing van het MIRT. Breed, gebiedsgericht oppakken en afwegen van meerdere opgaven zoals bereikbaarheid, duurzaamheid en economie, in nauwe samenwerking met de omgeving en maatwerk leveren zodat ook andere oplossingen dan alleen infrastructurele oplossingen in beeld komen. Daarmee is koers gezet om beter op huidige en toekomstige vraagstukken en ontwikkelingen in te kunnen spelen. Die flexibiliteit is nodig omdat veranderingen steeds sneller gaan en steeds minder goed

¹ In deze notitie zijn de feedback en tekstsuggesties van de klankbordgroep verwerkt. Leden van de klankbordgroep zijn: Carl Koopmans (SEO & Vrije Universiteit), Gigi van Rhee (Stratelligence), Jarl Kind (Deltares), Hans van der Vlist (Universiteit Wageningen), Jos Arts (Rijkswaterstaat en Rijksuniversiteit Groningen), Michel Briene (Ecorys), Niek Mouter (TU Delft), Gusta Renes (Planbureau voor de Leefomgeving), Johan Visser (Kennisinstituut voor Mobiliteit), Luuk Huttenhuis (ministerie van Infrastructuur en Milieu, DG Bereikbaarheid), Helen Land (ministerie van Infrastructuur en Milieu, DG Ruimte en Water), Ewout Visser (ministerie van Financiën), Simone Zwijsen (ministerie van Financiën), Esther Uijtewaai (Rijkswaterstaat), Paul van den Hoek (Rijkswaterstaat), Jan van Donkelaar (Rijkswaterstaat) en Gerra Witting (Rijkswaterstaat). De inhoud van de notitie blijft echter de verantwoordelijkheid van de auteur en het CPB. De figuren met stappenplannen in deze notitie zijn gemaakt door Meinou de Vries (CPB).

² Deze notitie is in belangrijke mate gebaseerd op eerder onderzoek van het CPB, zie met name Bos en Zwaneveld (2014), Bos, Pol en Zwaneveld (2016) en Pol, Bos en Zwaneveld (2016).

³ Zie World-Economic Forum (2015).

⁴ Deze meerjarige planning en spelregels in combinatie met de financiering via regionale bijdragen en twee nationale fondsen (Infrastructuurfonds voor investeringen in bereikbaarheid en Deltafonds voor investeringen in waterbeheer) maken een afweging mogelijk van nieuwe investeringsprojecten en beheer en onderhoud van bestaande infrastructuur. Het succes van deze planning en spelregels hangt ook af van hoe politici en bestuurders hier in de beleidspraktijk mee omgaan.

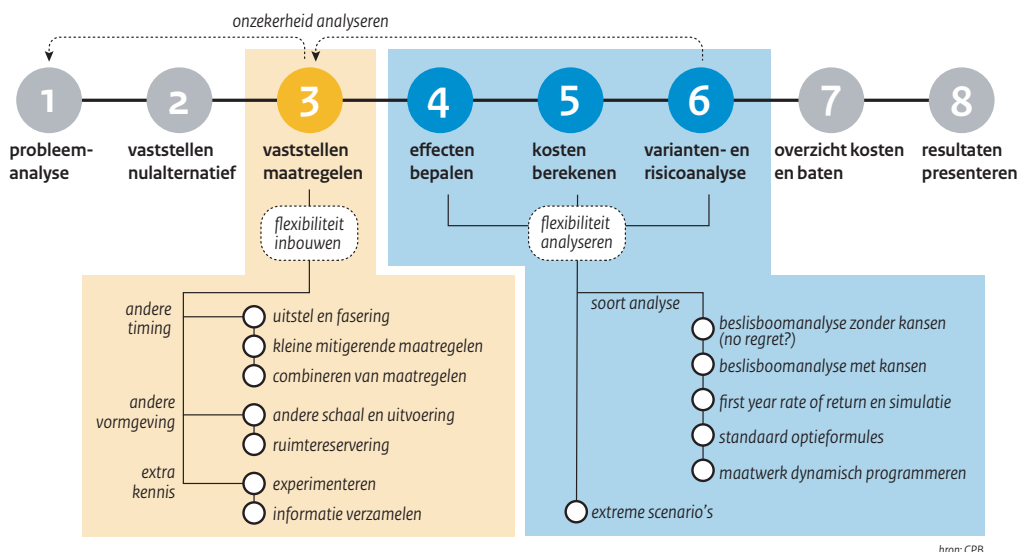
⁵ Voor een verkenning van alle onzekerheden, zie de WLO-scenario's van CPB en PBL (2015).

te voorspellen zijn. Daarnaast heeft het kabinet in het Deltafonds goede ervaringen opgedaan met een adaptieve werkwijze op basis van het Delta-programma.”⁶

De rol van MKBA's

Om infrastructuurbeleid te ondersteunen wordt gebruikt gemaakt van Maatschappelijke kosten-batenanalyses (MKBA's). MKBA's zijn zelfs een verplicht onderdeel van de MIRT-spelregels voor investeringen in infrastructuur. Vanwege het economisch belang en de politieke aandacht voor flexibele oplossingen moet in MKBA's van infrastructuur voldoende aandacht worden besteed aan de kosten en baten van flexibiliteit. Op verzoek van Rijkswaterstaat wordt in deze richtlijn besproken wat dit betekent voor het opstellen van een kosten-batenanalyse.

Figuur 1.1 Flexibiliteit in het 8-stappenplan voor MKBA's



bron: CPB

Kosten-batenanalyse kan op twee manieren flexibel infrastructuurbeleid ondersteunen. Ten eerste, door in de analyse de kosten en baten van flexibiliteit van een specifiek investeringsproject of beleidsmaatregel goed mee te nemen. Dit komt overeen met de stappen 4, 5 en 6 in het algemene stappenplan voor het opstellen van een MKBA (zie figuur over het stappenplan uit de MKBA Leidraad⁷). En ten tweede door te helpen om nieuwe vormen van flexibiliteit te identificeren (stap 3). In de praktijk zal vaak sprake zijn van een iteratief proces tussen analyse van kosten en baten, de keuze van meer of minder flexibele alternatieven en de probleemanalyse (stap 1): beter inzicht in de onzekerheden door varianten- en risicoanalyse en hun invloed op kosten en baten leidt snel tot een ander inzicht over de omvang van het probleem of de kansen, over de mogelijke oplossingen en over de rol van de overheid hierbij.

⁶ Kabinetsreactie IBO Flexibiliteit in Infrastructuurplanning, 20 september 2016.

⁷ Romijn en Renes (2013). Voor een historisch overzicht over kosten-batenanalyse in Nederland, zie Bos en Zwaneveld (2017).

Opzet van de notitie

In hoofdstuk 2 wordt besproken hoe in de beleidsvoorbereiding met behulp van ondersteunende analyses, zoals een MKBA, kan worden gezocht naar kansrijke vormen van flexibiliteit bij een infrastructuurproject. Welke beslismomenten zijn er en welke opties kunnen daar overwogen worden? Hierbij worden verschillende vormen van flexibiliteit en hun relatie met verschillende soorten van onzekerheid, zoals die in toekomstscenario's voor economische groei, klimaat en mobiliteit, toegelicht. Ook wordt aandacht besteed aan de relatie met achterliggende ideeën over flexibiliteit in beleid en analyse, zoals Adaptief Deltamanagement en reële optieanalyse.

In hoofdstuk 3 wordt de analyse van de kosten en baten van een infrastructuurproject en het indicatief bepalen van de baten en kosten van flexibiliteit besproken. Om het verschil met MKBA's waarin geen rekening wordt gehouden met flexibiliteit te illustreren wordt in beide hoofdstukken als centraal voorbeeld de uitbreiding van de capaciteit van de Volkeraksluizen gebruikt. Deze casus is gekozen, omdat het om een belangrijke en veelvoorkomende soort van investeringskeuze gaat. Daarnaast wordt verwezen naar diverse andere voorbeelden uit de Nederlandse beleidspraktijk.

De belangrijkste lessen uit hoofdstukken 2 en 3 worden samengevat in hoofdstuk 4.

2 Zoeken naar kansrijke vormen van flexibiliteit

2.1 Inleiding

Verschillende vormen van onzekerheid

De toekomst is onzeker en de inschattingen van de kosten en baten van maatregelen dus ook. Deze onzekerheid leidt ertoe dat ex-ante inschattingen van baten en kosten niet exact zijn maar een onzekerheidsbandbreedte kennen. Hoe langer de tijdsperiode hoe groter deze bandbreedte. We onderscheiden drie vormen van onzekerheid:

- Toekomstonzekerheid, bijvoorbeeld de onzekerheid over de toekomstige ontwikkeling van economie, demografie, ruimtelijke ontwikkeling, mobiliteit en klimaat. Toekomstonzekerheid is vooral van belang voor langetermijneffecten. Deze wordt in beeld gebracht door scenario's voor mogelijke toekomstige ontwikkelingen, zoals de WLO- en Deltascenario's⁸, te gebruiken.⁹

- Kennisonzekerheid, bijvoorbeeld onzekerheid over hoe maatregelen zich vertalen naar effecten, zoals gedragsreacties in de vorm van een prijselasticiteit, of onzekerheid over de extremen bij de Rijnafvoer.¹⁰
- Beleidsonzekerheid, bijvoorbeeld de onzekerheid of rekeningrijden in de toekomst voldoende politiek draagvlak krijgt, of dat de A4 tussen Delft en Schiedam na 50 jaar discussie is aangelegd. Het betreft ook de mate en manier waarop in de toekomst investeringen in infrastructuur worden gefinancierd.

Specifiek voor infrastructuurbeleid is onzekerheid over toekomstige beschikbare fysieke ruimte van belang. Infrastructuur heeft immers een ruimtelijk beslag, zoals verbreding van een weg, de aanleg van een grotere brug, ruimte voor rivieren, of voor de luchtvaart. Dat ruimtelijke beslag is belangrijk groter dan de fysiek benodigde ruimte vanwege veiligheids- en milieubepalingen. Deze ruimtelijke onzekerheid heeft in eerste plaats betrekking op toekomstonzekerheid: hoe ontwikkelt de ruimtelijke structuur zich. Daarnaast is sprake beleidsonzekerheid omdat overheden in veel gevallen medebepalend zijn voor de ruimtelijke inrichting.

Onzekerheid en flexibiliteit van maatregelen

Onzekerheid en risico kunnen ook worden opgenomen in het besluitvormings- of analyseproces door beleidsalternatieven te definiëren die in meer of mindere mate inspelen op deze onzekere toekomstige ontwikkelingen. Bij elk van de vormen van onzekerheid horen flexibele maatregelen die deze onzekerheid beperken of die de negatieve gevolgen hiervan verminderen.

Voor toekomstonzekerheid zijn uitstel en fasering van maatregelen belangrijke mogelijkheden. Ook kan gedacht worden aan een per toekomstscenario gedifferentieerde inrichting of vormgeving van een maatregel. Bij kennisonzekerheid is een logische maatregel om onderzoek te doen en te experimenteren, bijvoorbeeld onderzoek naar gedragsreacties op beprijzing van wegverkeer, onderzoek naar efficiënte manieren van zoet-zoutscheiding of onderzoek naar de extremen bij de Rijnafvoer. Bij beleidsonzekerheid kunnen convenanten worden afgesproken. Bij onzekerheid over toekomstige financiering kunnen meerjarige financiële afspraken

⁹ Het is van belang om onderscheid te maken tussen risico en onzekerheid. Het risico is de mate dat de kosten en baten van een maatregel zijn blootgesteld aan onzekerheid. Onzekerheid is een gegeven. Door een project flexibel in te richten vermindert, mits goed vormgegeven, de blootstelling van een project aan onzekerheid. De onzekerheid zelf vermindert er echter niet door. De eigenschap van flexibiliteit om de blootstelling aan onzekerheid te verminderen heeft gevolgen voor de te hanteren discontovoet. Maar niet via een algehele verlaging van de discontovoet. Elke oplossing binnen een flexibele strategie is immers op zichzelf niet flexibel en moet via de normale discontovoetvoorschriften worden verdisconteerd. Bij de beslisboomanalyses in deze notitie zijn we uitgegaan van het verdisconteren van de kosten en baten met een vaste discontovoet (zie Werkgroep Discontovoet 2015). Belangrijk kenmerk van een flexibele maatregel kan zijn dat het projectrisico wordt verlaagd in vergelijking met een niet flexibel alternatief, bijvoorbeeld door goed gebruik te maken van nieuwe en betere informatie (zie ook Zeeuw et al. 2010, p. 84). Voor zover dit effect voldoende substantieel is en ook goed gemotiveerd wordt, kan dit in de kosten-batenanalyse worden meegenomen, zie bijvoorbeeld bijlage C in Pol, Bos en Zwaneveld (2016).

¹⁰ Deze kennisonzekerheid heeft niets met klimaatverandering te maken, want in de afvoerreeks voor de Rijn is nog steeds geen klimaatrend zichtbaar. Door de twee hoge afvoeren in 1993 en 1995 is de afvoerstatistiek veranderd. Twee hoge afvoeren op een reeks van 100 jaar meetgegevens voor de Rijn heeft in dit geval een grote invloed. Het project Ruimte voor de Rivier leidt tot een extra Rijnafvoer van 1000m³/s en is het gevolg van deze kennisonzekerheid.

worden gemaakt en financiële ruimte worden gereserveerd in een fonds. Bij onzekerheid over beschikbare fysieke ruimte is ruimtereservering een logische oplossing.

Wat is flexibiliteit?

Flexibiliteit van infrastructuur kan worden gedefinieerd in vergelijking met een niet-flexibele benchmark: het verschil in aanpassingsvermogen voor onverwachte ontwikkelingen ten opzichte van direct en eenmalig besluit om een grote investering in infrastructuur te doen conform standaard specificaties qua schaal en uitvoering. Door flexibiliteit in te bouwen bij de besluitvorming en specificatie van een infrastructuurproject kan worden ingespeeld op nieuwe ontwikkelingen. Ook kan een onderscheid worden gemaakt tussen wat nu moet worden besloten en zaken waarover de beslissing kan worden uitgesteld. Hierdoor kunnen achteraf gezien onnodige kosten worden voorkomen.

Kosten van flexibiliteit

Het inbouwen van flexibiliteit bij een investeringsbeslissing is echter niet kosteloos en heeft niet alleen voordelen. Bij infrastructuurbeslissingen moet het evenwicht tussen flexibiliteit en kostenvoordelen door schaaffecten worden gevonden. Telkens kleine en partiële aanpassingen plegen is duurder dan in één keer een grote aanpassing doen. Ook moet niet worden onderschat hoeveel tijd en bestuurlijke en politieke inzet het kost om infrastructuur aan te passen. Een eenmalige en grootschalige aanpassing van infrastructuur kan daarom ook veel tijd en bestuurlijke en politieke inzet besparen in vergelijking met een meer stapsgewijze en flexibele aanpak.

Actief experimenteren en informatie verzamelen kost tijd en geld en wat dit oplevert aan nieuwe kennis en besparingen is onzeker. Flexibiliteit van infrastructuur kan ook de onzekerheid bij burgers en bedrijven vergroten, omdat minder hard en eenduidig wordt besloten hoe deze infrastructuur er in de toekomst uit zal zien.¹¹

Dit hoofdstuk bespreekt hoe kan worden gezocht naar kansrijke vormen van flexibiliteit. Deze zoektocht is relevant voor zowel de beleidsvoorbereiding als voor ondersteunende analyses, zoals MKBA's.

In paragraaf 2.2 gaan we eerst in op de achterliggende ideeën over de relatie tussen onzekerheid en flexibiliteit bij investeringen in infrastructuur. In paragraaf 2.4 worden verschillende vormen van flexibiliteit en hun relatie met verschillende soorten van onzekerheid besproken. In paragraaf 2.3 wordt voor de Volkeraksluizen geïllustreerd hoe bij de keuze van projectalternatieven in een MKBA rekening kan

¹¹ Hier rijst ook de vraag wat een flexibele oplossing betekent voor bijvoorbeeld de planschaderegeling, als een besluit betekent dat er nu niks wordt besloten maar dat het besluit wordt uitgesteld. Breder getrokken leiden flexibele beleidsstrategieën mogelijk tot een langjarige blootstelling van burgers en bedrijven aan beleidsonzekerheid. Rechtszekerheidsbeginselen stellen zo mogelijk grenzen aan de mogelijkheden voor flexibiliteit.

worden gehouden met flexibiliteit. Tot slot wordt in paragraaf 2.5 kort de relatie tussen MKBA en het beleidsproces besproken.

2.2 Perspectieven op flexibiliteit in beleid en analyse

Het denken over flexibiliteit bij investeringen in infrastructuur komt al in verschillende gedaantes voor in een aantal beleidsdossiers. In dit kader zijn de perspectieven van adaptief deltamanagement, adaptief programmeren van gebiedsagenda's, robust decision-making en reële optietheorie relevant. Deze perspectieven en hun nadruk op het belang van verschillende vormen van flexibiliteit zijn ook in de nieuwe MIRT spelregels¹² verwerkt. Deze perspectieven vormen een relevante beleidsomgeving voor deze notitie. Hieronder gaan we kort op deze perspectieven in.

Adaptief deltamanagement en adaptief programmeren

Adaptief deltamanagement¹³ en adaptief programmeren van gebiedsagenda's¹⁴ gebruiken het begrip 'adaptatie'. Dit betreft de eigenschap van beleidsprogramma's om zich middels stapsgewijze besluitvorming aan te passen in een onzekere en veranderende omgeving. Het begrip adaptatie wordt inmiddels veelvuldig toegepast op andere terreinen. Zo vragen onzekere ontwikkelingen, bijvoorbeeld op het gebied van economie, demografie, technologie en klimaat, om aanpassend vermogen in het overheidsbeleid.

Het ministerie van Infrastructuur en Water (IenW) hanteert het begrip bij de besluitvorming rondom ruimtelijke en infrastructurele investeringen. Binnen het Deltaprogramma is al ervaring opgedaan met 'adaptief deltamanagement' (ADM) en in de domeinen ruimte en mobiliteit wordt 'adaptief geprogrammeerd'. Ook andere ministeries, zoals het ministerie van Economische Zaken bij beleid voor transities op het gebied van circulaire economie, voedsel en energie¹⁵, willen in hun beleid voor een meer adaptieve aanpak kiezen.

Robust-decision making

Flexibele oplossingen hebben zin als duidelijk is wat de onzekerheden zijn en als er een goed beeld is – of gevormd kan worden – van hoe de kosten en baten van een maatregel door deze onzekerheden worden beïnvloed. Maar wat als we sommige onzekerheden niet goed kennen of er onzekerheden zijn waar we nog nooit aan gedacht hebben?

¹² Ministerie van Infrastructuur en Milieu (2016).

¹³ Zie Stratelligence (2012), Haasnoot et al. (2013) en Klijn et al. (2015).

¹⁴ Zie Blue Economy (2014) en Visser (2017).

¹⁵ Zie ministerie van Economische Zaken (2017) en M. Camps (2017).

Robust-decision-making¹⁶ is een beleidsstrategie bedoeld voor het omgaan met de onbekende onzekerheden rond klimaatveranderingen of andere grote onzekerheden. Deze strategie is toegepast op beleidsonderwerpen als CO2-beleid, watermanagement, en aanpak van terrorisme. Benadrukt wordt dat bij grote onzekerheden zoals klimaat sprake is van 'deep uncertainty': het is onbekend wat de risico's zijn, het is onbekend hoe groot de kans op deze risico's is, en het is ook onbekend wat de mogelijke schade is. Ook zijn vele maatregelen mogelijk met vaak onduidelijke gevolgen op de lange termijn. Tot slot kan bij verschillende groepen stakeholders onenigheid bestaan over de waardering van deze gevolgen.

Robuuste beleidsstrategieën hebben dus vooral betrekking op extreme gebeurtenissen en richten zich op een verzekering voor het onbekende. De bekendste redenering in dit domein is de vraag wat te doen met (antropogene) klimaatverandering. We weten niet wat de gevolgen zijn. Dan is een strategie die voorkomt dat we in het onbekende terecht komen robuust (voorkomen van te grote opwarming). Maar we weten ook niet in hoeverre we er iets aan kunnen doen en hoe effectief de verschillende maatregelen zijn. Het is (mede daarom; en het internationale prisoner's game karakter) erg ingewikkeld om een internationale coalitie te smeden om er iets aan te doen. Er bestaat dus een niet-kwantificeerbare kans dat de wereld er niet in slaagt om een niet-kwantificeerbaar probleem op te lossen.

In die omstandigheden is een robuuste strategie om te hopen op het beste, maar voorbereidingen te treffen op het slechtste. In een MKBA-zin is het slechtste een qua maatschappelijke welvaart zo slechte uitkomst die uit alle macht voorkomen moet worden. Heel verschillende soorten robuuste maatregelen zijn mogelijk. Een voorbeeld hiervan zijn de investeringen in het kader van het meerlaagse waterveiligheidsbeleid. De eerste laag, zoals dijkverzwaringen, is gericht op voorkomen van een overstroming. De twee andere lagen zijn gericht op het beperken van de mogelijke negatieve gevolgen. De tweede laag richt zich op een duurzame ruimtelijke inrichting, zoals het beschermen van belangrijke wegen, ziekenhuizen en energiecentrale bij overstromingen. De derde laag zet in op een betere voorbereiding op een mogelijke overstroming, zoals het opstellen van evacuatieplannen en het investeren in evacuatiewegen.

Reële optiebenadering

De reële optiebenadering¹⁷ wordt sinds eind jaren zeventig van de vorige eeuw in het bedrijfsleven wereldwijd meer en meer gebruikt om investeringsbeslissingen te onderbouwen en te verbeteren. Het gaat hier om veel verschillende soorten investeringen, zoals in oliewinning, energiecentrales, vliegtuigen, vastgoed en

¹⁶ Kalra et al. (2014). Herman et al. (2015) bespreken verschillende soorten analyses van robuustheid en verschillende maatstaven voor robuustheid.

¹⁷ Zie Trigeorgis (1996), Copeland en Antikarov (2003), Rhee et al. (2008), Bos en Zwaneveld (2014) en Pol, Bos en Zwaneveld (2016).

onderzoek voor medicijnen. Bij een onzekere toekomst heeft een flexibele investeringsstrategie, die zich aanpast naar gelang de veranderende omstandigheden en inzichten, vaak grote voordelen. Door bijvoorbeeld eerst klein te beginnen met een nieuw product, oliebooring of onderzoeksproject kan een ondernemer kijken of het product aanslaat en waar nodig aanpassingen maken aan het product of de marketing. Als echt duidelijk is dat het product geen toekomst heeft, kan dit investeringsproject tegen geringe kosten worden beëindigd. Als het wel toekomst lijkt te hebben, kan geleidelijk aan schaalvergroting worden gedacht. Als tijdelijk de economische omstandigheden tegenzitten, kan de beslissing tot schaalvergroting een tijd worden uitgesteld.

Kenmerk van de reële optiebenadering is dat expliciet rekening wordt gehouden met de waarde van dergelijke flexibiliteit. Zonder onzekerheid is de waarde van flexibiliteit nul. Zonder de mogelijkheid tot uitstel of fasering of verschillende opties voor vormgeving, is er überhaupt geen sprake van flexibiliteit. Als de onzekerheid toeneemt, of de mogelijkheden tot uitstel, fasering of vormgeving toenemen, neemt ook de optiewaarde van flexibiliteit toe. Juist bij grote onzekerheden kan extra informatie, bijvoorbeeld door extra onderzoek naar marktomstandigheden en technische mogelijkheden van renovatie en vervanging, behulpzaam zijn bij het beter schatten van de waarde van diverse opties. Ook risicospreiding, door tegelijkertijd verschillende opties open te houden en deze nader te onderzoeken, kan dan verstandig zijn. De waarde van opties met flexibiliteit kan sterk fluctueren naar gelang de omstandigheden en inzichten. Dit is vaak een kenmerk van opties: de kosten zijn bekend, maar de baten zijn onzeker en kunnen sterk fluctueren.

2.3 Verschillende vormen van flexibiliteit

Bij het definiëren van projectalternatieven zijn verschillende vormen van flexibiliteit mogelijk. Deze flexibiliteit is gedefinieerd in vergelijking met een directe en eenmalige investering conform standaardspecificaties van schaal en uitvoering (zie paragraaf 2.1). We onderscheiden drie hoofdvormen van flexibiliteit.¹⁸

1. Andere timing;
2. Andere vormgeving en inrichting;
3. Investeren in extra kennis.

Bij elk van deze hoofdvormen is een bont palet aan verschillende vormen van flexibiliteit mogelijk. Bij andere timing zijn drie verschillende vormen vooral van belang:

- Uitstel en fasering;
- Kleine mitigerende maatregelen;

¹⁸ Voor een alternatieve indeling, zie Rhee et al. (2008).

- Combineren van maatregelen.

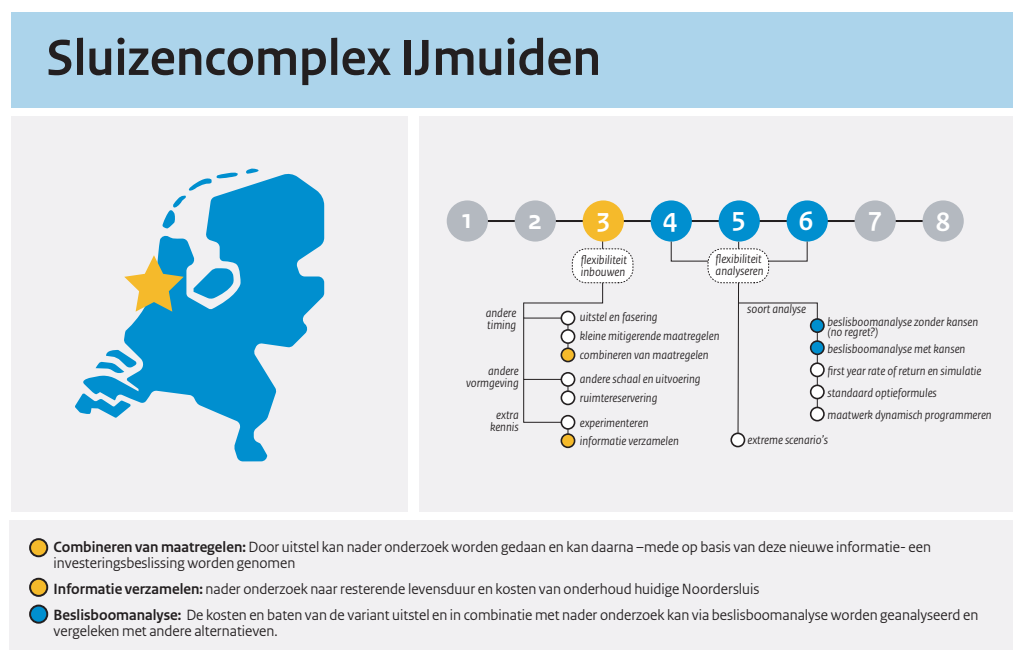
Bij vormgeving en inrichting kan kunnen Andere schaal en uitvoering en Ruimtereservering als twee belangrijke vormen van flexibiliteit worden genoemd. Bij investeren in extra kennis gaat het om experimenteren, monitoring en op andere manieren relevante informatie verzamelen en vergroten. Al deze vormen van flexibiliteit kunnen in de praktijk overlappen.

Bij de keuze van flexibele maatregelen is het belangrijk dat deze goed aansluiten op het kernprobleem en de belangrijkste onzekerheden hierbij. De relatie met onzekerheid en verschillende toekomstscenario's wordt besproken in hoofdstuk 3.

Andere timing: uitstel van de investeringskeuze

De meest voor de hand liggende vorm van flexibiliteit is de mogelijkheid van uitstel. Bij het voorbeeld van de Volkeraksluizen komt dit naar voren door de mogelijkheid om te wachten met de investeringskeuze. Deze mogelijkheid tot uitstel maakt de aanleg van de vierde kolk flexibeler dan als alleen direct investeren kan worden overwogen. In de second opinion KBA Zeetoegang IJmond¹⁹ worden ook de voordelen van uitstel van de aanleg van een nieuwe grote sluis benadrukt. Door uitstel wordt duidelijker hoe de goederenstromen zich de komende jaren ontwikkelen in het Noordzeekanaal en wat het effect is van de Maasvlakte 2 op de containerstromen.

Figuur 2.1 Flexibiliteit bij investeren in de sluizen van IJmuiden



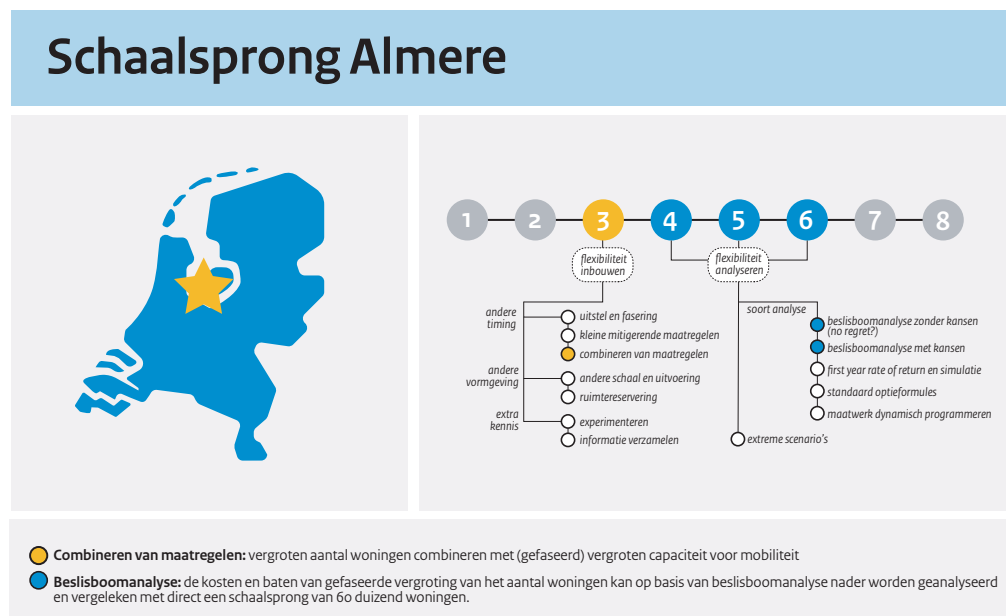
¹⁹ Romijn en Visser (2012).

Uitstel biedt ook de mogelijkheid om nader technisch onderzoek in te stellen naar de resterende levensduur en kosten van onderhoud van de huidige Noordersluis. Hogere kosten voor het onderhoud van de huidige sluis betekenen bijvoorbeeld een gunstiger rendement van een nieuwe sluis.

Andere timing: fasering

Een tweede, verwante, vorm van flexibiliteit is fasering. In feite gaat het daarbij om de mogelijkheid om een deel van het investeringsproject uit te stellen. Bij de schaalsprong Almere wordt de bouw van 60 duizend woningen overwogen. Dit kan worden vergeleken met een situatie waarin geen woningen worden bijgebouwd in Almere. Maar het kan ook worden vergeleken met een in eerste instantie verkleinde schaalsprong van 25 duizend woningen eventueel aangevuld met de optie om later nog meer woningen bij te bouwen bij voldoende woningvraag.²⁰ Een andere veelvoorkomende variant van fasering is eerst uitbreiding van de capaciteit op het spoor of de weg op het meest drukke deel van een traject en later mogelijk uitbreiding op andere delen.

Figuur 2.2 Flexibiliteit en de schaalsprong van Almere



bron: CPB

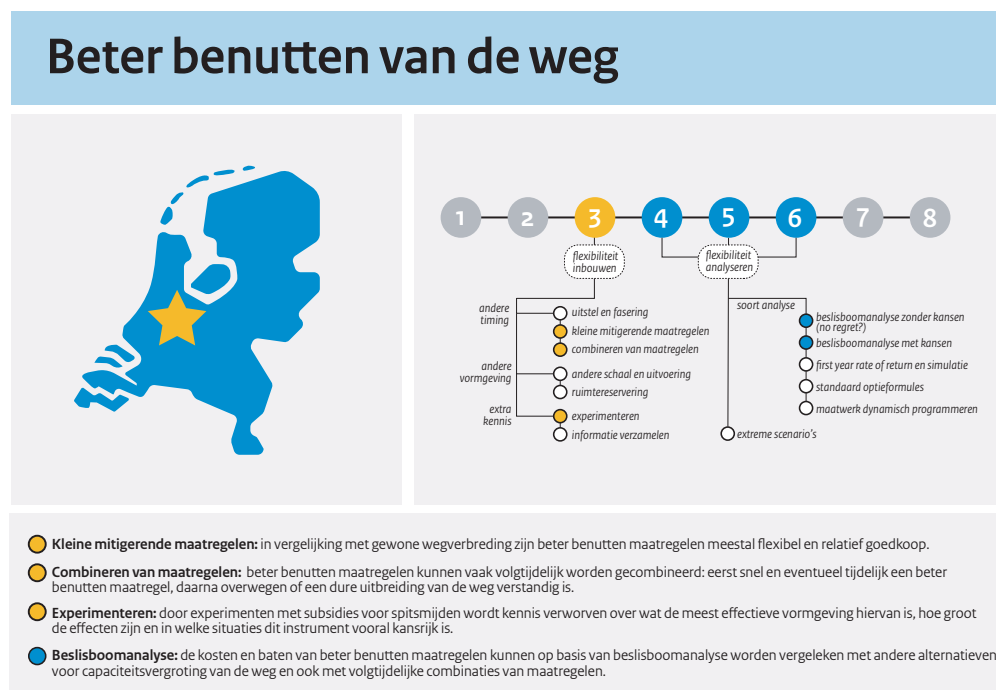
Kleine, goedkope maatregelen

In veel gevallen kunnen de ergste uitwassen van een dreigend knelpunt tijdelijk worden gemitigeerd door kleinschalige en relatief goedkope oplossing. Een voorbeeld is Beter Benutten voor de weg met bijvoorbeeld subsidies voor spitsmijden, maar ook een bellenscherm als zoet-zoutwaterscheiding (in plaats van een sluis). Dat type maatregelen maakt flexibiliteit mogelijk in de zin dat het meestal gaat om

²⁰ Romijn et al (2012).

maatregelen die tegen geringe kosten te implementeren zijn, eenvoudig zijn terug te draaien en tegelijkertijd tijdelijk soelaas bieden en zo de tijd geven om verder na te gaan of een meer structurele oplossing nodig is en hoe die er het beste uit moet zien.

Figuur 2.3 Flexibiliteit door beter benutten van de weg



Voorbeelden bij het spoor van kleine en goedkope maatregelen²¹ zijn een andere dienstregeling, perronverlenging en ongelijkvloerse kruisingen met autowegen. Deze maatregelen zijn relatief goedkoop in vergelijking tot aanleg van een extra spoorlijn. Een ander voorbeeld van een relatief goedkope maatregel is de MKBA over Zeetoeegang IJmuiden: hierbij is niet alleen gekeken naar de aanleg van een dure zeesluis bij IJmuiden, maar ook naar een relatief goedkope andere oplossing namelijk goederenoverslag voor de sluis.²²

Bij gebiedsagenda's is adaptief plannen voor regio's met een grote kans op stabilisatie of krimp belangrijk. Tijdelijke groei van de vraag naar woon- of werklocaties, infrastructuur en voorzieningen kan met flexibele en tijdelijke maatregelen worden opgevangen.²³ Daarbij kan worden gedacht aan containerwoningen voor studenten, tijdelijke verbouw van leegstaande kantoorpanden of tijdelijke inzet van rekeningrijden op wegen waar op termijn een afname van de drukte wordt verwacht.

²¹ AVV et al. (2001).

²² Rosenberg en Koopmans (2004).

²³ Zie Gerwen et al. (2017).

Volgtijdelijk combineren van maatregelen

Flexibiliteit kan niet alleen worden vergroot door verschillende soorten maatregelen, maar ook door het combineren van maatregelen. Om dit te verduidelijken, passeren hierna een paar voorbeelden de revue:

- Bij het investeringsprobleem met de capaciteit van de Volkeraksluizen blijkt de combinatie van eerst inzetten op versnelling van het schutproces en later eventueel aanleg van de vierde kolk, een aantrekkelijk investeringsalternatief.
- Een ander voorbeeld is de aanleg van de Roode Vaart²⁴: deze is nuttig voor de verbetering van de zoetwatervoorziening en ook voor de herinrichting van het centrum van Zevenbergen. Later kan misschien extra zoetwatervoorziening voor de landbouw worden aangelegd en kan eventueel ook worden besloten het Volkerak-Zoommeer zout te maken om de waterkwaliteit daar te verbeteren.²⁵
- Een derde voorbeeld is uitstel van de investeringskeuze voor een nieuwe sluis bij IJmuiden combineren met capaciteitsvergroting van de huidige Noordersluis door zand niet meer via de sluis maar via pijplijnen te transporteren, tijdvensters met voorrang voor klanten die daarvoor willen betalen en meer schepen toewijzen aan de Midden- en Zuidersluis.
- Bij experimenten is combinatie met andere maatregelen vaak ook verstandig. Experimenteren met een bellenscherm voor zoet-zoutscheiding bij de Krammersluizen kan niet alleen in dit project, maar ook bij andere projecten veel geld besparen. Als het zeer succesvol blijkt te zijn en later besloten wordt dat het niet meer nodig is om het Volkerak-Zoommeer zout te maken, dan hoeft niet meer te worden geïnvesteerd in een dure één-op-één vervanging van de zoet-zoutscheiding bij de Krammersluizen. Dus eerst dit experiment met een bellenscherm en later mogelijk een beslissing om de zoet-zoutscheiding een-op-een te vervangen.
- Als laatste voorbeeld noemen we het combineren van nieuwe wegen en extra rijstroken met andere maatregelen, zoals extra pechwegens, subsidies voor spitsmijden en rekeningrijden. Deze laatste kunnen misschien eerst worden ingezet bij drukke wegen om de filedruk te verminderen en in een later stadium kan worden overwogen om de capaciteit op de weg te vergroten door nieuwe wegen en extra rijstroken.

Deze voorbeelden laten zien dat het vaak mogelijk en verstandig is om eerst no-regret of low-regret maatregelen te onderzoeken. Pas daarna komen de grote onomkeerbare investeringen in beeld. De no-/low-regret maatregelen lossen in ieder geval tijdelijk de grootste problemen op en verschaffen ook tijd om te zien of er werkelijk aanleiding is om tot een grootschalige investering over te gaan.

²⁴ De Roode Vaart is een kanaal in Noord-Brabant. Het verbindt de rivier de Mark via Zevenbergen en Moerdijk met het Hollandsch Diep.

²⁵ Als de extra zoetwatervoorziening is aangelegd is dit geen probleem voor de landbouw.

Andere schaal en uitvoering

Een specifieke vorm van fasering betreft de keuze voor schaal, bijvoorbeeld extra groot of extra veilig, of de keuze voor de uitvoering, zoals een andere materiaalkeuze en daardoor een andere (kortere) levensduur. Bij bruggen kan bijvoorbeeld worden gekozen voor een overgedimensioneerde staalconstructie of extra wapening van beton. Hierdoor is het mogelijk om de capaciteit van de brug in de toekomst snel en goedkoop uit te breiden

Ruimtereservering

Een specifieke manier van andere inrichting en uitvoering is ruimtereservering. Dit is een belangrijke en vaak relatief goedkope maatregel om in de toekomst geld te besparen. Een voorbeeld is de autosnelweg E19 tussen Antwerpen en Brussel. De groenstrook tussen de rijstroken is opvallend breed. Maar dit betekent wel dat er in de toekomst vrij gemakkelijk en goedkoop extra rijstroken kunnen worden aangelegd. Andere voorbeelden van ruimtereservering zijn: de ruimtereservering voor een extra sluis bij de Volkeraksluizen, waterberging bij de Grevelingen en het Volkerak-Zoommeer voor waterveiligheid en de overdimensionering in de Schiphol-spoortunnel voor uitbreiding van vier naar later zes sporen bij aanleg in de jaren tachtig.

Experimenteren

Uitstel en fasering zijn vormen van flexibiliteit die vooral gericht zijn op toekomstonzekerheid. Maar onzekerheid kan ook betrekking hebben op kennisonzekerheid. Die treedt op als het niet zo goed bekend of en hoe verschillende maatregelen effect hebben. Het vraagt dan om nogal wat (politieke) durf om met een grote investering te komen. Een alternatief is het experiment om na te gaan of een idee werkt. Een voorbeeld is de kustbescherming door het storten van zand voor de kust (zandmotor). Dergelijke innovatieve oplossingen zijn nieuw, de voor- en nadelen zijn nog onduidelijk en de vormgeving en uitwerking zijn vaak nog niet optimaal. De voordelen van experimenteren blijken daarom meestal pas op de lange termijn en bij andere projecten. De relatie met flexibiliteit verschilt per soort innovatief project. Een innovatie als de balgstuw (opblaasbare dam) als tijdelijke waterkering is veel flexibeler dan een permanente oplossing als een kering, dam of dijk.²⁶

Informatie verzamelen

Een flexibele investeringsstrategie kan dus bestaan uit uitstel, fasering, het nemen van tijdelijke mitigerende maatregelen of volgtijdelijke combinaties van maatregelen. Als er een optie tot uitstel of faseren is, dan is er ook een signaal waarbij er alsnog moet worden overgegaan tot investeren- of ten minste die optie moet worden overwogen. Om te weten of dat aan de orde is, is het nodig om informatie te verzamelen, bijvoorbeeld over het gebruik van de wegcapaciteit of over de technische staat van dijken en bruggen of de wachttijden bij sluizen en (lucht)havens. Op basis van die

²⁶ Hiervoor is gekozen bij Ramspol. Deze balgstuw is aangelegd om het gebied langs het Zwarte Meer te beschermen tegen opstuwend water uit het Ketelmeer.

informatie kan een oordeel worden gevormd of een nieuw besluitmoment nodig is. Concreet gaat het dan over de vraag wanneer wordt de drukte op de weg, of in de sluis, of op de luchthaven zo groot dat we extra investeringscapaciteit moeten gaan overwegen? Of wanneer wordt de kwaliteit van een waterkering te slecht volgens de daarvoor gestelde norm? Daarbij is het natuurlijk ook raadzaam om nieuwe ontwikkelingen mee te nemen. Het achteloos toepassen van normen uit het verleden, kan leiden tot suboptimale afwegingen, bijvoorbeeld tot het onnodig tegenhouden of hinderen van nieuwe ontwikkelingen of tot de ondoordachte aanleg van infrastructuur.²⁷

Informatie verzamelen is echter niet kosteloos. Dit kan ook worden gezien als een vorm van investeren waarbij de kosten moeten worden afgewogen tegen de baten. De kosten van informatie hangen sterk af van de frequentie waarmee deze wordt verzameld en de eisen aan betrouwbaarheid. De baten van extra informatie hangt nauw samen met in hoeverre dit daadwerkelijk tot betere besluitvorming kan leiden. Een goede investeringsstrategie voor informatie verzamelen over infrastructuur is daarom zeer belangrijk in het algemeen, en in het bijzonder bij flexibele investeringsstrategieën.

Voorbeelden van verschillende vormen van flexibiliteit

De verschillende mogelijke vormen van flexibiliteit hangen sterk af van de soort infrastructuur en de specifieke omstandigheden. Onderstaand overzicht geeft voorbeelden van flexibiliteit voor verschillende soorten infrastructuur. Dit laat het brede spectrum van opties van flexibiliteit in de Nederlandse beleidspraktijk zien. Het eerste deel van het overzicht betreft watervraagstukken, zoals waterveiligheid, waterkwaliteit of vervoer over water (‘natte infrastructuur’). Het tweede deel geeft een aantal voorbeelden voor infrastructuur van weg en spoor.

Tabel 2.1 Voorbeelden van flexibiliteit voor verschillende soorten infrastructuur

Soort flexibiliteit	Voorbeeld
I. Voorbeelden voor ‘natte’ infrastructuur	
Timing: uitstel, faseren	Uitstel investering Zeesluis IJmuiden
	Stapsgewijze aanpak om Afsluitdijk overslagbestendig te maken en de schut- en spuisluizen en pompen aan te passen
	Levensduurverlenging bruggen door aanpassen staalconstructie, extra wapening van beton en moderne kunststofcoatings
Overdimensionering en reservering voor toekomstig gebruik	Volkeraksluizen: ruimte gereserveerd voor toekomstige sluis
	Spoorbrug extra sterk maken zodat eventueel een extra laag daarop gebouwd kan worden
	Autobrug met fietspad waarvan eventueel later ook extra rijbaan kan worden gemaakt

²⁷ Op verschillende beleidsterreinen is sprake van normen. Dit geldt voor waterveiligheid, maar ook voor transport worden soms normen gesteld, bijvoorbeeld met betrekking tot reistijden in de spits. Soms zijn deze normen harde wettelijke randvoorwaarden, soms zijn het slechts streefbeeld of technische normen die misschien deels achterhaald zijn door nieuwe kennis en inzichten. Als alle beleidsvarianten zijn gericht op het halen van een streefbeeld, kan dit op gespannen voet staan met flexibiliteit. Vandaar dat ook flexibele beleidsvarianten moeten worden onderzocht die niet of niet meteen aan het streefbeeld voldoen maar die wel kansrijk lijken in termen van kosten en baten.

Innovatie en experimenteren/kleine en relatief goedkope maatregelen	Grond rond Grevelingen reserveren en gebruik aanpassen met het oog op mogelijke toekomstig gebruik voor waterberging
	Overhoogte en oversterkte bij dijken
	Dijk zo aanleggen dat rijbaan daarover eventueel goedkoop kan worden uitgebreid
	Grootschalige opslag van zoetwater onder de grond; dit kan later als het nodig is worden gebruikt voor bijvoorbeeld landbouw
	Waterberging in Grevelingen en Volkerak-Zoommeer voor extra waterveiligheid
	Bellenscherm als zoet-zoutscheiding bij Volkerak-Zoommeer en Nieuwe Waterweg
	Als effectieve zoet-zoutscheiding heel duur is: zoutschade tijdelijk accepteren of compenseren
	Massaal afvangen brasems om waterkwaliteit te verbeteren in Volkerak-Zoommeer
	Solarbees (pomp op zonne-energie) om waterkwaliteit te verbeteren
	Balgstuw (opblaasbare dam) bij Ramspol als tijdelijke waterkering
Informatie verzamelen	Kustbescherming door het storten van zand voor de kust (zandmotor)
	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 diverse manieren van zoet-zoutscheiding
	Onderzoek naar goedkope levensduurverlenging bruggen
	Onderzoek naar risico op dijkverschuiving en oplossingen daarvoor
	Onderzoek naar verbeteren vismigratie bij Afsluitdijk
II. Voorbeelden voor 'droge' infrastructuur	
Timing: uitstel, faseren	Uitstel verbreding A27 bij Utrecht (zie CPB, 2013)
Overdimensionering en reservering voor toekomstig gebruik	Ruimtereservering parallelle Kaagbaan Schiphol (zie ministerie van I & M, 2013) Ruimtereservering voor toekomstige verbreding van de weg door extra brede vluchstrook, ook bij tunnel, viaduct en brug.
Innovatie en experimenteren/kleine en relatief goedkope oplossingen	Meer pechwagens bij drukke verkeerswegen Verbreding A27 bij Utrecht: gefaseerd aanpassen bestaande verkeersbak Subsidie voor spitsmijders
Informatie verzamelen	Informatie voor reizigers over files, vertragingen en alternatieve routes en modaliteiten
	Light-rail en bussen in plaats van treinverbindingen
	Intelligente transport Systemen (uitwisseling van signalen tussen voertuigen en systemen langs de weg)
	Hightech adaptief verkeersmanagement voor kruispunten, routes en stedelijk netwerk, bijvoorbeeld dynamische groene golven door aanpassing verkeerslichten en prioriteit voor hulpdiensten
	Rekeningrijden met tarieven die verschillen naar gelang de drukte
	Onderzoek naar de langste files op het nationale en regionale wegennet en hun maatschappelijke kosten
	Evaluatie van verkeersmodel (LMS) gebruikt voor analyse van effecten van infrastructuur op het hoofdwegennet en het spoornetwerk
	Update van kengetallen voor kosten- en bateninfrastructuur, zoals van reistijdwaardering, uitstoot van CO2 en fijnstof en verkeersveiligheid
	Onderzoek naar de zelfrijdende auto (zie KiM, 2017) Ex post evaluaties van kosten en baten aanleg wegeninfrastructuur, zoals van rijksweg N17 (Ossokina en Verweij, 2016)

2.4 Flexibele alternatieven bij de Volkeraksluizen

In deze paragraaf wordt het voorbeeld van de uitbreiding van de Volkeraksluizen besproken. Dit illustreert hoe in een MKBA bij de keuze van projectalternatieven kan worden rekening gehouden met flexibiliteit. In hoofdstuk 3 wordt nog verder ingegaan op dit voorbeeld; dan wordt op basis van beslisboomanalyse getoond hoe de kosten en baten van flexibiliteit in beeld kunnen worden gebracht.

De Volkeraksluizen zijn de grootste binnenvaartsluizen van Europa. Door oplopende wachttijden zijn deze sluizen een knelpunt geworden voor de scheepvaart tussen Antwerpen en Rotterdam. Met België is de afspraak gemaakt dat de gemiddelde wachttijd in de drukste maand maximaal 30 minuten mag zijn. Zonder maatregelen kan in de nabije toekomst mogelijk niet aan deze afspraak worden voldaan, dit hangt af van de ontwikkeling van het scheepvaartverkeer.

Figuur 2.4 Volkeraksluizen



In de MIRT-verkenning capaciteitsuitbreiding Volkeraksluizen (Witteveen en Bos, 2012) worden vier verschillende alternatieven vergeleken. Alle alternatieven worden verondersteld te zijn gerealiseerd in 2015. We beperken ons hier tot de twee meest gunstige alternatieven.²⁸ Het eerste alternatief is versnelling van het schutproces, dat wil zeggen het verminderen van de tijd die nodig is om een schip door een sluis heen te krijgen.²⁹ Het tweede alternatief is realisatie van een vierde sluiskolk met een lengte van 270 meter en een breedte van 25 meter.^{30 31}

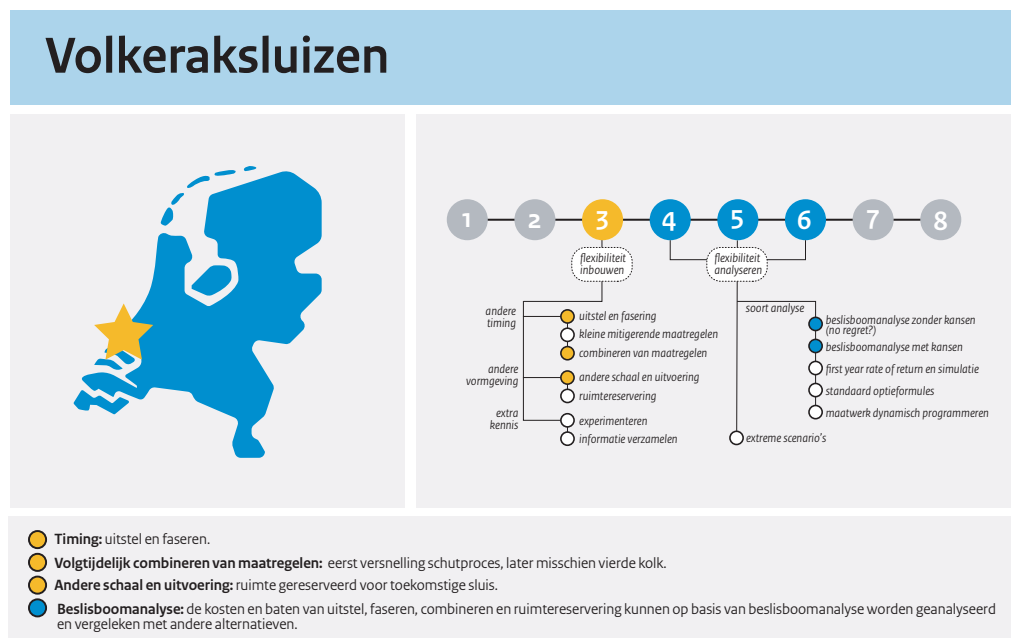
²⁸ De andere twee alternatieven zijn: Aanpassen bestaande infrastructuur: 50% verbreding van de derde kolk naar 37 meter; en Semi-open verbinding door op het Volkeraksluizencomplex een keersluis van 150 meter breedte aan te leggen. Deze alternatieven worden ook besproken in Bos en Zwaneveld (2014).

²⁹ Het vullen of legen van de sluiskolk ('nivelleren') gebeurt momenteel met twee schuiven in de deuren van de schutkolken. In deze deuren zit een derde schuif die in gebruik kan worden genomen. Hierdoor kan de nivelleertijd met ongeveer twee minuten worden teruggebracht en dus ook de wachttijd worden verminderd.

³⁰ Ook zijn subvarianten bekeken. Die gaan uit van een bredere vierde kolk tot 37 meter. Deze subvarianten hadden een vergelijkbare kosten-batenverhouding als de vierde kolk van 25 meter.

³¹ Bij de uitbreiding van de Volkeraksluizen in 1977 is rekening gehouden met flexibiliteit: binnen het complex was ruimte gereserveerd voor de aanleg van een eventuele extra sluiskolk op termijn. Dit kan later als de vierde kolk wordt aangelegd veel geld besparen.

Figuur 2.5 Flexibiliteit en de MKBA Volkeraksluizen



bron: CPB

Bij de analyse worden twee toekomstscenario's voor groei van de scheepvaart door de Volkeraksluizen onderscheiden: Lage groei en Hoge groei.³² Zoals tabel 2.2 laat zien zijn bij het lage groeiscenario geen beleidsmaatregelen nodig om de gemiddelde wachttijd in 2020 en 2040 beneden de 30 minuten te houden. Bij het hoge groeiscenario is dit echter niet voldoende in 2040. Alleen de aanleg van een 4e kolk voldoet dan aan deze 30 minuten-eis. Deze twee alternatieven zijn in de MIRT-verkenning vergeleken op basis van kosten en baten volgens zowel het Lagegroei-scenario als het Hoge groeiscenario.

Tabel 2.2 Gemiddelde wachttijden in minuten voor twee alternatieven voor uitbreiding capaciteit Volkeraksluizen

	Lage groei		Hoge groei	
	2020	2040	2020	2040
Referentiep道	16	14	28	94
Versnelling schutproces	15	13	23	67
Vierde kolk	12	10	15	25

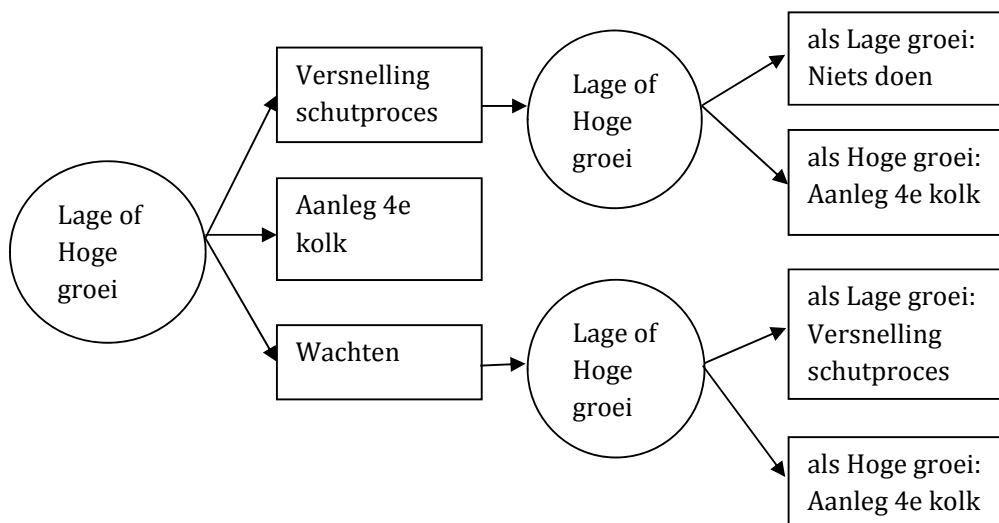
In deze MKBA is echter niet gekeken naar flexibele alternatieven. Een logisch flexibel alternatief is uitstel van de investeringskeuze, bijvoorbeeld uitstel met 10 of 20 jaar. Een andere optie is het in de tijd combineren van beide alternatieven, zoals eerst

³² Beide scenario's zijn afgeleid van de langetermijnsenario's van CPB, MNP & RPB (2006). Hoge groei is het scenario Global Economy met 2,6% volume groei bbp per jaar in de periode 2002-2040 en Lage groei is het scenario Regional Communities met 0,7% volume groei bbp per jaar in deze periode.

aanleggen van de goedkoopste optie (versnellen schutproces) en pas over 10 of 20 jaar overgaan op de relatief dure aanleg van de vierde kolk.

Dit kan ook in de vorm van een beslisboom worden weergegeven. In de beslisboom in onderstaande figuur geeft het linker deel de keuzes volgens de oorspronkelijke MKBA aan en het rechterdeel de extra flexibiliteit door uitstel. Deze flexibele alternatieven hebben het voordeel dat kosten worden uitgesteld en dat door uitstel van de investeringsbeslissing duidelijker wordt welk scenario over de groei van de scheepvaart realiteit wordt; daarmee wordt de kans verkleind dat de investeringen achteraf gezien ten onrechte worden gedaan.

Figuur 2.6 Beslisboom capaciteitsuitbreiding Volkeraksluizen door versnelling schutproces en aanleg 4e kolk en twee opties om later te beslissen (Lage groei: Regional Communities, Hoge groei: Global Economy).



2.5 MKBA en het zoeken naar flexibele alternatieven in het beleidsproces

Een MKBA kan helpen bij het zoeken naar kansrijke flexibele alternatieven en kan de kosten en baten van meer of minder flexibiliteit indicatief in beeld brengen. Maar wat is een MKBA, wat is de rol van MKBA in de verschillende stadia van het beleidsproces?³³ En wat is de relatie met het zoeken naar flexibele alternatieven in het beleidsproces?

Wat is een MKBA?

Een MKBA is een informatie-instrument dat het beleidsproces en de politieke besluitvorming over een maatregel of beleidsalternatief ondersteunt. Een MKBA geeft een overzicht van de kosten en baten van een maatregel voor de (Nederlandse) maatschappij, dat wil zeggen de welvaartseffecten van deze maatregel. Hierbij wordt

³³ Een uitgebreide toelichting is te vinden in Romijn en Renes (2013), hoofdstuk 2.

gekeken naar een breed spectrum van kosten en baten, zoals ook de positieve en negatieve effecten op reistijd, gezondheid, milieu en natuur. Deze kosten en baten worden bepaald in vergelijking met een referentie-alternatief (nul-alternatief) en met andere alternatieven om het zelfde doel te bereiken.

Zoeken naar flexibiliteit met MKBA relevant voor alle stadia van besluitvorming

Het zoeken naar flexibele alternatieven met een MKBA is relevant voor alle stadia van besluitvorming.³⁴ Diverse MKBA's, zoals de MKBA Zeetoegang IJmuiden, MKBA Wind op land en de MKBA Waterveiligheid 21^e eeuw, illustreren hoe met een MKBA naar flexibele alternatieven kan worden gezocht in de verkenningfase en planfase. Daarnaast laten Pol, Bos en Zwaneveld (2016) zien dat dit ook voor de uitvoeringsfase (hoofdbeslissingen, varianten, ontwerp) geldt. Hierbij worden drie voorbeelden uitgewerkt: vervanging van de Meppelerdiepsluis, vervanging van de Ramspolbrug en uitbreiding van een snelweg met tunnel.

Politieke, bestuurlijke en praktische overwegingen kunnen de 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.

3 Kosten en baten van flexibiliteit in MKBA's

3.1 Inleiding

Dit hoofdstuk gaan we in op de analyse van kosten en baten van flexibiliteit bij het opstellen van een MKBA over een infrastructuurproject. In een MKBA kunnen de kosten en baten van flexibiliteit op verschillende manieren worden geanalyseerd. Dit kan met een relatief eenvoudige methode, zoals beslisboomanalyse, maar ook met meer complexe en wiskundige methoden, zoals de standaardformule uit het binomiale model van Cox, Ross en Rubinstein of meer maatwerk analyse via dynamisch programmeren modellen. Kosten en baten van flexibiliteit hangen sterk af van de veronderstellingen en de keuze van de toekomstscenario's. De verschillende methoden van analyse gaan hier verschillend mee om.

In paragraaf 3.2 wordt beslisboomanalyse besproken. In paragraaf 3.3 worden de andere manieren van analyse besproken. Tot slot wordt in paragraaf 3.4 beslisboomanalyse vergeleken met de andere manieren van analyse.

³⁴ 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."

3.2 Beslisboomanalyse

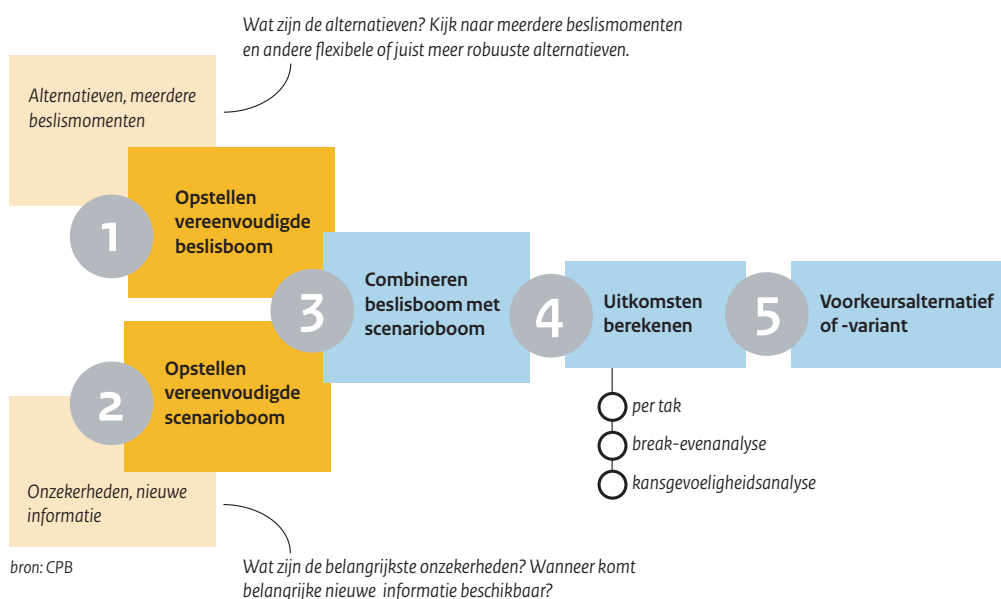
3.2.1 Algemene toelichting

Een toegankelijke methode voor het evalueren van de kosten en baten van flexibele maatregelen is beslisboomanalyse. De beslisboomanalyse is een analyse van investeringsopties op basis van een zo eenvoudige mogelijke beslisboom met de belangrijkste beslissingen in verschillende toekomstscenario's. In deze paragraaf wordt deze methode nader toegelicht.

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. Een voorbeeld is figuur 2.3 over de capaciteitsuitbreiding bij de Volkeraksluizen.

Voor een analyse op basis van een beslisboom 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. Dit kan worden geïllustreerd voor de vervangingsopgave voor de verkeersbrug over het Julianakanaal bij Itteren in Limburg (zie paragraaf 3.2.2).

Figuur 3.1 Stappenplan eenvoudige beslisboomanalyse



Bij beslisboomanalyse kunnen de volgende stappen worden onderscheiden:

- 1) Opstellen vereenvoudigde beslisboom:
 - a) Inventarisatie investeringsalternatieven en mogelijkheden voor flexibiliteit, mede met behulp van uitgebreide beslisboom.
 - b) Opstellen vereenvoudigde beslisboom met belangrijkste beslissingen en minimaal twee beslismomenten.
- 2) Opstellen vereenvoudigde scenarioboorn:
 - a) Inventarisatie van onzekerheden en scenario's, en wanneer belangrijke nieuwe informatie in de tijd beschikbaar komt. Hierbij moet niet alleen worden gekeken naar een hoog en een laag scenario voor de kernonzekerheden, maar ook naar meer extreme scenario's en andere onzekerheden.
 - b) Opstellen van vereenvoudigde scenarioboorn met belangrijkste onzekerheden en scenario's.
- 3) Combineren beslisboom met scenarioboorn, eventueel inclusief nieuwe investeringsalternatieven die beter inspelen op de onzekerheden en scenario's.
- 4) Uitkomsten berekenen per tak en scenario, eventueel aangevuld met een break-evenanalyse of een kansgevoeligheidsanalyse. Dit geeft indicatief de waarde van flexibiliteit en kan eventueel leiden tot nadere analyse van onzekerheden en andere alternatieven, bijvoorbeeld een eerder of later beslismoment afhankelijk van de gevonden kantelpunten in kosten en baten.
- 5) Bepaal voorkeursalternatief of variant.

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 en beslismomenten gemaakt. Eerst worden alle onzekerheden en scenario's 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 scenarioboom worden opgesteld.

De derde stap combineert de beslisboom uit de eerste stap en de scenarioboom uit de tweede stap. Deze stap omvat eventueel ook het toevoegen van nieuwe investeringsalternatieven die als resultaat van de analyse beter lijken in te spelen op de onzekerheden en scenario's (zie paragraaf 2.1).

In de vierde stap worden uitkomsten per tak berekend om inzicht te krijgen in de kosten en baten van een flexibele maatregel zonder kansen toe te rekenen aan toekomstscenario's. De beslisboom laat dan zien wat voor elk van de verschillende toekomstscenario's de kosten en baten van een flexibele maatregel zijn. Mogelijk is een van de alternatieven een no-regret alternatief, dat wil zeggen een alternatief dat onder alle toekomstscenario's het meest gunstig scoort. Verdere analyse is dan niet meer nodig om een voorkeursalternatief te bepalen.

Maar het kan ook zijn dat het alternatief met de hoogste netto baten sterk afhangt van het toekomstscenario. De keuze voor een alternatief kan dan worden ondersteund door een break-evenanalyse of een gevoeligheidsanalyse met verschillende veronderstellingen voor de kans op een toekomstscenario.

Bij een break-evenanalyse van twee alternatieven wordt gekeken wat de kans op twee toekomstscenario's moet zijn opdat hun netto baten precies gelijk zijn. Vervolgens wordt de plausibiliteit van de berekende break-evenkans beoordeeld, dat wil zeggen wordt ingeschat in hoeverre de kansen in de werkelijkheid waarschijnlijk hoger of lager zijn dan de break-evenkans. Hieruit volgt het voorkeursalternatief. Stel bijvoorbeeld dat alternatief A alleen de voorkeur verdient als de kans op het hoge toekomstscenario 80% of meer is. Als het plausibel wordt ingeschat dat in werkelijkheid de kans op het hoge scenario rond de 50% is, dan betekent dit dat het andere alternatief moet worden gekozen.

Bij kansgevoeligheidsanalyse wordt niet gewerkt met break-evenkansen maar worden expliciet veronderstellingen gemaakt over de kansverdeling. Door hier realistische en onrealistische veronderstellingen over te maken en te berekenen wat daarbij de netto baten zijn van een maatregel, wordt indicatief een beeld gekregen van de waarde van een maatregel. Bij deze kansgevoeligheidsanalyse kan rekening worden gehouden met scheve kansverdelingen, dikke staarten (scenario's met kleine kansen) en meerdere onzekerheden.

De break-evenanalyse en de kansgevoeligheidsanalyse geven indicatief een beeld van de kosten en baten van een flexibele maatregel. Dit wordt nader toegelicht in de volgende paragrafen voor investeringen in de Volkeraksluizen en voor de Meppelerdiepsluis. Deze analyses van kunnen eventueel ook leiden tot nadere analyse van onzekerheden en andere alternatieven, bijvoorbeeld een eerder of later beslismoment afhankelijk van de gevonden kantelpunten in kosten en baten.

In de laatste stap kan de informatie uit de beslisboomanalyse (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 beslisboomanalyse kunnen een aantal praktische vragen worden gesteld:

- Worden, kunnen of moeten er nu beslissingen over investeringen genomen? Dan vormt dit het eerste beslismoment van de beslisboomanalyse.
- 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 beslisboomanalyse.
- 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 beslisboomanalyse met enkele beslismomenten minder geschikt.
- Wanneer komt nieuwe informatie beschikbaar over belangrijke onzekerheden van het investeringsproject, zoals over werkelijke verkeersstromen, stremmingen en politieke besluitvorming?

Scenario's, gevoeligheidsanalyse en discontovoet

Bij het opstellen van een MKBA bestaan tal van onzekerheden. De opsteller van de MKBA is er verantwoordelijk voor om deze onzekerheden adequaat in beeld te brengen opdat de gebruiker van de MKBA geen schijnzekerheid wordt voorgespiegeld. Voor MKBA's van infrastructuur in Nederland is het aan te bevelen om gebruik te maken of aan te sluiten bij de WLO-scenario's (zie bijsluiter bij de WLO15 scenario's: Renes en Romijn, 2015). De WLO2015 geeft twee toekomstscenario's (Hoog en Laag) en beschrijving van onzekerheden voor zes thema's: Bevolking, Macro-economie, Regionale ontwikkelingen in verstedelijking, Mobiliteit, Klimaat en energie en Landbouw. Voor analyse van specifieke maatregelen moeten de hoge en lage WLO-scenario's worden vertaald naar de specifieke situatie en lokale omstandigheden. Voor de thema's waterveiligheid en zoetwatervoorziening moeten de WLO2015-scenario's nog vertaald worden in Deltascenario's.

Voor analyse van de kosten en baten van flexibiliteit is beoordeling op basis van een hoog en een laag WLO-scenario een goede basis³⁵ maar kan in twee opzichten

³⁵ In MKBA's van belangrijke recente investeringsprojecten in Nederland zijn echter toch nog vaak slechts de kosten en baten doorgerekend en gepresenteerd voor één, vaak hoog, toekomstscenario. Dit betreft bijvoorbeeld het grootste weginfrastructuurproject van de komende 10 jaar SAA, de uitbreiding van de weg van Schiphol-Amsterdam-Almere. Door de kosten en baten slechts te baseren op één hoog toekomstscenario wordt een

aanvullende analyse nodig zijn. Ten eerste zijn de WLO-scenario's gematigde scenario's. Flexibele maatregelen zijn echter vooral verstandig bij meer extreme omstandigheden; deze hebben misschien wel een kleinere kans van voorkomen, maar kunnen zeer grote gevolgen hebben. Ten tweede zijn allerlei onzekerheden niet in de WLO-scenario's meegenomen. Een groot aantal daarvan worden wel in de WLO-thema cahiers besproken, zoals de invloed van automatisch rijden of overgang op duurzame energie.

In een MKBA kan door middel van een gevoeligheidsanalyse rekening worden gehouden met meer extreme scenario's of andere onzekerheden. Deze meer extreme scenario's of andere onzekerheden kunnen ook in een beslisboom worden meegenomen, waarbij break-evenanalyses en gevoeligheidsanalyse met verschillende veronderstellingen over kansen voor toekomstscenario's nuttig kunnen zijn om indruk te geven van de waarde van extra flexibiliteit. Dit laatste kan worden geïllustreerd met de MKBA Meppelerdiepsluis. Dat doen we in paragraaf 3.2.3. In paragraaf 3.2.2 maken we een analyse over de kernonzekerheid voor de Volkeraksluizen, te weten de toekomstige ontwikkeling van de scheepvaart door de Volkeraksluizen in twee scenario's.³⁶

In paragraaf 3.2.1 beginnen we echter met het maken van een beslisboomanalyse voor de vervangingsopgave van de brug bij Itteren in Limburg. Doel van die casus is om te kijken in hoeverre beslisboomanalyse in een vroeg stadium van besluitvorming³⁷ op een praktische en toegankelijke manier kan helpen om het investeringsprobleem te structureren en de belangrijkste (flexibele) alternatieven te identificeren. In termen van het bovenstaande stappenplan voor beslisboomanalyse komt het neer op het doorlopen van de eerste drie stappen.

Belangrijk kenmerk van een flexibele maatregel kan zijn dat het projectrisico wordt verlaagd in vergelijking met een niet flexibel alternatief, bijvoorbeeld door goed gebruik te maken van nieuwe en betere informatie (zie ook Zeeuw et al. 2010, p. 84). Voor zover dit effect voldoende substantieel is en ook goed gemotiveerd wordt, kan dit in de kosten-batenanalyse worden meegenomen, zie bijvoorbeeld bijlage C in Pol, Bos en Zwaneveld (2016).

eenzijdig gunstig beeld van de baten van een infrastructuurproject gegeven en zal niet of nauwelijks naar flexibele alternatieven worden gekeken.

³⁶ Meer voorbeelden van beslisboomanalyse toegepast op de Nederlandse beleidspraktijk zijn te vinden in Bos en Zwaneveld (2014) en Pol, Bos en Zwaneveld (2016).

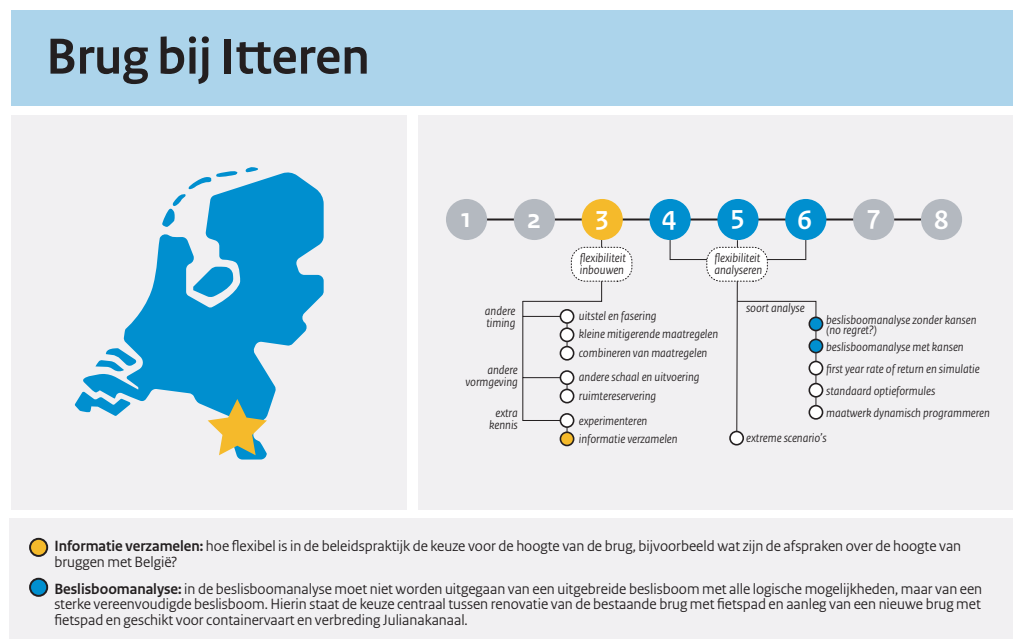
³⁷ Probleemanalyse en ramingen van baten van verschillende beleidsopties zijn nog niet beschikbaar; wel moeten ruwe ramingen van kosten van diverse varianten van aanleg beschikbaar zijn.

3.2.2 Een beslisboom voor de brug bij Itteren³⁸

Het probleem, de alternatieven en de onzekerheden

De bestaande verkeersbrug over het Julianakanaal bij Itteren is smal en voldoet daarom niet meer aan de eisen voor zwaar wegverkeer. Een groot aandeel in dit zware wegverkeer is het transport van en naar een dichtbijgelegen industrieel bedrijf. Dit bedrijf bewerkt grondstoffen en mineralen, zoals klei, bauxiet en kalk, voor vele toepassingen, zoals in de bouw of voor het maken van verf en kunststoffen. Dit leidt tot veel bulktransport. De eerste opgave is om de brug als verkeersverbinding te verbeteren, waarbij de keuze is tussen grondige renovatie of integrale vervanging door een nieuwe brug.

Figuur 3.2 Probleemanalyse met beslisboom voor brug bij Itteren



bron: CPB

Daarnaast is het fietsverkeer via de huidige brug onveilig. Vandaar dat een tweede opgave bij de vervanging een veilige fietsverbinding betreft, vooral voor middelbare scholieren die in Itteren wonen en in Meerssen of Maastricht naar school gaan. Deze fietsverbinding kan via een aparte fietsbrug, maar kan ook worden geïntegreerd in een nieuwe verkeersbrug.

Er is ook sprake van de aanleg van een faunabrug als derde opgave. Het Julianakanaal is een barrière voor de fauna. Door deze barrière worden dieren geïsoleerd in kleine gebieden en is er weinig genetische diversiteit binnen de populatie. Door een aparte faunabrug kan dit worden opgelost. Doelsoorten zijn grote grazers, amfibieën, de

³⁸ Deze casus is gebaseerd op Stratelligence (2016) en feedback hierop door het CPB.

hazelworm, de das, de vale vleermuis en de waterspitsmuis. Bij de faunabrug kan worden gekozen voor een brede brug met 15 meter breedte of een smalle brug met 5 meter breedte. Voor een brede faunabrug is echter nog niet voldoende financiering gevonden.

Een belangrijke onzekerheid is het Julianakanaal. Om vierlaagscontainervaart mogelijk te maken kan in de toekomst een hogere brughoogte vereist zijn: 9,10 meter in plaats van de huidige 7,36 meter. Daarnaast is onderzoek gaande naar verbreding van het kanaal, om het passeren van schepen mogelijk te maken. Deze ontwikkelingen kunnen een effect hebben op de vereiste overspanning en hoogte van de bruggen. Deze onzekerheden zijn beleidsonzekerheden die ook kunnen samenhangen met onzekerheid over de toekomstige ontwikkelingen in de scheepvaart.

Een uitgebreide beslisboom

Voor dit relatief eenvoudige investeringsprobleem kan een zeer uitgebreide beslisboom worden opgesteld met alle onzekerheden (hogere brug misschien nodig vanwege vierlaagscontainervaart, misschien langere brug vanwege verbreding Julianakanaal, wel of geen financiering voor faunabrug) en vele mogelijke beleidsalternatieven (renovatie of vervanging verkeersbrug, wel of niet aparte fietsbrug, diverse varianten faunabrug, bruggen van verschillende hoogtes en lengtes) en met een groot aantal verschillende beslismomenten, bijvoorbeeld elke 5 of 10 jaar. Een dergelijke beslisboom is echter onoverzichtelijk en niet erg informatief en daarmee ook niet geschikt voor verdere analyse van kansrijke beleidsalternatieven.

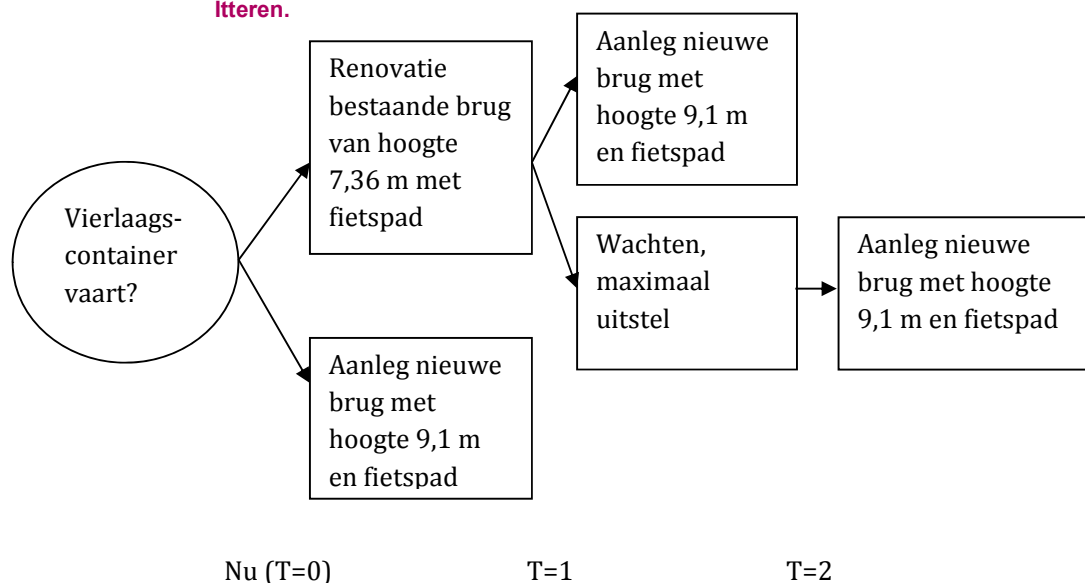
Een eenvoudige beslisboom

Bij het opstellen van een beslisboom moet daarom niet het in kaart brengen van alle logisch mogelijke keuzevarianten en onzekerheden centraal staan, maar het in kaart brengen van de belangrijkste keuzes en onzekerheden. Dit zou je kunnen zien als het opstellen van een karikatuur-schets met de belangrijkste kenmerken van het investeringsprobleem. Hierbij kunnen losstaande of nevenschikte investeringskeuzes worden genegeerd; in dit geval bijvoorbeeld wel of niet en hoe dan een losstaande faunabrug. Ook kunnen keuzes worden geschrapt die op basis van de kostenraming en een ruw idee van de baten weinig kansrijk zijn of nauwelijks verschil maken.

Onderstaande figuur is een sterk vereenvoudigde beslisboom voor deze vervangingsopgave. De boom laat zien dat de initiële keuze gaat tussen het renoveren van de bestaande brug of de aanleg van een nieuwe brug; niets doen is niet acceptabel. De gerenoveerde brug kan later niet worden verlengd. Bij de aanleg van een nieuwe brug kan gekozen worden voor direct een lange brug, maar ook voor verlenging in een later stadium. De vergelijking tussen renovatie en aanleg van een nieuwe brug kan dan eerst worden geanalyseerd voor de onzekerheid over de hoogte van de brug. Bij de aanleg van de nieuwe brug kan dan worden uitgegaan van een niet verlengde brug. Vervolgens (niet in onderstaande beslisboom) kan deze analyse

worden verfijnd door ook rekening te houden met de onzekerheid van verbreding van het Julianakanaal.

Figuur 3.3 Schets van vereenvoudigde beslisboom voor vervangingsopgave brug bij IJtteren.



Drie beslismomenten (nu, $T = 1$ en $T = 2$) zijn onderscheiden. Het precieze tijdstip van het tweede en derde beslismoment is open gelaten. Voor de analyse kan in eerste instantie een specifiek tijdstip als tweede beslismoment worden gekozen, bijvoorbeeld 2030. Vervolgens kan worden bekeken of verschuiving van dit tijdstip de conclusie van de analyse kan veranderen.

Maar eigenlijk is het verschil in uitkomsten zeer beperkt: een nieuwe verkeersbrug met voldoende hoogte voor vierlaagscontainervaart en voldoende overspanning bij verbreding van het Julianakanaal is maar beperkt duurder dan renovatie³⁹ en heeft duidelijk substantiële voordelen. Eerst renoveren en dan later eventueel vervanging zijn daarom weinig kansrijke alternatieven. Gelet op deze geringe spreiding in de kosten van de verschillende alternatieven en dat evident duidelijk is van welke alternatieven de baten het hoogste zijn, is de meerwaarde van beslisboomanalyse in dit geval dan ook beperkt.

³⁹ De investeringskosten van de duurste nieuwe verkeersbrug met aparte fietsbrug bedragen 7,3 miljoen euro. Het alternatief van renovatie zonder verhoging is echter nauwelijks goedkoper en heeft een aanzienlijk kortere levensduur (25 jaar in plaats van 100 jaar), moet in een later stadium misschien met extra kosten worden verhoogd om viercontainervaart door te laten en kan niet worden aangepast voor eventuele verbreding van het Julianakanaal. Renovatie zonder verhoging lijkt daarom al zonder veel analyse een weinig aantrekkelijk investeringsalternatief.

3.2.3 Kosten en baten van flexibiliteit bij de Volkeraksluizen

In de MIRT-verkenning over de uitbreiding van de Volkeraksluizen zijn de kosten en baten van versnelling van de schutsluis vergeleken met die van aanleg van de vierde kolk. De baten in termen van wachttijdwinst zijn gemonetariseerd.⁴⁰ Onderstaande tabel geeft een samenvatting van de kosten en baten van directe aanleg van beide maatregelen. Zoals aangegeven in het vorige hoofdstuk, is bij deze MKBA niet gekeken naar het vergroten van de flexibiliteit, zoals uitstel en het combineren van beide alternatieven. Onderstaande tabel laat ook zien wat het meenemen van twee flexibele alternatieven zou kunnen betekenen⁴¹. Het eerste flexibele alternatief (variant 3) is 10 jaar uitstel van het besluit over aanleg van de vierde kolk; deze zal dan alleen worden aangelegd als het hoge groeiscenario van toepassing blijkt te zijn.⁴² Het tweede flexibele alternatief (variant 4) is combinatie van beide maatregelen: eerst versnelling van het schutproces en daarna, als na 10 jaar het hoge groeiscenario van toepassing blijkt te zijn, aanleg van de vierde kolk.

Tabel 3.1 Kosten en baten van twee basisalternatieven voor capaciteitsuitbreiding Volkeraksluizen plus twee flexibele alternatieven, veronderstelling: na 10 jaar is bekend welk scenario van toepassing is.

	1. Direct versnelling schutproces	2. Direct aanleg 4 ^e kolk	3. 4 ^e Kolk met 10 jaar uitstel	4. Combi variant (= 1 + 3)
	mln euro			
Kosten (negatief)	-3	-110	-58	-61
Baten bij Lage groei	9	13	10	17
Baten bij Hoge groei	94	217	175	241
Netto baten bij Lage groei	6	-97	0 (geen 4 ^e kolk)	6 (geen 4 ^e kolk)
Netto baten bij Hoge groei	91	107	117	180
Netto baten bij 50% Laag, 50% Hoog	49	5	59	93
Netto baten bij 75% Laag, 25% Hoog	27	-46	29	50
Netto baten bij 25% Laag, 75% Hoog	70	56	88	137

Als alleen naar de beide direct-investeren alternatieven wordt gekeken bij het lage groeiscenario, zijn de netto baten van Direct versnelling van het schutproces 6 miljoen euro positief, terwijl bij aanleg van de 4^e kolk dan 97 miljoen euro negatief. Bij het hoge groeiscenario hebben beide alternatieven een positieve score (91 miljoen versus 107 miljoen), maar is aanleg van de 4^e kolk 16 miljoen euro aantrekkelijker. Als beide scenario's een gelijke kans hebben, dan is de verwachte waarde van direct versnelling van het schutproces duidelijk hoger dan die van directe aanleg van de 4^e

⁴⁰ Daarnaast is gekeken naar diverse andere aspecten, zoals reisbetrouwbaarheid en effecten op natuur, veiligheid en omgeving. Deze kosten en baten zijn kwalitatief onderzocht, maar niet gekwantificeerd en gemonetariseerd.

⁴¹ Deze hadden tijdens het opstellen van de oorspronkelijke MKBA eenvoudig kunnen worden geraamd, vrijwel op basis van dezelfde informatie als de raming van de baten bij direct investeren. Dergelijke informatie is nu niet meer beschikbaar, vandaar dat hier met fictieve cijfers op basis van enkele veronderstellingen is gewerkt.

⁴² Het is ook mogelijk te veronderstellen dat dit na 10 jaar niet geheel duidelijk is, maar wel duidelijker dan 10 jaar daarvoor.

kolk. Zelfs als het hoge scenario 75% kans heeft, is de verwachte waarde van direct versnelling van het schutproces nog hoger dan die van directe aanleg van de 4^e kolk. Een break-evenkans kan hier ook worden berekend en die is hier ongeveer 86%. Alleen als de kans op het hoge scenario ruim 86% is, verdient direct aanleg van de 4^e kolk de voorkeur boven directe versnelling van het schutproces.

Door ook naar de flexibele alternatieven te kijken, verandert de keuze aanzienlijk. Verondersteld wordt dat door 10 jaar uitstel duidelijk wordt welk scenario van toepassing is. Bij een investeringskeuze na 10 jaar zal daarom alleen in het hoge groei scenario de 4^e kolk worden aangelegd; in het lage groei scenario wordt de 4^e kolk niet aangelegd. Dit betekent dat door uitstel een achteraf gezien onnodige investering wordt voorkomen. Bij hoge groei scoort aanleg van de 4^e kolk na 10 jaar beter dan directe aanleg van de 4^e kolk, maar de combinatievariant van eerst versnellen van het schutproces en dan na 10 jaar aanleg van de 4^e kolk het best. Zonder naar kansen voor de verschillende scenario's te kijken is dit dan het meest aantrekkelijk alternatief van de 4 varianten.

Om een indruk te krijgen van de meerwaarde van deze flexibele combinatievariant kan met verschillende veronderstellingen over kansen worden gewerkt. In vergelijking met direct versnelling van het schutproces is het verschil 44 miljoen euro (bij 50%-50%), 23 miljoen euro (bij 75%-25%) en 67 miljoen euro (bij 25%-75%).

Uit deze resultaten⁴³ kan worden afgeleid dat het verstandig is om de 4^e kolk (A.2) niet direct aan te leggen, maar voor de combinatie-variant te kiezen en te wachten totdat de vervoergroei (of beter: de wachttijden) zodanig oplopen dat het moment daar is om de 4^e kolk aan te leggen.

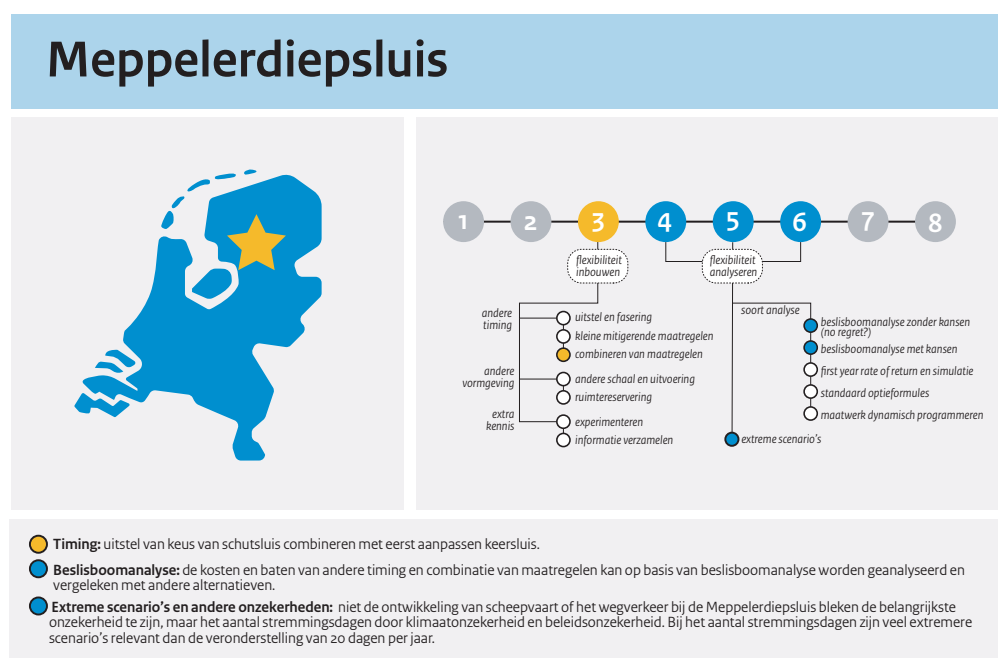
3.2.4 Kosten en baten van flexibiliteit bij de Meppelerdiepsluis

De MKBA Meppelerdiepsluis betreft de vervanging van de 50 jaar oude keersluis bij het Meppelerdiep (zie Pol et al., 2016, paragraaf 3.2). De keersluis behoort tot de primaire waterkeringen. Deze sluis keert het water bij te hoge of te lage waterstanden op het Zwarte Water of het Meppelerdiep. De sluis 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.

⁴³ Overigens is deze analyse in een aantal opzichten nog te simplistisch. Bijvoorbeeld, na tien jaar is vaak nog niet precies duidelijk welk economisch scenario van toepassing is; wel zal veel meer bekend zijn in hoeverre de wachttijden zijn opgelopen en wat relevante andere economische ontwikkelingen zijn, bijvoorbeeld over positie van de haven van Rotterdam en de relatieve aantrekkelijkheid van verschillende vervoersvormen (over water, per spoor, over de weg of door de lucht). Ook wordt geen rekening gehouden met negatieve uitstraling van uitstel of onduidelijkheid van besluitvorming op andere investeringen. Lange wachttijden in de Volkeraksluizen kan de concurrentiepositie van de Rotterdamse haven aantasten en betekenen dat bedrijven in hun korte- of langetermijnstrategie gaan kiezen voor ander vervoersroutes (bijvoorbeeld via Antwerpen of over de weg). Dergelijke strategische overwegingen kunnen uitstel van aanleg van de 4^e kolk minder aantrekkelijk maken.

Vanwege de wettelijke waterveiligheidseisen, is uitstel van investeringen in de sluis niet mogelijk. De minimale variant in de uitgevoerde MKBA is dan ook het behoud van de huidige keersluis gecombineerd met de bouw van een extra stel vloeddeuren om de waterveiligheid te bevorderen. Deze minimale variant wordt in de beslisboom vergeleken met een alternatief waarbij een schutsluis de keersluis direct vervangt. Met een schutsluis kunnen schepen het hele jaar het Meppelerdiep passeren, maar dit gaat gepaard met aanzienlijk hogere investeringskosten.

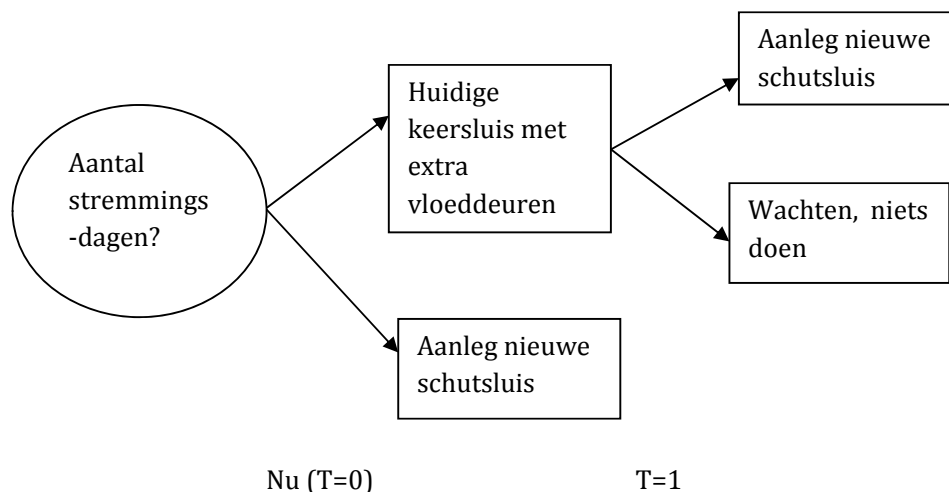
Figuur 3.4 Flexibiliteit bij investeren in de Meppelerdiepsluis



bron: CPB

Uitgangspunt van deze MKBA is dat de stremming bij een keersluis in de toekomst in beperkte mate toeneemt, nl. van de huidige 16 dagen naar 20 dagen. Bij deze veronderstelling is handhaven van de keersluis het gunstigst. Als veiligheidseisen strenger worden of laag- en hoogwater vaker voorkomt in de toekomst dan nu gedacht, neemt het aantal dagen dat de sluis gestremd is sterk toe. Daarom zijn aanvullende analyses verricht met meer stremmingsdagen. In sommige stremmingsscenario's is het aantal stremmingsdagen zo hoog, dat een schutsluis een rendabele investering is.

Figuur 3.5 Beslisboom Meppelerdiepsluis



Deze set van scenario-specifieke gegevens is gebruikt voor het opstellen van een beslisboom. Vergeleken met de oorspronkelijke MKBA zijn twee elementen toegevoegd. Ten eerste is de minimale variant flexibeler gedefinieerd door een tweede beslismoment te introduceren. In eerste instantie worden alleen extra vloeddeuren aangelegd. Vervolgens wordt na tien jaar besloten of het verstandig is om de keersluis alsnog om te bouwen tot een schutsluis. Het tweede element is dat kansgevoeligheidsanalyse is toegepast op de vier stremmingsscenario's (zie onderstaande tabel).

Tabel 3.2 Schutsluis of keersluis met uitgestelde ombouw bij Meppelerdiep: netto baten bij verschillende stremmingskansen

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
Verskil NCW schutsluis t.o.v. keersluis (mln euro)	1,2	-2,7	-3,5

Of de initieel goedkope en flexibele oplossing (eerst keersluis handhaven) of de duurdere maar meer robuuste oplossing (direct een schutsluis) beter scoort in termen van verwachte netto baten hangt af van de kans op een sterke stijging van het aantal stremmingsdagen. Alleen bij de weinig realistische uniforme kansen zal direct investeren in de schutsluis een voordeel van 1,2 mln euro in netto contante waarde opleveren. Bij meer realistische aannames zal het in eerste instantie handhaven van de keersluis gunstiger zijn. Bij een kans van 50% op 20 dagen stremming en 5% op 60 dagen bespaart dit bijvoorbeeld 2,7 mln euro. Eerst kiezen voor handhaven van de

keersluis lijkt daarom een redelijke keus, zelfs als het aantal stremmingdagen in de toekomst misschien nog sterk toeneemt.

Deze nieuwe analyse bevestigt dus de voorkeur uit de oorspronkelijke MKBA voor een keersluis, maar geeft wel een aangepast en scherper beeld. Vanwege de extra flexibiliteit zijn de baten van eerst de keersluis handhaven en eventueel later alsnog een schutsluis realiseren hoger. De nieuwe analyse laat echter ook zien dat direct de schutsluis bouwen een meer robuuste oplossing is die extra voordelen biedt bij een grote toename van het aantal stremmingdagen.

3.3 Andere analyses van flexibiliteit

Behalve beslisboomanalyse zijn er nog diverse andere methoden om de kosten en baten van flexibele maatregelen te bepalen. We kunnen hierbij een onderscheid maken tussen:

- Bepalen optimale timing via ‘first year rate of return’ of meer uitgebreide simulaties;
- Standaard optieformules voor timing en waarde van flexibiliteit;
- Maatwerk formules en modellen voor optimaliseren investeringen (‘maatwerk dynamisch programmeren’).

First year rate of return

Om de optimale timing van een maatregel te bepalen kan de zogenaamde ‘first year rate of return’ worden berekend. Door het vergelijken van de netto contante waarde van een maatregel met die van dezelfde maatregel met één jaar (of een andere periode, bijvoorbeeld van meerdere jaren) vertraging kan het optimale moment van investeren worden bepaald (zie OEI-Leidraad, Eijgenraam et al., 2000, bijlage C). Toegepast op de Volkeraksluizen zou het betekenen dat niet met een variant met 10 jaar uitstel van aanleg van de 4^e kolk wordt gerekend, maar dat de netto baten worden bepaald voor meerdere uitstelvarianten, bijvoorbeeld voor 5, 10 en 25 jaar.

Simulatie van verschillende timing in MKBA Maasvlakte 2

Een veel uitgebreidere en meer complexe methode is toegepast bij de MKBA Maasvlakte 2 (CPB, NEI en RIVM, 2001). Centrale vraag was met hoeveel en in welk tempo de Rotterdamse haven moet worden uitgebreid door landaanwinning. Eerst is gekeken op welke manier de tweede Maasvlakte aangelegd kon worden. Conclusie was dat flexibele (én gefaseerde) aanleg verreweg het goedkoopste is en het minste risico met zich meebrengt.

Vervolgens is gekeken in welk jaar de eerste fase moet worden aangelegd en wat daarvan het welvaartseffect is. Als te snel nieuwe haventerreinen worden aangelegd, is het risico dat terreinen lange tijd onverhuurd blijven. Als te langzaam wordt

aangelegd, is er de kans 'nee' te moeten verkopen aan een klant die wellicht niet meer terugkomt. Daardoor kunnen permanent inkomsten worden misgelopen. Zowel te snel aanleggen als te langzaam aanleggen is niet efficiënt. Ergens in het midden moet dus een optimum liggen. Op basis van dergelijke argumenten is een logische beslisregel ontwikkeld wanneer met de aanleg begonnen diende te worden. Dat was als de vraag op enig moment een bepaalde grenswaarde overschreed.

Door middel van simulatiemodellen is per sociaaleconomisch scenario geanalyseerd wat de meest geschikte timing en manier is om de Rotterdamse haven uit te breiden, de vraag naar haventerrein toe te wijzen en het haventerrein in te richten. Op basis van deze simulaties is per scenario gerapporteerd in welk jaar de aanleg 'gemiddeld' zou moeten starten en wat het gemiddelde maatschappelijke rendement dan is.

Ondanks de complexe en tijdrovende analyses is bij deze KBA geen formele reële optieanalyse toegepast. Zo is niet het 'optimale' moment van aanleg bepaald, maar slechts een 'logisch' moment. Ook zijn de resultaten van verschillende sociaaleconomische scenario's niet samengewogen tot één getal. Desondanks hebben de onderzoekers nadrukkelijk gezocht naar het faseren van het project, hebben zij de waarde van die flexibiliteit kunnen vaststellen en inzicht gegeven in welk jaar naar verwachting zou moeten worden gestart met aanleg en wat andere mogelijkheden zijn om het rendement van het project te vergroten.

Standaard optieformules

Bij analyse van financiële of reële opties kan worden gebruikgemaakt van standaardformules met slechts enkele variabelen, zoals de Black-Scholes formule en het binomiale model van Cox, Ross en Rubinstein (1979). Als een raming of veronderstelling kan worden gemaakt voor die enkele variabelen, zoals de volatiliteit en de risico vrije discontovoet (zie bijlage), leveren deze standaardformules direct en zonder enige extra inspanning een concrete uitkomst van de waarde van de optie en het moment waarop het rendabel is om die uit te gaan oefenen.

Een algemeen bekend reële optiemodel voor Amerikaanse call opties is het binomiale model van Cox, Ross en Rubinstein (1979).⁴⁴ Dit model is gebruikt voor bijvoorbeeld investeringen in een irrigatiedam (Michailidis en Mattas, 2007), een waterkrachtcentrale (Santos et al., 2014) en een chemische fabriek (Copeland en Tufano, 2004) en sterk gerelateerde modellen rond mijnbeslissingen (Brandão en Dyer, 2005) en tolwegen (Garvin en Cheah, 2004). Het gaat bij deze toepassingen om diverse vormen van flexibiliteit, zoals uitgestelde investeringen en uitbreiding of stopzetting van investeringen.

De raming van de volatiliteit van de projectbaten heeft grote invloed op optimale timing van een investering volgens het binomiale model. Deze projectbaten van een

⁴⁴ Dit is een contingent claims model in discrete tijd (zie van der Pol, Bos en Zwaneveld, 2016, hoofdstuk 4).

4^e kolk hangen sterk samen met de wachttijden. Deze volatiliteit kan worden geraamd op basis van de baten in de scenario's die onderscheiden zijn in de MKBA. Voordeel hiervan is dat de resultaten dan redelijk consistent zijn met die uit de MKBA. De volatiliteit van de projectbaten moet echter niet worden geraamd op basis van historische gegevens van vervoerstromen. Deze vervoerstromen zijn geen goede indicator van volatiliteit van de projectbaten omdat niet wordt gekeken naar de wachttijden. Ook is deze raming erg gevoelig voor de keuze van de lengte van de periode van deze historische gegevens en belangrijk is dat rekening moet worden gehouden met een trend.

Het model van Cox, Ross en Rubinstein is echter niet geschikt om de uitgestelde investering in de vierde kolk van de Volkeraksluizen te analyseren. Belangrijke beperkingen van dit binomiale model zijn de veronderstellingen van een lognormale verdeling van de baten voor de kernonzekerheid wachttijden en een stabiel groeiende batenstroom in de tijd. Dat laatste is niet realistisch bij in de tijd sterk oplopende wachttijden, zoals bij de Volkeraksluizen.

Maatwerk dynamisch programmeren⁴⁵

Dit probleem geldt breder: veel infrastructuurproblemen passen niet goed in de uitgangspunten van het model van Cox, Ross en Rubinstein. Als dat model dat toch wordt toegepast, leidt dat tot misleidende uitkomsten. We raden het gebruik ervan dan ook af. Als de MKBA opsteller het model van Cox, Ross en Rubinstein toch gebruikt, zal eerst aannemelijk moeten worden gemaakt dat die methode ook daadwerkelijk aansluit bij het voorliggende probleem.

Het binomiale model van Cox, Ross en Rubinstein (1979) is een zeer specifieke vorm van dynamisch programmeren. Bij dynamisch programmeren is het echter ook mogelijk het model aan te passen aan het specifieke investeringsprobleem. Zo is het mogelijk aanpassingen te maken voor de belangrijkste beperkende aannames uit het binomiale model Cox, Ross en Rubinstein (1979), zoals kansverdeling van de baten, de vaste dividendfactor in de tijd en de risico-aangepaste discontovoet. Ook kunnen meervoudige opties worden geanalyseerd, bijvoorbeeld bij de Volkeraksluizen aanleg van de vierde kolk in combinatie met andere investeringskeuzes. In de bijlage wordt verder stilgestaan bij de techniek achter het dynamisch programmeren.

Een ander voorbeeld van maatwerk via dynamisch programmeren betreft de optimale hoogte van dijken. In diverse Nederlandse MKBA's (MKBA Ruimte voor de rivier, MKBA Waterveiligheid 21^e eeuw) is de optimale hoogte of sterkte van dijken

⁴⁵ 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 verrat in wiskundige formules en kansverdelingen.

uitgebreid geanalyseerd met een dynamisch programmeren model. Hierbij is telkens gekeken in hoeverre verhoging van de dijken voldoende extra baten opleverde in termen van minder verwachte schade door overstromingen om de extra kosten te rechtvaardigen. De optimale hoogte verandert in de tijd door groei van de bevolking en de economie en vanwege de grote vaste kosten is het verstandig om de dijken te verhogen in niet al te kleine stappen. Net als de analyse bij de MKBA Maasvlakte 2 is ook deze analyse complex.

3.4 Wanneer welke soort analyse?

Bovenstaande algemene toelichting⁴⁶ op verschillende methoden om flexibiliteit te analyseren laat zien dat deze variëren van relatief eenvoudig tot complex, zeer wiskundig en arbeidsintensief. Beslisboomanalyse is relatief eenvoudig en algemeen toepasbaar voor het identificeren van flexibiliteit en voor het indicatief waarderen hiervan.

Als vervolgens nadere analyse van een goede timing van de investering nodig is, kan dit worden aangevuld door meer complexe methoden, zoals dynamisch programmeren. Een alternatief is simulatie, zoals toegepast bij de aanleg van de Maasvlakte. Bij het gebruik van bekende standaard optie-formules, zoals die van Cox, Ross en Rubinstein (1979), moet goed worden opgelet in hoeverre de veronderstellingen van dit model en de raming van de parameters passen bij het specifieke probleem en de specifieke situatie. Bij investeringsproblemen waarbij de projectbaten nauw samen hangen met wachttijden is dit model niet geschikt.

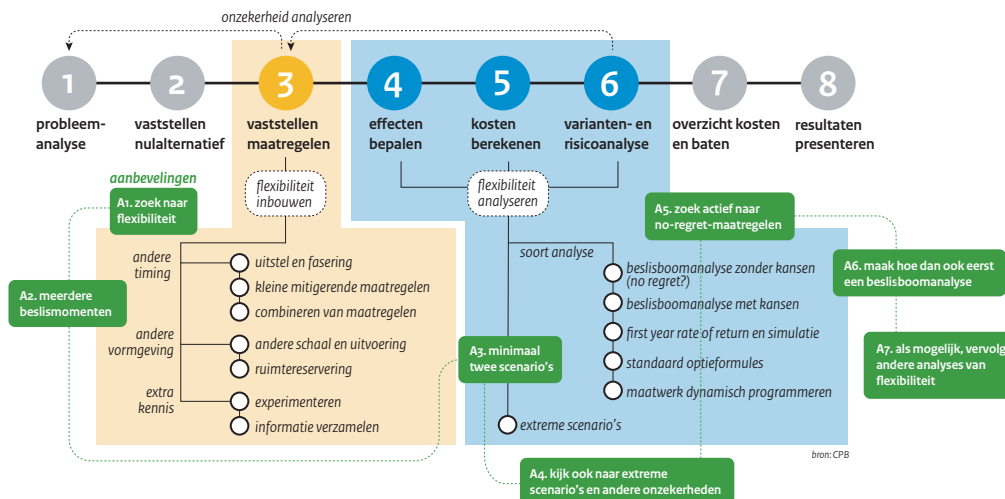
Tot slot kan nog worden opgemerkt dat meer wiskundige reële optiemethoden, zoals dynamisch programmeren, laten zien dat het voor een optimale investering niet voldoende is dat de baten groter zijn dan de kosten, maar dat een veel hogere baten/kostenratio nodig is om tot investering over te gaan. Dit komt omdat bij het overgaan tot investeren de optie tot uitstel wordt opgeofferd. Deze optie is waardevol en moet als kostenpost worden meegenomen in de analyse.

4 Conclusies

Flexibiliteit van infrastructuurinvesteringen kan van grote waarde zijn in een toenemend onzekere toekomst. Door flexibiliteit in te bouwen kan op investeringen die achteraf gezien onnodig zijn, worden bespaard en kan beter worden ingespeeld op toekomstige ontwikkelingen in de economie, demografie, klimaat, technologie en politieke besluitvorming. Flexibele oplossingen zijn echter niet kosteloos – kleine stapjes moeten het bijvoorbeeld doen zonder de kostenvoordelen van schaalgrootte.

⁴⁶ Voor een uitgebreider overzicht, zie Pol, Bos en Zwaneveld (2016).

Figuur 4.1 Flexibiliteit in het 8-stappenplan voor MKBA's, inclusief 7 aanbevelingen



Uit de vorige twee hoofdstukken kunnen voor MKBA's van infrastructuurprojecten de volgende zeven aanbevelingen worden afgeleid.

A1. Zoek naar flexibiliteit.

Ga na welke vormen van flexibiliteit mogelijk zijn in een project. Gebruik hierbij de verschillende vormen van flexibiliteit uit paragraaf 2.4 als checklist. Neem flexibele varianten op als extra beleidsvarianten.

A2. Meerdere beslismomenten.

Gebruik meerdere beslismomenten, want anders is flexibiliteit in de vorm van uitstel, fasering, combineren van maatregelen in de tijd niet mogelijk. Welke beslismomenten geschikt zijn hangt af van de soort analyse en specifieke situatie. Hierbij moet worden gelet op kantelpunten in kosten en baten: vanaf welk moment nemen deze sterk toe of af. Een praktische aanpak is om eerst een analyse te doen met een extra beslismoment, bijvoorbeeld over tien jaar. En vervolgens te kijken of verschuiven van dat moment gunstig is en om pas daarna te kijken naar nog meer beslismomenten.

A3. Minimaal twee scenario's.

Voor analyse en presentatie van de eindresultaten moeten minimaal twee scenario's voor de kernonzekerheid worden gebruikt. Dit laat zien hoe flexibel en robuust maatregelen zijn bij verschillende toekomstscenario's.

A4. Kijk ook naar meer extreme scenario's en andere onzekerheden.

Ook de invloed op kosten en baten van meer extreme scenario's en andere onzekerheden moet in een MKBA worden onderzocht. Juist voor de kosten en baten van flexibiliteit zijn deze vaak van extra groot belang. Hieraan zal zelfs al in de probleemanalyse aandacht moeten worden besteed.

A5. Zoek actief naar no-regret maatregelen.

Zoek actief naar no-regret of low-regret maatregelen, zoals uitstel of faseren van een grote investering of eerst kleine goedkope maatregelen en daarna eventueel naar bevind van zaken een grote investering als de omstandigheden of ontwikkelingen daartoe aanleiding geven. Doe bijvoorbeeld een gevoeligheidsanalyse met verschillende toekomstscenario's voor verschillende onzekerheden. Mogelijk blijkt dan dat het inbouwen van een bepaalde mate van flexibiliteit in een projectalternatief in alle scenario's rendabel is. Het bepalen van de kosten en baten van flexibiliteit is dan niet nodig en dit voorkomt vaak complexe en tijdsintensieve analyse. Dit is een les die ook blijkt uit de enkele Nederlandse MKBA's, waarin wel aandacht is besteed aan het inbouwen van flexibiliteit in de investeringsalternatieven. No-regret alternatieven blijken vaak aanwezig te zijn. Deze kunnen ook in het nul alternatief voor het beoordelen van mogelijke vervolgmaatregelen worden meegenomen.

A6. Maak hoe dan ook een beslisboomanalyse.

Beslisboomanalyse is een eenvoudige en algemeen toegankelijke methode voor het identificeren en globaal waarderen van flexibiliteit en past goed in een MKBA. Laat allereerst de spreiding van de uitkomsten zien met behulp van een eenvoudige beslisboom. Als er geen no-regret maatregelen zijn, kan vervolgens op basis van break-evenkansen en verschillende veronderstellingen over kansen indicatief de waarde van flexibiliteit worden bepaald. Voor het analyseren van optimale timing en maatvoering van investeringsprojecten is deze methode echter niet geschikt.

A7. Als mogelijk vervolg andere analyses van flexibiliteit.

Overweeg daarna of het gebruik van andere methoden meerwaarde biedt, zoals first year rate of return of meer maatwerk analyse met dynamisch programmeren modellen of simulatie. Standaardformules zoals die uit het binomiale model van Cox, Ross en Rubinstein, raden we in beginsel af. Als ze toch worden gebruikt moet goed worden gemotiveerd waarom dit aansluit op het voorliggende probleem. Als er veel spreiding is in de uitkomsten, zal het investeren in een goede analyse van de kosten en baten van flexibiliteit een belangrijk verschil kunnen maken. Als er weinig spreiding in de uitkomsten is, maakt de keuze van het investeringsalternatief kennelijk weinig uit en zullen de voordelen van een extra analyse op basis van een andere methode beperkt zijn.

Literatuur

AVV et al. 2001, Op het goede spoor. Kosten-Batenonderzoek naar een betere benutting van de spoorlijn Utrecht-Arnhem-Duitsland, Rijkswaterstaat/Adviesdienst Verkeer en Vervoer.

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.

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

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

Blue Economy, 2014, *Handreiking Adaptief Programmeren*, in opdracht van ministerie van Infrastructuur en Milieu.

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., T. van der Pol en P. Zwaneveld, 2016, Beter omgaan met onzekerheid bij MKBA's infrastructuur, 2016, *ESB*, vol. 101(4731): 234-237.

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

Bos, F. en P. Zwaneveld, 2017, Cost-benefit analysis for flood risk management and water governance in the Netherlands; an overview of one century, CPB Backgroundpaper.

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.

Bruggeman, W. et al., 2013, Deltascenario's voor 2050 en 2100; nadere uitwerking 2012-2013, PBL.

Camps, M., 2017, Durf te leren, *ESB Nieuwjaarsartikel*, vol.102(4754): 6-9.

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*, vol. 82(3): 90-99.

Cox, J.C., S.A. Ross, en M. Rubinstein, 1979, Option pricing: A simplified approach, *Journal of Financial Economics*, vol. 7(3): 229-263.

CPB, MNP en RPB, 2006, *Welvaart en Leefomgeving: Een scenariostudie voor Nederland in 2040*, Den Haag/Bilthoven: Centraal Planbureau, Milieu- en Natuurplanbureau en Ruimtelijk Planbureau.

CPB, 2014, Second Opinion MKBA Ring Utrecht.

CPB en PBL, 2015, Nederland in 2030 en 2050: twee referentiescenario's - Toekomstverkenning Welvaart en Leefomgeving ('WLO 2015').

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 University Press, Princeton.

Eijgenraam, C.J.J., C.C. Koopmans, P.J.G. Tang en A.C.P. Verster, 2001, Evaluatie van infrastructuurprojecten: leidraad voor kosten-batenanalyse ("OEI-Leidraad"), Den Haag, CPB / NEI.

Gerwen, O.J., J. Ritsema van Eck, P. Zwaneveld en J. van Gemeren, 2017, Zet de trek naar de (Rand-)stad door?, *Rooilijn*, vol. 50(3): 202-209.

Haasnoot, M., J.H. Kwakkel, W.E. Walker and J.T. Maat, 2013, Dynamic Adaptive Policy Pathways: A Method for Crafting Robust Decisions for a Deeply Uncertain World, *Global Environmental Change*, vol. 23(2): 485-498.

He, H., 1990, Convergence from discrete- to continuous-time contingent claims prices, *Review of Financial Studies*, vol. 3(4): 523-546.

Herman, J.D., P.M. Reed, H.B. Zeff and G.W. Characklis, 2015, How should robustness be defined for water systems planning under change? *Journal of Water Resources Planning Management*, vol. 141(10), 04015012/1-13.

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.

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.

Kalra, N., S. Hallegatte, R. Lempert, C. Brown, A. Fozzard, S. Gill en A. Shah, 2014, Agreeing on robust decisions: new processes for decision making under deep uncertainty, Policy Research working paper WPS 6906, Washington DC, World Bank Group; "Robust-decision-making" in en.wikipedia.org.

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.

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.

KiM, 2017. Paden naar een zelfrijdende toekomst. Vijf transitiestappen in beeld.

Klijn, F., H. Kreibich, H. de Moel en E. Penning-Rowsell, 2015, Adaptive flood risk management planning based on a comprehensive flood risk conceptualisation, *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, vol. 20(6): 845-864.

Merton, R.C., 1998, Applications of option-pricing theory: Twenty-five years later, *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 Economische Zaken, 2017, Sturen in een verweven dynamiek; perspectieven op complexiteit en oriëntaties voor beleid (essay-bundel);

Ministerie van Infrastructuur en Milieu, 2013. Besluit tot wijziging van het Besluit algemene regels ruimtelijke ordening (ruimtereservering parallelle Kaagbaan).

Ministerie van Infrastructuur en Milieu, 2016, Spelregels van het Meerjarenprogramma Infrastructuur en Ruimte (MIRT).

Ossokina, I. en G. Verweij, 2016, Omgevingsbaten onderschat bij wegaanleg, *ESB* 101(4731): 230-233.

Pol, T. van der, F. Bos en P. Zwaneveld, 2016, Reële opties en het waarderen van flexibiliteit bij MKBA's infrastructuur, CPB Achtergronddocument.

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.

Rhee, C.G., M. Pieters en M.P. van de Voort, 2008, Real Options applied to infrastructure projects: a new approach to valuing and managing risk and flexibility, paper presented at the International Conference on Infrastructure Systems, 10-12 November, 2008, Rotterdam, The Netherlands.

Romijn, G. en G. Renes, 2013, Algemene Leidraad voor Maatschappelijke Kosten-Batenanalyse, CPB en PBL.

Romijn, G. en G. Renes, 2015, Bijsluiters bij WLO2015-scenario's, CPB en PBL.

Romijn, G., G. Renes en W. Grevers, 2012, Second Opinion MKBA RRAAM, CPB/PBL Notitie 30 oktober 2012.

Romijn, G. en S. Visser, 2012, Second opinion KBA Zeetoegang IJmond, CPB Notitie 28 maart 2012.

Rosenberg, F.A., Koopmans, C.C., 2004, „Kosten-batenanalyse Zeetoegang IJmuiden, SEO Economisch Onderzoek.

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.

Stratelligence, 2012, Handreiking Adaptief Deltamanagement, rapport in opdracht van de Deltacommissaris.

Stratelligence, 2016, Reële optie-analyse ex ante: toepassing op de Corridor Hoorn-Amsterdam en de brug bij Itteren, Stratelligence, Leiden.

Trigeorgis, L., 1996, *Real options: Managerial flexibility and strategy in resource allocation*, MIT Press, Cambridge, London.

Verrips, A. en A. Hoen, 2016, *Kansrijk Mobiliteitsbeleid*, CPB en PBL.

Visser, J., 2017, Adaptief programmeren in het fysiek-ruimtelijk beleid; hoe om te gaan met onzekerheid?, KiM Notitie.

Walker, W.E., S.A. Rahman en J. Cave, 2001, Adaptive policies, policy analysis and policy making, *European Journal of Operational Research*, vol. 128: 282-289.

Werkgroep Discontovoet 2015, 2015, Rapport Werkgroep Discontovoet 2015.

World-Economic Forum, 2015, Global Competitiveness Report 2015-2016.

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 approach, Den Haag, CPB.

Zeeuw, A. de, R. in 't Veld, D. van Soest, L. Meuleman en P. Hoogewoning, 2008, Social cost-benefit analysis for environmental policy-making, RMNO Background Study V.14, Raad voor Ruimtelijke, Milieu- en Natuuronderzoek (RMNO).

Bijlage formele reële optiemethoden

In deze bijlage⁴⁷ worden drie soorten formele reële optiemethoden besproken:

- Continue contingent claims methoden, zoals de Black-Scholes formule;
- Discrete contingent claims, zoals het bionomiale model van Cox, Ross en Rubinstein (1979).
- Investeringsoptimalisatie met dynamisch programmeren ('dynamisch programmeren').

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.

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 en 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.

⁴⁷ Deze bijlage is ontleend aan Pol, Bos en Zwaneveld (2016); zij geven ook nog een meer uitgebreide toelichting op de verschillende reële optiemethoden.

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.

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 getallenvoorbeeld Black-Scholes formule.

	$S = 92,5$	$S = 97,5$	$S = 102,5$
$\sigma = 0,1$	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 volatiliteit: de optie wordt meer waard als de onzekerheid toeneemt.

Als – met de nadruk op als – het investeringsproject voldoet aan de aannames van het Black-Scholes model, 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 overgegaan op het tweede beslismoment (T). Dit zijn de extra kosten die moeten worden gemaakt als het referentiealternatief wordt uitgebreid naar het duurdere alternatief.

Discrete contingent claims methoden

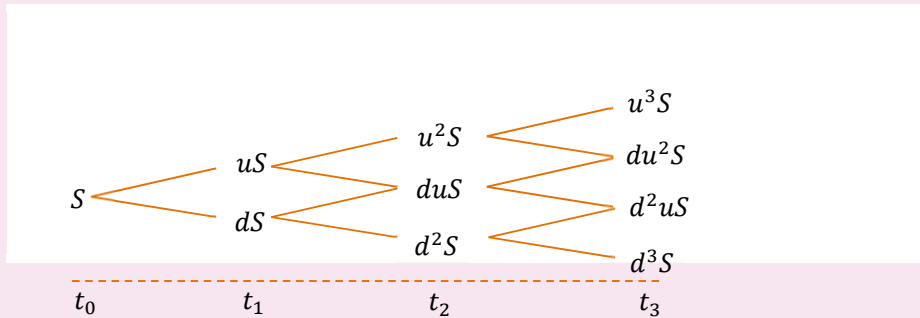
Discrete contingent claims modellen worden wel 'lattice' ('raster') modellen genoemd. Het bekendste lattice model is het multiplicatieve binomiale model van Cox et al. (1979) voor het waarderen van *Amerikaanse* callopties in discrete tijd. De optie kan daarmee, in tegenstelling tot het eerder gepresenteerde Black-Scholesmodel, 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-Scholesmodel; dit komt door het verschil in (call)optietype.

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.

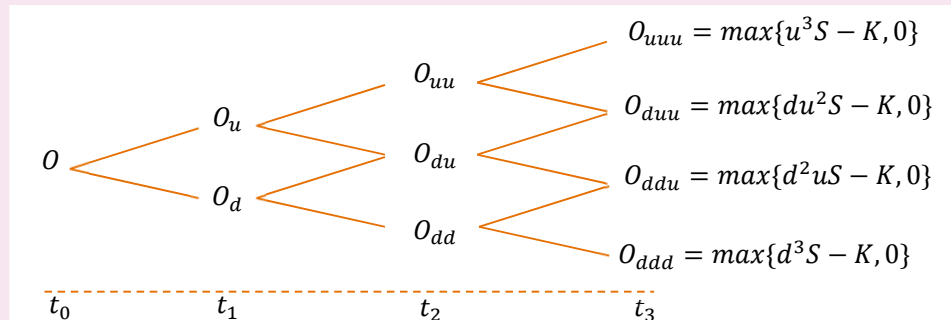
Net zoals bij het Black-Scholes model kan het binomiale model in sommige gevallen direct zonder aanpassing van het standaardmodel worden toegepast om reële investeringsopties te waarderen. Dan moeten wel de restrictieve modelaannames van toepassing zijn, welke nagenoeg gelijk zijn aan die van het Black-Scholes 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, kan dan een beslisboom worden geconstrueerd en opgelost.

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 - *risico-neutrale* 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:

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

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 .

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.

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).

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 (Brekelmans 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.

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 vermeden 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 *recursive* 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.

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-batenprobleem bestaat.
- Het probleem niet geschikt is voor contingent claims methoden.
- Een gedetailleerde economische analyse van flexibele investeringsstrategieën gewenst is.



Dit is een uitgave van:

Centraal Planbureau
Bezuidenhoutseweg 30
Postbus 80510 | 2508 GM Den Haag
T (088) 984 60 00

info@cpb.nl | www.cpb.nl

December 2017