
Onzekerheid is welkom bij beslissingen in het grondwaterbeheer

Martin Knotters

Bij het nemen van deze beslissingen baseren grondwaterbeheerders zich op informatie die vaak bestaat uit schattingen en voorspellingen. Over de juiste waarden, en daarmee de juistheid van hun beslissingen, zijn grondwaterbeheerders onzeker. In dit artikel wordt geïllustreerd hoe kennis over onzekerheid het nemen van rationele beslissingen kan bevorderen.

1 Inleiding

Beslissingsproblemen in het grondwaterbeheer zijn vaak complex, vanwege het grote aantal belangen waarmee rekening moet worden gehouden en vanwege uiteenlopende bronnen van onzekerheden. Zo kunnen grondwaterbeheerders onzeker zijn over de effecten van voorgenomen ingrepen. Met stochastische methoden is het mogelijk om met getallen uit te drukken hoe onzeker je bent over de werkelijke waarde van iets. Vaak wordt onzekerheid uitgedrukt met een 'bandbreedte' waarin met een waarschijnlijkheid van 95% de 'echte' waarde ligt. Als het kwantificeren van onzekerheid plaatsvindt in het perspectief van een beslissingsprobleem, dan is het waarschijnlijk praktischer om onzekerheid anders uit te drukken. Bovendien moet worden nagedacht over de vraag hoe betrouwbaar schattingen en voorspellingen tenminste moeten zijn om een beslissing te kunnen nemen.

Onzekerheid kan worden gereduceerd door onderzoek, wat rest aan onzekerheid kan worden gekwantificeerd, en deze gekwantificeerde onzekerheid kan worden benut bij het nemen van beslissingen. Als het beslissingsprobleem echter niet goed wordt vertaald in een onderzoeksvraag, of als de onderzoeksresultaten verkeerd worden gepresenteerd of geïnterpreteerd, dan wordt het beslissingsprobleem van de grondwaterbeheerder eerder groter dan kleiner. Van der Horst e.a. (2002) verken den hoe grondwaterbeheerders met onzekerheid omgaan en om zouden kunnen gaan bij beleidsbeslissingen. De beslissingstheorie biedt hulpmiddelen om met behulp van gekwantificeerde onzekerheid de rationaliteit van beslissingen te vergroten, ook in het grondwaterbeheer (Lammerts van Bueren, 1987; Kleindorfer e.a., 1993).

Het **doel** van dit artikel is om een idee te geven hoe statistische kennis over onzekerheid zou kunnen bijdragen aan het oplossen van beslissingsproblemen in het grondwaterbeheer. Ter illustratie wordt een relatief eenvoudig beslissingsprobleem geanalyseerd: moet er eenemaal worden gebouwd om in een gebiedje een vergroting van de gewasopbrengst te reali-

Martin Knotters is werkzaam bij Alterra, Postbus 47, 6700 AA Wageningen, telefoon (0317) 47 45 10, e-mailadres: m.knotters@alterra.wag-ur.nl.

seren door verlaging van de grondwaterstand. Het beslissingsprobleem is denkbeeldig, maar het gebiedje bestaat echt: de Paardelanden ten zuiden van Zuidwolde. Hiervoor worden plannen voor de waterhuishouding ontwikkeld (Ter Horst en Geraedts, 2001). De beslissingsproblemen blijken zeer complex. Behalve over 'aardse' zaken, zoals de grondwaterstand, zijn grondwaterbeheerders over veel meer factoren onzeker: is er voldoende draagvlak bij de betrokkenen in een gebied voor ingrepen in de waterhuishouding? Vallen de voorstellen goed bij beslissers over financiering? De onzekerheid over de grondwaterdynamiek is met hydrologische kennis te reduceren en met statistische kennis te kwantificeren. Onzekerheid over hoe een plan zal vallen bij de belanghebbenden laat zich echter moeilijk 'vangen' in rekensommen. Juist de complexiteit van de beslissingsproblemen vraagt om hulpmiddelen waarmee de beschikbare kennis over onzekerheid beter kan worden benut.

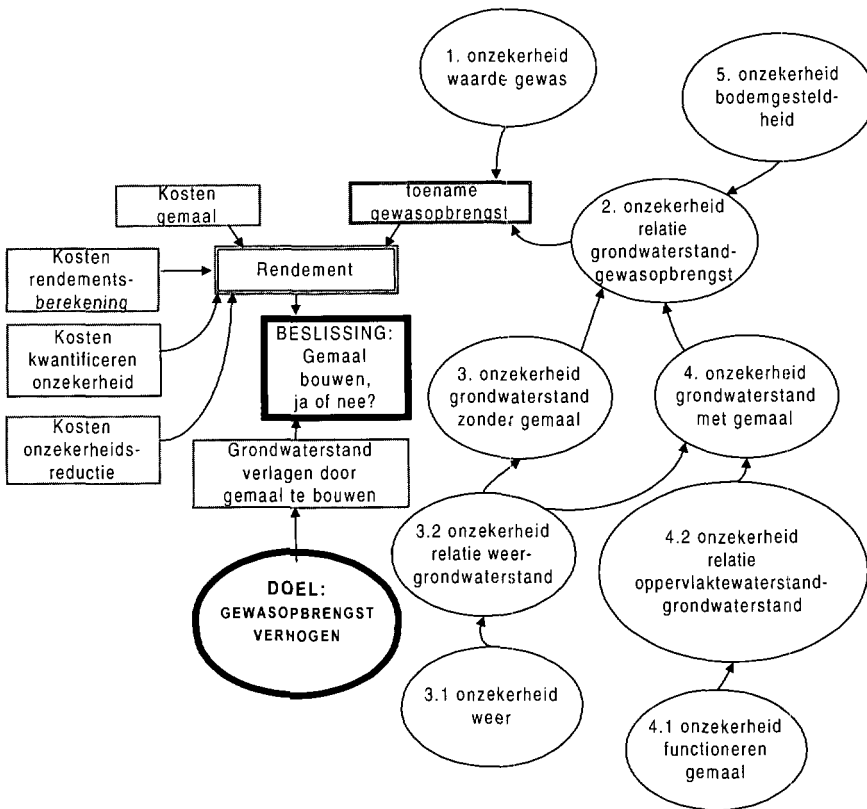
Voor de eenvoud wordt uitgegaan van slechts één gebruiker uit met slechts één belang, namelijk de landbouw met een economisch belang. Er wordt een 'harde lijn' gevolgd, waarbij de objectiviteit van de gekwantificeerde onzekerheden voorop staat, teneinde een beslissing te kunnen nemen over de bouw van een gemaal die vanuit het economisch belang van de landbouw gezien rationeel is. In paragraaf 2 zal het beslissingsprobleem worden geschetst. Paragraaf 3 beschrijft de verschillende bronnen van onzekerheid. De onzekerheden rond de opbrengstdepressies die vermeld staan in de zogenaamde HELP-tabellen (Werkgroep HELP-tabel, 1987) worden besproken in een Appendix. In paragraaf 4 wordt het beslissingsprobleem uitgewerkt tot zogenaamde beslissingsbomen. In paragraaf 5 worden de keuzes die volgen uit deze beslissingsbomen bediscussieerd. Het artikel eindigt in paragraaf 6 met enkele conclusies en aanbevelingen.

2 Het beslissingsprobleem

Het doel van de beslisser is om in een gebied de gewasopbrengst te verhogen. Om dit doel te bereiken wil hij de grondwaterdynamiek veranderen, door met een gemaal meer oppervlaktewater af te voeren dan nu het geval is. Dit vergt een investering. Het beslissingsprobleem is dus: wel of niet een gemaal bouwen. De beslissing voor de bouw van het gemaal hangt af van het rendement, nl. de afweging van alle kosten tegen de toename van de gewasopbrengst. Het is gebruikelijk om deze afweging uit te drukken in een zogenaamde interne rentevoet (Werkgroep Herziening Cultuurtechnisch vademecum, 1988, pag 738), waarbij de verandering in de landbouwkundige opbrengst wordt geschat met de zogenaamde HELP-tabellen (Werkgroep HELP-tabel, 1987). In figuur 1 zijn het doel en het beslissingsprobleem schematisch weergegeven. Daarnaast zijn in figuur 1 alle kostenposten en alle bronnen van onzekerheid weergegeven, en hun relatie tot het rendement op basis waarvan de beslissing om wel of niet het gemaal te bouwen wordt genomen.

Uit figuur 1 blijkt dat de bronnen van onzekerheid uitsluitend op de verwachte gewasopbrengst van invloed zijn en niet op de kosten van het gemaal. Een aantal onzekerheden komen voort uit gebrek aan kennis over hydrologische systemen, het water-plantsysteem en de toekomstige weersomstandigheden. Deze onzekerheden betreffen dus de natuur. Daarnaast is er onzekerheid over het technisch functioneren van het gemaal en de ontwikkeling van de prijzen van het gewas. Deze onzekerheden betreffen het technisch en economisch handelen van de mens.

Naast de kosten van de bouw van het gemaal vermeldt figuur 1 nog drie andere kostenposten. De kosten van de rendementsberekening zijn onderdeel van de oplossing van het beslissingsprobleem. Ongeacht hoe de beslissing uitvalt zullen deze kosten worden gemaakt. De kosten van het kwantificeren van onzekerheid staan apart vermeld in figuur 1. Deze kosten behoeven immers niet *per se* te worden gemaakt om een beslissing te kunnen nemen. Het is echter interessant om de eventuele meerwaarde van gekwantificeerde onzekerheid te analyseren en daarom staan deze kosten apart vermeld. Tenslotte zijn er kosten vermeld van het reduceren van onzekerheid. Door deze kosten te maken kan een betere beslissing worden genomen. Het heeft echter pas zin om deze kosten te maken als de 'winst' door deze betere beslissing groter is dan de kosten die moeten worden gemaakt om onzekerheid te reduceren.



Figuur 1: Kaart van het beslissingsprobleem om wel of niet een gemaal te bouwen en alle bronnen van onzekerheid die deze beslissing kunnen beïnvloeden.

Samengevat bestaat het beslissingsprobleem van de waterbeheerder uit de volgende drie vragen:

- 1 Moet ik een gemaal bouwen?
- 2 Moet ik om vraag 1 beter te kunnen beantwoorden onzekerheid kwantificeren?
- 3 Moet ik met extra onderzoek mijn onzekerheid over het nut van het gemaal reduceren?

3 Componenten van onzekerheid

De rondjes in figuur 1 laten diverse componenten van onzekerheid zien. Deze componenten van onzekerheid worden hier bediscussieerd, in het bijzonder de mate waarin de onzekerheid is gekwantificeerd of is te kwantificeren.

3.1 *Onzekerheid waarde gewas*

In de Paardelanden komt uitsluitend gras voor. Ter Horst en Geraedts (2001) hanteren een bedrag van € 11,80 per procent opbrengstreductie per hectare. Bij cultuurtechnische rendementsberekeningen wordt ervan uitgegaan dat het grondgebruik niet verandert in de komende 30 jaar. Gebeurt dit wel (bijvoorbeeld natuur i.p.v. grasland), dan heeft een rendementssommetje voor grasland weinig zin. Een planologische keuze tussen natuur en landbouw zou echter kunnen afhangen van de uitkomsten van het landbouwkundige rendementssommetje.

3.2 *Onzekerheid relatie grondwaterstand-gewasopbrengst*

De relatie tussen de grondwaterstand en de gewasopbrengst wordt beschreven door de Werkgroep HELP-tabel (1987). De HELP-tabellen worden gebruikt bij de rendementsberekeningen voor ingrepen in de waterhuishouding (Werkgroep Herziening Cultuurtechnisch vademecum, 1988). Het rapport van de Werkgroep HELP-tabel (1987) geeft wel duidelijk de verschillende componenten van onzekerheid aan, maar kwantificeert die niet. Voor zover bekend zijn de gepresenteerde percentages opbrengstdepressie nooit gevalideerd en ook de verschillen tussen de percentages, waar het uiteindelijk om gaat, niet. Wel vinden er regelmatig aanvullingen, verfijningen en verbeteringen plaats, recent bijvoorbeeld door Brouwer en Huinink (2002).

Bij rendementsberekeningen wordt ervan uitgegaan dat de relatie grondwaterstand-gewasopbrengst zich de komende 30 jaar niet wijzigt. Dit hoeft echter niet zo te zijn. Neem gras: door de introductie van nieuwe grassen, nieuwe soortensamenstelling, nieuw graslandbeheer en andere bedrijfsvoering, zouden andere percentages voor opbrengstdepressies kunnen gaan gelden. De Werkgroep HELP-tabel (1987, pag 8) wijst ook al op de reductie van natschade die vooral op zandgronden bereikt kan worden door de bedrijfsvoering aan te passen (bijvoorbeeld precisielandbouw). De onzekerheden over de percentages in de HELP-tabellen zijn opgesomd in de Appendix.

3.3 *Onzekerheid grondwaterdynamiek zonder gemaal*

De grondwaterdynamiek in de komende dertig jaar, gegeven de huidige hydrologische situatie, vormt de uitgangssituatie ten opzichte waarvan het effect van het gemaal geschat. De volgende componenten van onzekerheid zijn bij deze uitgangssituatie te onderscheiden:

- 1 het weer in de komende dertig jaar (vaak benaderd met het weer van de afgelopen dertig jaar);

2 de samenhang tussen het neerslagoverschot en de grondwaterstand op elk punt in een gebied, zoals deze wordt beschreven door het model dat wordt gebruikt om meetreeksen te extrapoleren. Dit kan bijvoorbeeld met een geregionaliseerd tijdreeksmodel (Knotters, 2001) of een regionaal stromingsmodel (bijvoorbeeld Querner en Van Lanen, 2001), waarbij ook weer allerlei componenten van onzekerheid zijn te onderscheiden.

3.4 Onzekerheid grondwaterstand met gemaal

Dit is de onzekerheid over de grondwaterdynamiek in de komende dertig jaar, als er een gemaal is geplaatst. Naast de twee componenten van uit paragraaf 3.3, is hierbij ook onzekerheid over:

- 1 de invloed van het gemaal op de oppervlaktewaterstand;
- 2 de relatie tussen de oppervlaktewaterstand en de grondwaterstand.

Door bij de vergelijking van het gemaal-scenario en de autonome ontwikkeling van dezelfde veronderstellingen over de weersgesteldheid in de komende dertig jaar uit te gaan, kan de onzekerheid over het toekomstige weer worden geëlimineerd. Als de grondwaterstand echter niet-lineair samenhangt met het neerslagoverschot kan de onzekerheid slechts ten dele worden opgeheven.

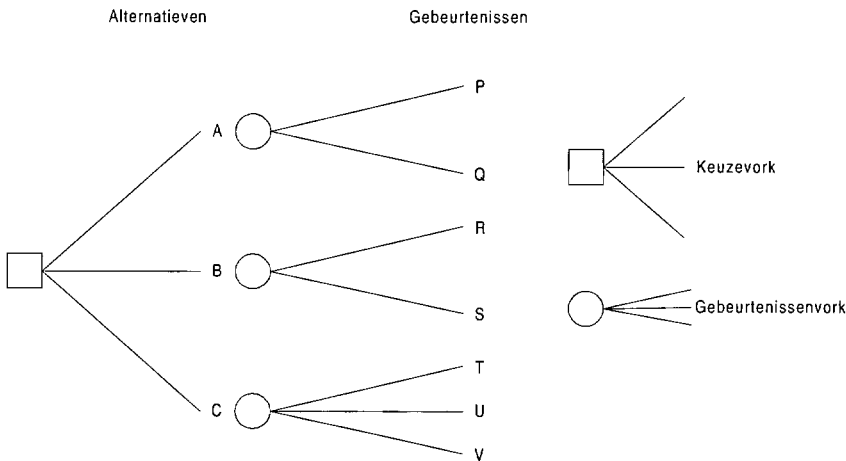
3.5 Onzekerheid over de bodemgesteldheid

Waar het in de vorige paragrafen ging om onzekerheden in proceskennis, gaat het hier om de onzekerheid over de waarde van een variabele (zeg z) op locatie \mathbf{x} , $z(\mathbf{x})$. $z(\mathbf{x})$ kan bijvoorbeeld de dikte van de effectieve wortelzone op locatie \mathbf{x} zijn. Soms wordt gesproken over 'limited knowledge' als beperkte proceskennis de bron van onzekerheid is, en over 'variability' als de bron van onzekerheid wordt gevormd door de onbekende waarde van een variabele op een willekeurige locatie \mathbf{x} (bijvoorbeeld Van Asselt e.a., 2001). Dit onderscheid suggereert dat aan onzekerheid ten gevolge van *limited knowledge* nog wel te reduceren is, maar dat onzekerheid ten gevolge van *variability* onvermijdelijk zou zijn. Door meer waar te nemen neemt de onzekerheid over de werkelijke waarde $z(\mathbf{x})$ echter af. De onzekerheid ten gevolge van beperkte proceskennis is echter onvermijdelijk, omdat er gewerkt wordt met de modellen en theorieën die op dat moment beschikbaar zijn. Het reduceren van onzekerheid over de bodemgesteldheid door meer waar te nemen kost geld, maar de winst is dat risico's worden beperkt.

4 Van beslissingsproblemen naar beslissingsbomen

Het beslissingsprobleem bestaat onder meer uit de vraag of nader onderzoek moet worden verricht om onzekerheden te reduceren of te kwantificeren. Dit lijkt een 'kip-ei-probleem': wil je weten of het zin heeft om nader onderzoek te doen, dan zul je iets moeten weten over de omvang van je onzekerheid, maar die ken je pas *nadat* je nader onderzoek hebt verricht. Het probleem is voor een groot deel op te lossen door gebruik te maken van voorinformatie, bestaande kennis over de omvang van de verschillende componenten van onzekerheid en *expert judgement*. Het is daarbij vooral zaak om de bestaande kennis goed te ordenen en

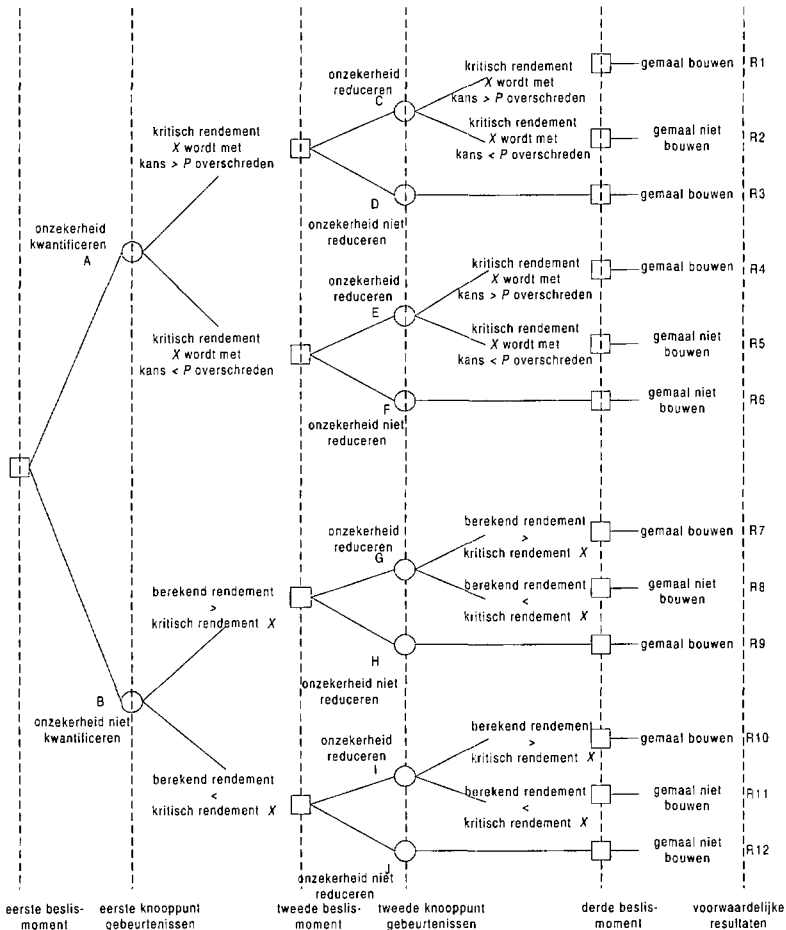
goed in kaart te brengen welke beslissingen afhangen van welke informatie. Een belangrijk hulpmiddel bij deze ordening is de beslissingsboom. Een beslissingsboom brengt de chronologie van het beslissingsproces in beeld. Gebeurtenissen en beslissingen wisselen elkaar af. In het voorbeeld van dit artikel is een gebeurtenis bijvoorbeeld het beschikbaar komen van informatie over gekwantificeerde onzekerheid.



Figuur 2: Een beslissingsboom (naar Lammerts van Bueren, 1987)

Figuur 2 geeft een verklaring van de symbolen in een beslissingsboom. In figuur 3 is het beslissingsprobleem uit paragraaf 2 uitgewerkt tot een beslissingsboom, die laat zien hoe beslismomenten en gebeurtenissen elkaar afwisselen. De drie mogelijke beslissingen en hun consequenties komen duidelijk in figuur 3 naar voren. Om meer inzicht te krijgen in de werking van de beslissingsboom zal nu de *case* van het gemaaltje in de Paardelanden worden uitgewerkt.

Een gebiedje in de buurt van Zuidwolde (Dr.), de Paardelanden in het Reestdal (figuur 4), is 217 ha groot. Met de bouw van een gemaal en aanpassing van de waterlopen kan de jaarlijkse opbrengst volgens de HELP-tabellen en de bodemkaart, schaal 1 : 10.000 (Van Dodewaard, 1997) met maximaal € 116,- per ha toenemen (totaal € 25.350,- per jaar, 9,9% opbrengstvermeerdering, 1% = € 11,80). We veronderstellen dat dit maximum haalbaar is, omdat niet alleen de grondwaterdynamiek, maar ook de maaiveldhoogte wordt aangepast in de Paardelanden (Ter Horst en Geraedts, 2001). Met de bouw van het gemaal bedoelen we het totale verbeteringsplan. De opbrengstvermeerdering is voor 64% (€ 16.224,-) te bereiken door terugdringing van wateroverlast en voor 36% (€ 9.126,-) door terugdringing van droogteschade. Als het plan is uitgevoerd dan is de grondwaterdynamiek 'genivelleerd' tot een niveau dat voor agrarisch grondgebruik in de vorm van grasland vanuit economisch oogpunt gezien optimaal is.



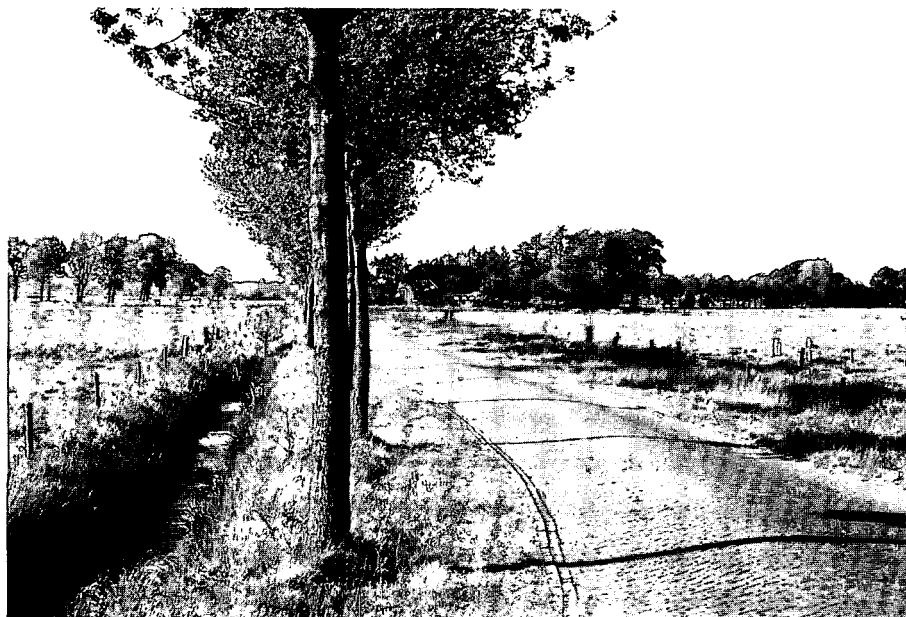
Figuur 3: Beslissingsboom voor de case van de bouw van een gemaal in de Paardelanden.

Voor de kosten van de bouw van het gemaal is een bedrag aangenomen van € 136.134,-. De feitelijke kosten van het plan zijn aanmerkelijk hoger (Ter Horst en Geraedts, 2001), maar hierbij zijn ook kosten en baten inbegrepen die betrekking hebben op niet-agrarische doeleinden zoals natuurherstel.

De kosten van een rendementsberekening zoals die meestal wordt uitgevoerd (m.b.v. bestaande bodemkaart, een aanname over de verandering in het grondwaterregime en de HELP-tabellen) zijn geschat op € 2.269,-. Voor de kosten van een onderzoek waarbij onzekerheid wordt **gekwantificeerd** is uitgegaan van een bedrag van € 22.689,-. Er moet namelijk extra veldonderzoek plaatsvinden, omdat de kennis over onzekerheid gebaseerd is op waarnemingen. De kosten van het **reduceren** van onzekerheid door extra onderzoek zijn eveneens geraamd op € 22.689,-. Samengevat zijn er vier opties wat betreft het onderzoek waarmee de beslissing onderbouwd moet worden:

- 1 de gebruikelijke methode met een bestaande bodemkaart en HELP-tabellen, geen onzekerheid kwantificeren (€ 2.269,-);
- 2 een methode waarbij onzekerheid wordt gekwantificeerd (€ 22.689,-);

- 3 een methode waarbij onzekerheid wordt gekwantificeerd en gereduceerd (€ 45.378,-);
- 4 een methode waarbij onzekerheid wordt gereduceerd nadat de gebruikelijke methode is toegepast (€ 24.958,-).
- Uitgaande van 6% rente is de contante waarde van de opbrengstvermeerdering bij een looptijd van 30 jaar gelijk aan circa € 348.938,-.*



Figuur 4: De Paardelanden bij Zuidwolde

Op basis van de bovenstaande gegevens zijn de acht voorwaardelijke resultaten berekend, zie figuur 5, laatste kolom. Deze zijn uitgedrukt als rendementen in termen van de **netto contante waarde**, die gelijk is aan het verschil van de contante waarde van de baten en de (contante) waarde van de investering. Het eerste voorwaardelijke resultaat, R1, is bijvoorbeeld gelijk aan de contante waarde van de opbrengstvermeerdering (€ 348.938,-) minus de kosten van de bouw van het gemaal (€ 136.134,-), de kosten van onderzoek waarbij onzekerheid wordt gekwantificeerd (€ 22.689,-) en de kosten van het reduceren van onzekerheid (€ 22.689,-): $167426 = 348938 - (136134 + 22689 + 22689)$.

In figuur 5 zijn ook de kansen op bepaalde gebeurtenissen gegeven, bij de takken die uit de knooppunten van de gebeurtenissen ontspringen. De kansen, 0,8, 0,2, 0,7, 0,3 en 0,5, kunnen voortkomen uit voorinformatie (bijvoorbeeld analyse van vergelijkbare studies uit het verleden) en de inzichten van experts. Het gaat om inschattingen; het voornaamste doel van de gebeurtenis-beslissingsboom is om deze inschattingen en voorinformatie over onzekerheid te structureren.

Op het eerste beslismoment in figuur 5 wordt de beslissing genomen of onzekerheid wordt gekwantificeerd (gebeurtenis A) of niet (gebeurtenis B). Onzekerheid kwantificeren betekent extra onderzoeksinspanningen en kost dus meer dan de gebruikelijke aanpak waarbij onzekerheid niet wordt gekwantificeerd. De 'winst' van gekwantificeerde onzeker-

heid kan echter zijn dat de keuze voor een economisch riskant alternatief vermeden wordt. In deze *case* zijn de kosten van het kwantificeren van onzekerheid geraamd op € 22.689,-.

Om onzekerheid te kwantificeren zijn allerlei stochastische methoden beschikbaar, die gebruik maken van waarnemingen. Het aantal waarnemingen is doorgaans echter beperkt. Bovendien zijn ook stochastische methoden vaak gebaseerd op modellen en veronderstellingen. Daarom is gekwantificeerde onzekerheid meestal niet meer dan een schatting. Er kan dus onzekerheid over de onzekerheid bestaan! Het is de kunst om de onzekerheid over de onzekerheid zo beperkt mogelijk te houden, en, als het even kan, te verdisconteren in de gekwantificeerde onzekerheid. Een zorgvuldig ontworpen steekproef- of monitoringopzet is hierbij cruciaal (De Gruijter, 2000; Knotters, 2001).

De beslissingsboom in figuur 5 bevat naast kansen en voorwaardelijke resultaten *verwachte* rendementen, die als volgt worden berekend:

- 1 als besloten wordt onzekerheid te kwantificeren (A) en vervolgens te reduceren (C en E) dan is het verwachte rendement in C en E gelijk aan $0,8 \times 167.426 + 0,2 \times -45.378 = 124.865$;
- 2 als besloten wordt onzekerheid te kwantificeren (A) maar niet te reduceren, dan is het verwachte rendement in A gelijk aan $0,7 \times 190.115 + 0,3 \times -22.689 = 126.274$;
- 3 als besloten wordt onzekerheid niet te kwantificeren en te reduceren (B) dan is het verwachte rendement in B gelijk aan $0,5 \times 210.535 + 0,5 \times -2.269 = 104.133$;
- 4 als besloten wordt onzekerheid niet te kwantificeren maar wel te reduceren, dan is het verwachte rendement in G en I gelijk aan $0,7 \times 187.846 + 0,3 \times -24.958 = 124.005$.

5 Van beslissingsbomen naar beslissingen

Als maximalisatie van het rendement het streven is, dan kan op basis van de bovenstaande analyse ertoe worden besloten om onzekerheid te kwantificeren (verwacht rendement € 126.274,-), maar niet te reduceren (verwacht rendement € 124.865,-). Een ander streven bij het nemen van beslissingen zou kunnen zijn het minimaliseren van risico's. Een risico is hier gelijk aan kans maal kosten. Het mislopen van rendementen (omdat ten onrechte werd geconcludeerd dat het gemaal niet moet worden gebouwd) wordt hier als risico aangemerkt. Dit risico is equivalent met de fout van de tweede soort in de toetsingstheorie. Met andere woorden, het keuzeprobleem kan worden vertaald in een toetsingsprobleem, met

H_0 : geen toename rendement;

H_1 : toename rendement.

Als H_0 wordt geaccepteerd, dan wordt het gemaal niet gebouwd, als H_0 wordt verworpen gaat de bouw wèl door.

Samenvattend geldt:

$\alpha = 1$ -betrouwbaarheidsdrempel, kans op fout van de eerste soort, H_0 ten

onrechte verwerpen: Ten onrechte wordt geconcludeerd dat het gemaal moet worden gebouwd. De investering wordt niet terugbetaald door een toename van de baten. Een afname van de baten (extra droogteschade) behoort zelfs tot de mogelijkheden! Terecht kunnen agrarische ondernemers dan een claim indienen bij de bedenker van zo'n 'verbeteringswerk'. Er wordt ten onrechte een ruilverkavelingsrente in rekening gebracht bij de agrarische ondernemers, want er staan voor hen geen extra inkomsten tegenover. De (onterechte) kosten zijn daarom: bouw gemaal (had niet gehoeven, want het levert toch

geen rendement op), kosten onderzoek (want het resultaat deugde niet), kosten nadelige effecten gemaal op de landbouwkundige productie (het kan zelfs averechts uitwerken). Het is duidelijk dat alleen een heel kleine α acceptabel is. Vaak wordt α op 0,05 gesteld.

β = kans op fout van de tweede soort, H_0 ten onrechte accepteren: Ten onrechte wordt geconcludeerd dat het gemaal niet moet worden gebouwd. Het rendement wordt misgelopen. De (onterechte) kosten bestaan uit het misgelopen rendement. Alleen een kleine β is acceptabel, maar er zijn argumenten te bedenken waarom β groter mag zijn dan α . Ten opzichte van de uitgangssituatie verandert er nl. niets, er wordt geen onterechte investering gedaan en er wordt geen ruilverkavelingsrente berekend waar geen extra inkomsten tegenover staan.

Over α en β dient te worden nagedacht en wellicht te worden onderhandeld door de grondwaterbeheerders en de belanghebbenden. Essentieel hierbij is dat statistische termen goed worden vertaald in termen die voor niet-statistisch onderlegde partijen hanteerbaar zijn, en andersom. Belangrijk is in elk geval dat er over wordt nagedacht en vooral dat er een keuze wordt gemaakt voor α en β , waarbij wordt overwogen welke waarden nog aanvaardbaar zijn.

Het is duidelijk dat in deze *case* meer onderzoek de risico's verkleint. Het is echter de vraag hoe reëel de getallen zijn die in dit voorbeeld zijn gebruikt, met name de kansen op de verschillende gebeurtenissen die in de beslissingsboom zijn vermeld. Verder is in dit voorbeeld gerekend met opbrengsten en kosten die in geld kunnen worden uitgedrukt. Een dergelijk probleem is echter momenteel niet zo relevant in de groene ruimte van Nederland waarin met meer belangen rekening moet worden gehouden dan alleen het economische belang van de landbouw. De *case* kan echter worden uitgebreid tot een beslissingsprobleem, waarbij kosten en baten niet of niet volledig in geld zijn uit te drukken. In plaats van euro's kunnen dan waarderingcijfers worden gehanteerd, die de uitkomst zijn van bijvoorbeeld een politieke discussie of een belevingsonderzoek. Als overeenstemming is bereikt over deze waarderingcijfers, zou vervolgens met behulp van een gebeurtenis-beslissingsboom de rationaliteit van het beslissingsprobleem kunnen worden verhoogd.

6 Conclusies en aanbevelingen

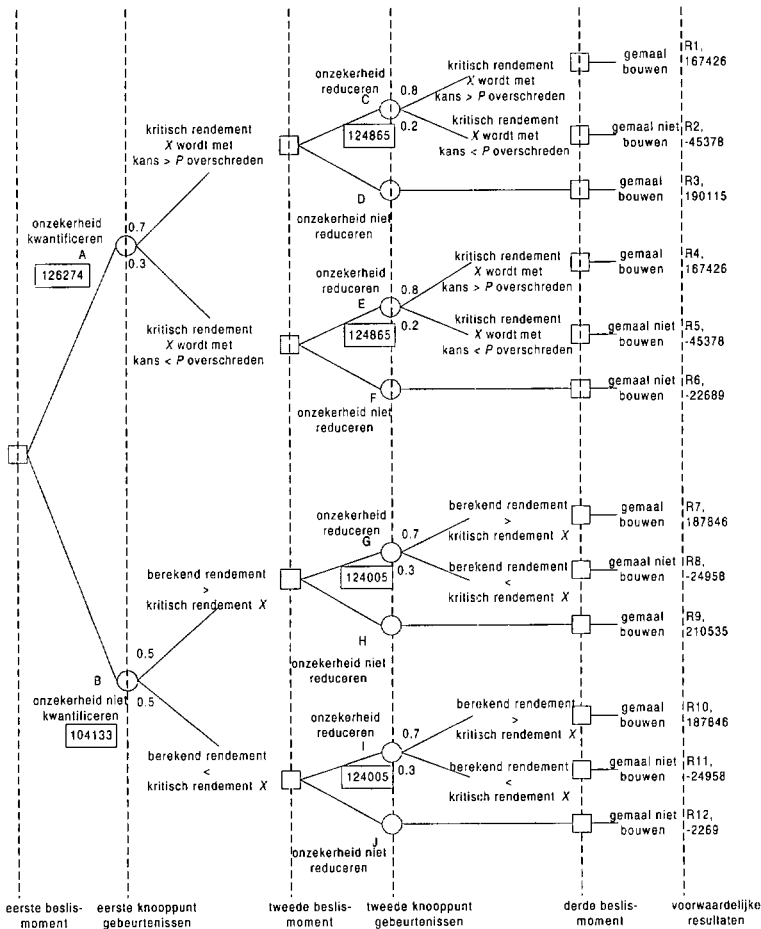
Statistische kennis over onzekerheid kan worden aangewend om op rationele en objectieve wijze beslissingsprocessen in het grondwaterbeheer te ondersteunen. Hierbij kan gebruik worden gemaakt van methodiek uit de beslissingstheorie, zoals een gebeurtenis-beslissingsboom. Communicatie over gekwantificeerde onzekerheid is van groot belang: statistiek moet goed worden vertaald in termen die voor beslissers en belanghebbenden in het grondwaterbeheer herkenbaar en hanteerbaar zijn. Het is belangrijk dat deze communicatie in alle stadia van het beslisproces plaatsvindt.

In dit artikel is een poging gedaan om de bronnen van onzekerheid te kwantificeren bij een relatief eenvoudig beslissingsprobleem. Dit blijkt op basis van de beschikbare informatie slechts ten dele mogelijk te zijn. Daarom moet het opsporen van bronnen van onzekerheid en het kwantificeren en rapporteren van onzekerheid meer aandacht krijgen. De analyse van de onzekerheid over de inhoud van de HELP-tabellen onderstreept dit. Alleen nauwkeurig gekwantificeerde onzekerheid is nuttig bij het ondersteunen van beslissingen. De nauwkeurigheid van gekwantificeerde onzekerheid kan worden verbeterd met zorgvul-

dige steekproef- en monitoringontwerpen, omdat daarmee de 'onzekerheid over de onzekerheid' kan worden verdisconteerd.

Gekwantificeerde onzekerheid moet worden gezien binnen het totaal van onzekerheden waarmee beslissers in het grondwaterbeheer te maken hebben. Juist deze complexiteit vraagt om aandacht voor een betere benutting van kennis over onzekerheid.

Een goede benutting van statistische kennis over onzekerheid in het grondwaterbeheer vraagt om interactie tussen β -wetenschappen zoals statistiek en hydrologie en γ -wetenschappen zoals de psychologie van het denken en beslissen, beslis- en bestuurskunde en communicatie- en innovatiewetenschappen.



Figuur 5: Uitgewerkte beslissingsboom met kansen, verwachte rendementen (in de vierkantjes) en voorwaardelijke resultaten.

Dankwoord

Hans ter Horst van het waterschap Reest en Wieden bedank ik voor de informatie over de Paardelanden en zijn nuttige opmerkingen bij het manuscript. Ook Marc Bierkens bedank ik voor zijn opbouwende commentaar. Harry Boukes ben ik erkentelijk voor zijn suggesties om de eerste, nogal breedvoerige, versie in te korten.

Literatuur

- Asselt, M.B.A. van, R. Langendonck, F. van Asten, A. van der Giessen, P.H.M. Janssen, P.S.C. Heuberger en I. Geuskens (2001)** Uncertainty & RIVM's Environmental Outlooks. Documenting a learning process; RIVM report 550002001, Bilthoven.
- Boekel, P. (1973)** De betekenis van de ontwatering voor de bodemstructuur op de zavel- en lichte kleigronden; Instituut voor Bodemvruchtbaarheid, Rapport 5-1973, Haren.
- Boheemen, P.J.M. van (1981)** Toename van de produktie van grasland bij verbetering van de watervoorziening; ICW-nota 1298, Wageningen.
- Brouwer, F. en J.T.M. Huinink (2002)** Opbrengstdepressiepercentages voor combinaties van bodemtypen en grondwatertrappen. Geactualiseerde help-tabellen en opbrengst-depressiekaarten; Alterra-rapport 429, Wageningen.
- Dodewaard, E. van (1997)** De bodemgesteldheid in de landinrichtingsgebieden Zuidwolde-Zuid, Beneden-Egge en Zuidwolde-Noord: resultaten van een bodemgeografisch onderzoek; Staring Centrum, rapport 535, Wageningen.
- Feddes, R.A. (1971)** Water, heat and crop growth; proefschrift, Mededelingen Landbouwhogeschool Wageningen 71-12, Wageningen.
- Feddes, R.A., G.J. Grotentraast, H. Ton, A.W. Sleeking, A.F. van Holst, G.M. Pronk, M.G.M. den Blanken en G. v.d. Velde (1984)** Landbouwkundige aspecten van grondwateronttrekking. Berekening van schade als gevolg van kunstmatige verlaging van de grondwaterstand; Commissie Grondwaterwet Waterleidingbedrijven, Werkgroep Landbouwkundige Aspecten.
- Gruijter, J.J. de (2000)** Sampling for spatial inventory and monitoring of natural resources; Alterra-rapport 070, Wageningen.
- Horst, H. ter en J. Geraedts (2001)** Achtergronddocument voor het werkveld w&er bij het voorontwerpplan/milieu-effectrapport van de Herinrichting-met-Bijzondere-Doelstelling Zuidwolde-Zuid; Waterschap Reest en Wieden, Dienst Landelijk Gebied, Mep-pel/Assen.
- Horst, J.B.F. van der, T. Hoogland en M. Knotters (2002)** Onzekerheid als beslissende factor. Een verkenning van de toepassing van gekwantificeerde onzekerheid in het grondwaterbeheer; Alterra-rapport 442, Wageningen.
- Kleindorfer, P.R., H.C. Kunreuther, P.J.H. Schoemaker (1993)** Decision sciences: an integrative perspective. Cambridge University Press, Cambridge.
- Knotters, M. (2001)** Regionalised time series models for water table depths; Proefschrift Wageningen Universiteit/Alterra Scientific Contributions 3, Wageningen.
- Lammerts van Bueren, W.M. (1987)** Omgaan met onzekerheid, het kwantificeren van onzekerheden bij beleidsbeslissingen; Staatsuitgeverij, 's-Gravenhage.

- Querner, E.P. en H.A.J. van Lanen (2001)** Impact assessment of drought mitigation measures in two adjacent Dutch basins using simulation modelling; in: *Journal of Hydrology* 252(1-4), pag 51-64.
- Reuling, Th.H.M. (1983)** Gebruikershandleiding voor het model LAMOS; Landinrichtingsdienst, Utrecht.
- Schothorst, C.J. (1963)** Beweidingsverliezen op diverse graslandgronden; in: *Landbouwkundig Tijdschrift* 75(15), pag 869-878.
- Werkgroep HELP-tabel (1987)** De invloed van de waterhuishouding op de landbouwkundige productie; Mededelingen Landinrichtingsdienst 176, Utrecht.
- Werkgroep Herziening Cultuurtechnisch vademecum (1988)** Cultuurtechnisch vademecum; Cultuurtechnische vereniging, Utrecht.
- Wind, G.P. (1960)** Opbrengstderving door te laat zaaien; in: *Landbouwkundig Tijdschrift* 72(4), pag 111-118.

Appendix

Onzekerheid over de inhoud van de HELP-tabellen

De HELP-tabellen (Werkgroep HELP-tabel, 1987) geven opbrengstdepressiepercentages voor grasland en bouwland bij verschillende combinaties van bodemtypes en grondwaterstandsverlopen. De componenten van onzekerheid zijn samengevat in de onderstaande tabel, met voor zover bekend informatie over onzekerheid en bron.

Component	Informatie over onzekerheid	Bron
Potentieel productieniveau	benadering met gemiddeld hoogste gewasopbrengst in een bepaald gebied	<i>expert knowledge</i>
Draagkracht van de bodem	15 - 20% verhoging van de netto productie door verbetering van de draagkracht	Schothorst (1963)
Bewerkbaarheid	0,5 - 1% opbrengstdepressie per dag later inzaaien	literatuuronderzoek door Wind (1960)
Luchthuishouding in de wortelzone	onbekend	
Stikstofmineralisatie	onbekend	
Bodemtemperatuur	temperatuur in het zaaibed gemiddeld 1 à 2 °C lager door hoge grondwaterstanden	Feddes (1971)
Structuur van de bodem	bij onvoldoende ontwatering op sterk slempgevoelige gronden 20 - 30% opbrengstdepressie	Boekel (1973)
Relatie grondwaterstandafoer (gebaseerd op GVG)	onbekend. GVG is geschat met een regressieformule uit geïnterpoleerde GHG's en GLG's	Model LAMOS (Reuling, 1983).

Reductie neerslag a.g.v. scheurvorming	onbekend	LAMOS
<i>Sink</i> -term (pF-waarde vanaf welke opname bodemvocht afneemt)	onbekend	LAMOS. De <i>sink</i> -termen komen voort uit empirisch onderzoek.
Lengte van het groeiseizoen	onbekend	LAMOS
Reductie van de effectieve wortelzone met 2/3 bij Gt II en IIb	onbekend	LAMOS
Correctie op de vocht-karakteristiek i.v.m. irreversibele indroging van veen- en moerige gronden bij droge Gt's.	onbekend	LAMOS
Aard en dikte <i>effectieve</i> wortelzone	Vrijwel geen beworteling bij pH(KCl) < 3,5 à 4. Indringingsweerstand van 2,5 à 3,0 MPa kritisch voor beworteling, voor veel zandgronden 3-5 MPa	Werkgroep HELP-tabel (1987)
Capillaire doorlatendheid en profielopbouw ondergrond	onbekend	Schematisatie, ruimtelijke interpolatie
Grondwaterstand	onbekend	interpolatie, schematisatie tot grondwatertrappen
Neerslag en verdamping	onbekend	empirische relaties voor potentiële verdamping; ruimtelijke interpolatie
Relatie vochttekort-opbrengstdepressie	onbekend	Van Boheemen (1981, o.b.v. metingen 1950-1970), Feddes <i>et al.</i> (1984)