

Fuzzy sets voor zachte klassegrenzen.
Toepassing op het landevaluatiesysteem BODEGA

Fuzzy sets voor zachte klassegrenzen.
Toepassing op het landevaluatiesysteem BODEGA

J.J. de Gruijter
H.L. Boogaard

Alterra-rapport 346

Alterra, Research Instituut voor de Groene Ruimte, Wageningen, 2001

REFERAAT

J.J. de Gruijter en H.L. Boogaard, 2001. Fuzzy sets voor zachte klassegrenzen. Toepassing op het landevaluatiesysteem BODEGA. Wageningen, Alterra, Research Instituut voor de Groene Ruimte. Alterra-rapport 346. 87 blz.; 14 fig.; 10 tab.; 18 ref.; 8 aanh.

In dit toepasbaarheidsonderzoek is nagegaan of en hoe de wiskundige theorie van vage verzamelingen (fuzzy sets), en de daarop geënte meerwaardige logica (fuzzy logic), toegepast kan worden in de landevaluatie. Daarbij is speciale aandacht besteed aan inpassing in het bestaande systeem BODEGA. Met methoden gebaseerd op vage verzamelingen kan rekening worden gehouden met onzekerheid over klassegrenzen, door geleidelijke in plaats van scherpe grenzen te vormen. Dat leidt tot een intensiever gebruik van beschikbare gegevens en achtergrondkennis, en tot meer gedifferentieerde beoordelingen. Als test is in een proefgebied in Noord-Brabant de geschiktheid voor weidebouw geëvalueerd met een fuzzy variant van BODEGA.

Trefwoorden: fuzzy sets, fuzzy logic, vage verzamelingen, meerwaardige logica, zachte modellen, landevaluatie

ISSN 1566-7197

Dit rapport kunt u bestellen door Euro 22,00 of NLG 50,00 over te maken op banknummer 36 70 54 612 ten name van Alterra, Wageningen, onder vermelding van Alterra-rapport 346. Dit bedrag is inclusief BTW en verzendkosten.

©2001 Alterra, Research Instituut voor de Groene Ruimte,
Postbus 47, NL-6700 AA Wageningen.
Tel.: (0317) 474200; fax: (0317) 419000; e-mail: postkamer@alterra.wag-ur.nl

Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke andere wijze ook zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van Alterra.

Alterra aanvaardt geen aansprakelijkheid voor eventuele schade voortvloeiend uit het gebruik van de resultaten van dit onderzoek of de toepassing van de adviezen.

Alterra is de fusie tussen het Instituut voor Bos- en Natuuronderzoek (IBN) en het Staring Centrum, Instituut voor Onderzoek van het Landelijk Gebied (SC). De fusie is ingegaan op 1 januari 2000

Project 328-81181

[Alterra-rapport 346/JdG/9-2001]

CONTENTS

Voorwoord	3
Samenvatting	4
1 Inleiding	9
2 Vage verzamelingen, meerwaardige logica en zachte modellen	12
2.1 Introductie	12
2.2 Vage verzamelingen	14
2.2.1 Definitie en lidmaatschapfuncties	14
2.2.2 Netwerk-klassieke LFs	16
2.2.3 Zadeh LFs	16
2.2.4 Stuksgewijs lineaire LFs	18
2.3 Meerwaardige logica	19
2.3.1 Max operator voor ‘vereniging’	19
2.3.2 Begrensde Som operator voor ‘vereniging’	20
2.3.3 Min operator voor ‘doorsnede’	20
2.3.4 Algebraïsch Produkt operator voor ‘doorsnede’	21
2.3.5 Complement operator voor ‘ontkenning’	22
2.3.6 Fuzzy rules	22
2.4 Zachte modellen	23
3 Toepassing van meerwaardige logica bij landevaluatie	27
3.1 Keuze van lidmaatschapfuncties	28
3.2 Keuze van operatoren	29
3.3 Kartering en kartografische weergave	38
4 Generalisatie van tweewaardige naar meerwaardige logica in het landevalutiesysteem BODEGA	40
4.1 Het harde geschiktheidsmodel in BODEGA	40
4.1.1 Stevigheid van de bovengrond	40

4.1.2	Ontwateringstoestand	41
4.1.3	Vochtleverend vermogen	42
4.1.4	Geschiktheid voor weidebouw	43
4.2	Een zacht geschiktheidsmodel voor BODEGA	43
5	Toepassing: geschiktheid voor weidebouw in Noord-Brabant	46
5.1	Inleiding	46
5.2	Beschrijving studiegebied	46
5.3	Acquisitie van basisgegevens	47
5.4	Berekeningen met het zachte model	48
5.5	Resultaten van het zachte model	49
5.5.1	Resultaten per lidmaatschapgraad (methode 1)	51
5.5.2	Discrete kartografische weergave van resultaten (methode 3)	53
6	Conclusies en aanbevelingen	59
A	S-Plus programma's voor berekening van lidmaatschapgraden in vage klassen van geschiktheid voor weidebouw (Noord Brabant)	63
A.1	Lidmaatschapgraden in predictorklassen	63
A.2	Lidmaatschapgraden in gradaties van beoordelingsfactoren	69
A.3	Lidmaatschapgraden in geschiktheidsklassen	70
B	Acquisitie van GHG en GLG gegevens voor het studiegebied	72
C	Ruimtelijke verspreiding van de hoofdgroepen van gronden in het studiegebied.	76
D	Stevigheid bovengrond volgens hard model (A), en lidmaatschap in zachte gradatie 'zeer groot' (B).	78
E	Stevigheid bovengrond volgens hard model (A) en gedefuzzi- fieerd zacht model (B).	80
F	Ontwateringstoestand volgens hard model (A) en gedefuzzifieerd zacht model (B).	82
G	Vochtleverend vermogen volgens hard model (A) en gedefuzzi- fieerd zacht model (B).	84
H	Geschiktheid voor grasland volgens hard model (A) en gedefuzzi- fieerd zacht model (B).	86

VOORWOORD

Dit rapport is een van de eindprodukten van project nr. 81181 'BODEGA hard en fuzzy' in DWK-programma 328 'Geodata groene ruimte'. Het betreft een deel-project waarin is nagegaan of en hoe de wiskundige theorie van vage verzamelingen, en de daarop geënte meerwaardige logica, toegepast kan worden in de landevaluatie, met speciale aandacht voor inpassing in het bestaande BODEGA systeem.

Met methoden gebaseerd op vage verzamelingen kan rekening worden gehouden met onzekerheid over klassegrenzen, door geleidelijke in plaats van scherpe grenzen te vormen. Dat leidt tot een intensiever gebruik van beschikbare gegevens en achtergrondkennis, en tot meer gedifferentieerde beoordelingen.

Peter Finke heeft het concept-rapport doorgelezen en van commentaar voorzien, waarvoor onze dank.

Jaap de Gruijter Hendrik Boogaard

SAMENVATTING

Dit rapport betreft een toepasbaarheidsonderzoek waarin is nagegaan of en hoe de wiskundige theorie van vage verzamelingen ('fuzzy sets') en de daarop geënte meerwaardige logica ('fuzzy logic') toegepast kan worden in de landevaluatie, met speciale aandacht voor inpassing in het bestaande BODEGA systeem.

Na een algemene inleiding (hoofdstuk 1) geeft hoofdstuk 2 een overzicht van de theorie van vage verzamelingen, meerwaardige logica en zachte modellen, voorzover die relevant lijkt voor mogelijke toepassing in de landevaluatie. De theorie van vage verzamelingen is een recente uitbreiding van de klassieke verzamelingenleer. Waar de klassieke verzamelingenleer ervan uitgaat dat er slechts twee mogelijkheden zijn - een element behoort wel of niet tot een verzameling - laat de vage verzamelingenleer toe dat een element in zekere mate tot een verzameling of klasse behoort. Deze laatste benadering doet in beginsel meer recht aan het feit dat er in de context van landevaluatie veelvuldig sprake is van grensgevallen, en dat de momenteel gehanteerde scherpe klassiegrenzen vaak een min of meer arbitrair karakter hebben. Met methoden gebaseerd op vage verzamelingen kan rekening worden gehouden met onzekerheid over klassiegrenzen, door geleidelijke in plaats van scherpe grenzen te vormen. Dat leidt tot een intensiever gebruik van beschikbare gegevens en achtergrondkennis, en tot meer gedifferentieerde beoordelingen.

Aan het concept van geleidelijke klassiegrenzen wordt wiskundig vorm gegeven door z.g. lidmaatschapgraden in te voeren, getallen tussen 0 en 1, en die een geleidelijk verlopende functie zijn van de eigenschappen van de te beoordelen bodems. Deze lidmaatschapfuncties worden zo gedefinieerd dat de maximale waarde 1 wordt bereikt als de beoordeelde bodem een typische vertegenwoordiger is van de betreffende geschiktheidsklasse, de minimale waarde 0 als hij in het geheel niet thuis hoort in die klasse, en tussenliggende waarden als het min of meer een grensgeval is. In principe komen diverse wiskundige functies in aanmerking om de rol van lidmaatschapfunctie te spelen. In de literatuur worden met name z.g. Zadeh-functies, S-functies en stuksgewijs lineaire functies voorgesteld.

Bij landevaluatie wordt geredeneerd in termen van bodemeigenschappen, in de trant van "als eigenschap X een waarde groter dan ... heeft, eigenschap Y

een waarde kleiner dan ..., en eigenschap Z een waarde tussen ... en ..., dan is de geschiktheidsklasse ...". Dergelijke redeneringen zijn op te vatten als beslisregels, en een landevaluatiesysteem kan gezien worden als een stelsel van dit soort beslisregels. Om er handmatig gemakkelijk mee te kunnen werken worden dergelijke stelsels van beslisregels vaak weergegeven in de vorm van beslistabellen of (grafisch) als beslisbomen, maar de vorm van beslisregels leent zich beter voor een geautomatiseerd Beslissing Ondersteunende Systeem. Via een beslisregel worden een aantal klassen van bodemeigenschappen met elkaar gecombineerd; in het bovenstaande voorbeeld zijn dat er drie. Normaliter, als de klassen van bodemeigenschappen scherpe grenzen hebben, dan gebeurt het combineren van klassen via de klassieke tweewaardige logica, met de z.g. Booleaanse operatoren IS, AND, OR en NOT. In het geval van vage klassen gebeurt het combineren van klassen via meerwaardige logica. Een uitspraak, bijvoorbeeld bodem A heeft geschiktheid X, kan daarbij niet alleen waar of onwaar zijn, maar kan ook tussenliggende gradaties van 'mogelijkheid' hebben. Ook de meerwaardige logica maakt gebruik van logische operatoren, wat in feite rekenregels zijn voor het combineren van lidmaatschapgraden in een of meer vage klassen tot een lidmaatschapgraad in een nieuwe klasse. In de literatuur zijn vele van dergelijke operatoren voorgesteld; in hoofdstuk 2 worden de belangrijkste daarvan besproken. Tevens wordt in hoofdstuk 2 de formele structuur van vage beslisregels uitgelegd, en wordt besproken hoe een 'fuzzy rule base' de kern vormt van een zacht of 'greybox' model.

In hoofdstuk 3 wordt nagegaan op welke wijze de nieuwe methodologie het beste toegepast kan worden in de landevaluatie, met name welke type lidmaatschapfunctie en welke logische operatoren het meest in aanmerking komen, en hoe de resultaten kartografisch kunnen worden weergegeven. Bij de case studies die tot nu toe in de literatuur zijn gerapporteerd blijkt modellering van interacties (de invloed van een bodemeigenschap op de geschiktheid hangt af van het niveau van een of meer andere) een zwak punt te zijn. Aan dat aspect is daarom in dit onderzoek bijzondere aandacht besteed.

Uit een globale verkenning van de wiskundige eigenschappen van de belangrijkste typen van lidmaatschapfuncties is de voorlopige conclusie getrokken dat stuksgewijs lineaire functies het meest geschikt zijn. Verschillende combinaties fuzzy OR en AND operatoren zijn getest door ze toe te passen op een eenvoudig 2-dimensionaal voorbeeld. Daaruit bleek dat, met uitzondering van één, alle combinaties een ongewenst gedrag kunnen vertonen, door een resultaat op te leveren dat niet in overeenstemming is met de *a priori* kennis in het aangeleverde voorbeeld. De gunstige uitzondering is: de Begrensde Som operator voor OR, en de Product operator voor AND.

In het geval van BODEGA leidt dit tot het volgende systeem:

1. Berekening van de lidmaatschapgraden in de gradaties van de beoordelingsfactoren:

1. Ga aan de hand van de beslisbomen voor de gradaties van de beoordelingsfactoren na welke klassen van bodemeigenschappen voorkomen in de definities van de gradaties;
2. Definieer voor elke klasse van bodemeigenschappen een stuksgewijs lineaire lidmaatschapfunctie, met als parameters de oversteekpunten ter plaatse van de harde klassegrenzen en door de gebruiker vrij te kiezen grenszone-breedten;
3. Bereken met behulp van deze functies uit de bodemgegevens (van het bodemprofiel of het kaartvlak) de lidmaatschapgraden in alle klassen van bodemeigenschappen;
4. Ga aan de hand van de beslisbomen na welke klassen van bodemeigenschappen met AND, en welke met OR worden gecombineerd;
5. Bereken de lidmaatschapgraden in alle gradaties van alle beoordelingsfactoren, door de lidmaatschapgraden in de klassen van bodemeigenschappen bij elkaar op te tellen (in geval van OR) of met elkaar te vermenigvuldigen (in geval van AND).

2. Berekening van de lidmaatschapgraden in de geschiktheidsklassen:

1. Ga aan de hand van de beslisbomen voor de geschiktheidsklassen na welke gradaties met AND, en welke met OR worden gecombineerd;
2. Bereken de lidmaatschapgraden in alle geschiktheidsklassen, door de lidmaatschapgraden in de gradaties bij elkaar op te tellen (in geval van OR) of met elkaar te vermenigvuldigen (in geval van AND).

Via dit systeem wordt vanzelf alle kennis over interacties, zoals die in het harde model al is gerepresenteerd, ook in het zachte model opgenomen.

In hoofdstuk 4 wordt een case study besproken waarin het hierboven beschreven systeem is toegepast de geschiktheid voor weidebouw, gebruikmakend van de gegevens van de bodemkaartenheden in een proefgebied in Noord-Brabant. De berekeningen daarvoor zijn uitgevoerd met een voor dit doel geschreven computerprogramma in S-plus, dat is opgenomen in aanhangsel A. De resultaten bestaan uit een serie kaarten (aanhangsel D t.e.m. G), waarop de ruimtelijke verspreiding is aangegeven van de zachte gradaties van de respectieve beoordelingsfactoren en,

ter vergelijking, van de oorspronkelijke harde gradaties. Op de laatste kaart (aanhangel H) is de ruimtelijke verspreiding aangegeven van de zachte geschiktheidsklassen voor weidebouw, en wederom ter vergelijking de oorspronkelijke harde klassen.

Als we de kaarten van het zachte model vergelijken met die van het harde model, dan blijkt steeds dat de beelden globaal geheel met elkaar overeen komen. Het verschil is dat de kaarten van het zachte model voor sommige kaartvlakken aangeven dat het een overgang betreft tussen twee oorspronkelijke harde klassen. In die zin geven deze kaarten dus meer informatie.

Hoofdstuk 5 besluit met conclusies en aanbevelingen. De conclusies zijn:

1. Bestaande evaluatiesystemen, gebaseerd op beslistabellen, beslisbomen, of beslisregels, kunnen op eenvoudige en correcte wijze worden gefuzzifieerd door lidmaatschapgraden te berekenen met stuksgewijs lineaire lidmaatschapfuncties, en deze lidmaatschapgraden te combineren door optellen en vermenigvuldigen. Dit geldt ook voor het landevaluatiesysteem BODEGA.
2. Bodemgeschiktheidskaarten gebaseerd op een gefuzzifieerd landevaluatiesysteem tonen meer gedifferentieerde beoordelingen dan kaarten gebaseerd op een klassiek landevaluatiesysteem.
3. Een gefuzzifieerde, zachte vorm van BODEGA is te zien als een generalisatie van de oorspronkelijke harde vorm, in die zin dat de harde vorm een bijzonder geval is van de zachte vorm. Als de gebruiker de breedten van alle klassegrenszones op nul stelt dan krijgt hij/zij het oorspronkelijke harde systeem weer terug.
4. Het fuzzifiëren van BODEGA opent de mogelijkheid om puntgegevens verkregen uit profielbeschrijvingen intensiever te gebruiken, door lidmaatschapgraden in geschiktheidsklassen geostatistisch te interpoleren, daarbij eventueel gebruikmakend van hulpinformatie in de vorm van bodemgrenzen.
5. Het fuzzifiëren van BODEGA opent de mogelijkheid om, behalve de kwalitatieve geschiktheidsklassen, ook de kwantitatieve waarde van gronden te schatten op een meer objectieve en inzichtelijke wijze dan tot nu toe. Het zachte model dient daartoe te worden gecalibreerd op een reeks bodemprofielen met een vastgestelde waarde.
6. Het fuzzifiëren van BODEGA opent de mogelijkheid om nieuwe, voor de gebruiker wellicht meer behulpzame vormen van kartografische weergave te ontwikkelen.

7. Uit de ervaring met het fuzzifiëren van het weidebouw-gedeelte van BODEGA blijkt dat het programmeerwerk nodig om geheel BODEGA te fuzzifiëren niet meer dan enkele dagen hoeft te kosten. De programmeertaal S-plus bleek goed te voldoen.

De aanbevelingen zijn:

1. Een prototype BODEGA-fuzzy maken, met de mogelijkheid voor de gebruiker om de breedten van klassegrenszones interactief te kiezen.
2. In een landevaluatieproject BODEGA-fuzzy toepassen op profielgegevens en het geostatistisch interpoleren van lidmaatschapgraden in geschiktheidsklassen uitproberen.
3. In een landevaluatieproject BODEGA-fuzzy toepassen, en daarbij samen met de opdrachtgever nieuwe kaartvormen uitproberen.
4. In een landevaluatieproject BODEGA-fuzzy toepassen, en daarbij kwantitatieve waardebeoordeling van gronden uitproberen via calibratie op een reeks van bodemprofielen.

1. INLEIDING

Doel van dit onderzoek was na te gaan of en hoe een bestaand landevaluatiesysteem, bijvoorbeeld BODEGA, kan worden voorzien van geleidelijke i.p.v. scherpe klassegrenzen door middel van ‘fuzzy set’ methodiek. Aangezien het om bestaande systemen gaat, is het ‘fuzzifiëren’ daarvan een relatief beperkt en grotendeels technisch probleem, want het belangrijkste werk, n.l. het expliciteren van de ‘expert knowledge’ in de vorm van beslisregels, is al gebeurd.

De opbouw van dit rapport is als volgt.

Hoofdstuk 2 geeft een overzicht van de theorie van vage verzamelingen, meerwaardige logica en zachte modellen, voorzover die relevant lijkt voor mogelijke toepassing in de landevaluatie. De theorie van vage verzamelingen is een recente uitbreiding van de klassieke verzamelingenleer. Waar de klassieke verzamelingenleer ervan uitgaat dat er slechts twee mogelijkheden zijn - een element behoort wel of niet tot een verzameling - laat de vage verzamelingenleer toe dat een element in zekere mate tot een verzameling of klasse behoort. Deze laatste benadering doet in beginsel meer recht aan het feit dat er in de context van landevaluatie veelvuldig sprake is van grensgevallen, en dat de momenteel gehanteerde scherpe klassegrenzen vaak een min of meer arbitrair karakter hebben. Met methoden gebaseerd op vage verzamelingen kan rekening worden gehouden met onzekerheid over klassegrenzen, door geleidelijke in plaats van scherpe grenzen te vormen. Dat leidt tot een intensiever gebruik van beschikbare gegevens en achtergrondkennis, en tot meer gedifferentieerde beoordelingen.

Aan het concept van geleidelijke klassegrenzen wordt wiskundig vorm gegeven door z.g. lidmaatschapgraden in te voeren. Dit zijn getallen tussen 0 en 1, die een geleidelijk verlopende functie zijn van de eigenschappen van de te beoordelen bodems. Deze lidmaatschapfuncties worden zo gedefinieerd dat de maximale waarde 1 wordt bereikt als de beoordeelde bodem een typische vertegenwoordiger is van de betreffende geschiktheidsklasse, de minimale waarde 0 als hij in het geheel niet thuis hoort in die klasse, en tussenliggende waarden als het min of meer een grensgeval is. In principe komen diverse wiskundige functies in aanmerking om de rol van lidmaatschapfunctie te spelen. In de literatuur worden met name z.g. Zadeh-functies, S-functies en stuksgewijs lineaire functies voorgesteld.

Bij landevaluatie wordt geredeneerd in termen van bodemeigenschappen, in de trant van "als eigenschap X een waarde groter dan ... heeft, eigenschap Y een waarde kleiner dan ..., en eigenschap Z een waarde tussen ... en ..., dan is de geschiktheidsklasse ...". Dergelijke redeneringen zijn op te vatten als **beslisregels**, en een landevaluatiesysteem kan gezien worden als een stelsel van dit soort beslisregels. Om er handmatig gemakkelijk mee te kunnen werken worden dergelijke stelsels van beslisregels vaak weergegeven in de vorm van beslistabellen of (grafisch) als beslisbomen, maar de vorm van beslisregels leent zich beter voor een geautomatiseerd Beslissing Ondersteunende Systeem. Via een beslisregel worden een aantal klassen van bodemeigenschappen met elkaar gecombineerd; in het bovenstaande voorbeeld zijn dat er drie. Normaliter, als de klassen van bodemeigenschappen scherpe grenzen hebben, dan gebeurt het combineren van klassen via de klassieke tweewaardige logica, met de z.g. Booleaanse **operatoren** IS, AND, OR en NOT. In het geval van vage klassen gebeurt het combineren van klassen via **meerwaardige logica**. Een uitspraak, bijvoorbeeld bodem A heeft geschiktheid X, kan daarbij niet alleen waar of onwaar zijn, maar kan ook tussenliggende gradaties van 'mogelijkheid' hebben. Ook de meerwaardige logica maakt gebruik van logische operatoren, wat in feite rekenregels zijn voor het combineren van lidmaatschapgraden in een of meer vage klassen tot een lidmaatschapgraad in een nieuwe klasse. In de literatuur zijn vele van dergelijke operatoren voorgesteld; in hoofdstuk 2 worden de belangrijkste daarvan besproken. Tevens wordt in hoofdstuk 2 de formele structuur van vage beslisregels uitgelegd, en wordt besproken hoe een 'fuzzy rule base' de kern vormt van een **zacht** of 'greybox' model.

In hoofdstuk 3 wordt nagegaan op welke wijze de nieuwe methodologie het beste toegepast kan worden in de landevaluatie, met name welke type lidmaatschapfunctie en welke logische operatoren het meest in aanmerking komen, en hoe de resultaten kartografisch kunnen worden gepresenteerd. Bij de case studies die tot nu toe in de literatuur zijn gerapporteerd blijkt modellering van interacties (de invloed van een bodemeigenschap op de geschiktheid hangt af van het niveau van een of meer andere) een zwak punt te zijn. Aan dat aspect is daarom in dit onderzoek bijzondere aandacht besteed.

In hoofdstuk 4 wordt een case study besproken waarin het hierboven beschreven systeem is toegepast de geschiktheid voor weidebouw, gebruikmakend van de gegevens van de bodemkaartenheden in een proefgebied in Noord-Brabant. De berekeningen daarvoor zijn uitgevoerd met een voor dit doel geschreven computerprogramma in S-plus, dat is opgenomen in aanhangsel A. De resultaten bestaan uit een serie kaarten (aanhangsel D t.e.m. G), waarop de ruimtelijke verspreiding is aangegeven van de zachte gradaties van de respectieve beoordelingsfactoren en, ter vergelijking, van de oorspronkelijke harde gradaties. Op de laatste kaart (aan-

hangsel H) is de ruimtelijke verspreiding aangegeven van de zachte geschiktheidsklassen voor weidebouw, en wederom ter vergelijking de oorspronkelijke harde klassen.

Hoofdstuk 5 besluit met conclusies en aanbevelingen.

Lezers die niet primair in de wiskundige aspecten zijn geïnteresseerd, kunnen zich beperking tot de Introductie van hoofdstuk 2 voor enige achtergrondkennis, en dan verder gaan naar hoofdstuk 4 met de case study.

2. VAGE VERZAMELINGEN, MEERWAARDIGE LOGICA EN ZACHTE MODELLEN

2.1. Introductie

Als voorbereiding op ‘fuzzy sets’, ‘fuzzy logic’ and ‘fuzzy models’ is het handig eerst enkele basisbegrippen uit de klassieke verzamelingenleer en logica in herinnering te brengen. De centrale begrippen in de klassieke verzamelingenleer, ontwikkeld door Georg Cantor aan het einde van de 19e eeuw, zijn:

element De kleinste entiteit die in het kader van een toepassing in beschouwing wordt genomen. Dit kan van alles zijn, bijvoorbeeld een getal, een bodemeenheid, of een punt in een vlak. De algemene aanduiding van een element is x .

universum De collectie van alle elementen die in het kader van een toepassing relevant zijn, bijvoorbeeld alle reële getallen tussen 0 en 100, alle bodemeenheden in een bepaald gebied, of alle punten in een bepaald vlak. Een universum kan eindig of oneindig zijn. De algemene aanduiding van een universum is X .

verzameling Een groep van elementen uit het beschouwde universum. Meestal wordt een groep gevormd om er als geheel een uitspraak over te doen of een bewerking op toe te passen. Een directe manier om een groep te definiëren is door in een lijst alle elementen op te sommen die tot de groep behoren. Een indirecte manier is om een of meer eigenschappen te specificeren die een element moet bezitten om tot de groep te behoren. In dat geval spreekt men vaak van een klasse. Bijvoorbeeld: alle bodemindividuen in een bepaald gebied met een leemgehalte in de bovengrond groter dan 10 %. De algemene aanduiding van een klassieke verzameling is A .

De klassieke verzamelingenleer gaat uit van het principe dat een gegeven element wel of niet tot een gegeven verzameling behoort, en dat dit niet alle twee tegelijk het geval kan zijn. Volgens dit beginsel zijn er voor het lidmaatschap

van een element x bij een verzameling A dus slechts twee, elkaar uitsluitende mogelijkheden: wel of geen lid. Als bijvoorbeeld x een bodem voorstelt, en A de verzameling (klasse) van bodems die voor een bepaald gebruik ‘zeer geschikt’ zijn, dan behoort die bodem wel of niet tot de klasse ‘Zeer geschikt’. In wiskundige notatie: $x \in A$ of $x \notin A$.

Parallel daaraan gaat de klassieke logica ervan uit dat er wat betreft een uitspraak slechts twee mogelijkheden zijn: ‘waar’ of ‘niet waar’. In het bovengenoemde voorbeeld: de uitspraak ”bodem x is zeer geschikt” kan waar zijn of niet waar. Andere dan deze twee mogelijkheden vallen buiten het kader van de klassieke, tweewaardige logica.

Er zijn twee veel voorkomende situaties die in strijd lijken te zijn met dit dualiteitsprincipe, maar het in werkelijkheid niet zijn. De eerste situatie is dat een element tot meer dan één verzameling kan behoren. Een voorbeeld hiervan is wanneer de klasse ‘Zeer geschikt’ is gedefinieerd als een sub-klasse van de klasse ‘Geschikt’. Een bodem in de klasse ‘Zeer geschikt’, behoort dan tevens tot de klasse ‘Geschikt’; omgekeerd hoeft dat niet het geval te zijn. Dit is een voorbeeld van ‘overlappende’ verzamelingen. Er zijn hier inderdaad meer dan twee mogelijkheden, namelijk: (1) ‘geschikt’ en bovendien ‘zeer geschikt’, (2) ‘geschikt’ maar niet ‘zeer geschikt’, en (3) ‘geschikt’ noch ‘zeer geschikt’. Maar het blijft zo dat er wat betreft het lidmaatschap van één bepaalde klasse slechts twee mogelijkheden zijn.

De tweede situatie is dat er onvoldoende (nauwkeurige) gegevens beschikbaar zijn over een te classificeren element, en dat men daardoor onzeker is of dat element tot de betreffende klasse behoort. Ook hier lijken er meer dan twee mogelijkheden te zijn, namelijk: wel, niet en onzeker. Echter, onzekerheid heeft ook in dit geval betrekking op de mens (het subject) die beoordeelt, niet op de feitelijke situatie die wordt beoordeeld (het object). Wat betreft dit laatste blijft het zo dat er volgens de klassieke verzamelingenleer slechts twee mogelijkheden in beschouwing worden genomen: wel of geen lid. Men kan er alleen onzeker over zijn welke van die twee het geval is. Een onzekerheid die overigens in principe kan worden verminderd of opgeheven door meer of nauwkeuriger gegevens te verzamelen.

Niet alleen de klassieke logica is gebaseerd op dit dualiteitsbeginsel, ook een groot deel van de wiskunde en de met logica en wiskunde werkende takken van wetenschap bouwen erop voort. Het is een zeer oud beginsel, dat impliciet of expliciet alom tegenwoordig is in wetenschap en techniek. Vooral beta-wetenschappers is het met de paplepel ingegoten. Anderzijds is door velen al lang geleden opgemerkt dat dit beginsel slechts een abstractie van de werkelijkheid is, en wel een die vaak slecht op de werkelijkheid past, omdat zich in die werkelijkheid allerlei over-

gangsvormen voordoen. Dat is niet alleen in het dagelijks leven het geval, maar ook in de wetenschap. Dit is in de vorige eeuw voor de Poolse filosoof en logicus Jan Łukasiewicz en de Azerbeidjaanse electrotechnicus Lofti Zadeh reden geweest om op zoek te gaan naar een nieuwe theorie van verzamelingen en een daarop geëntte nieuwe vorm van logica, waarin expliciet ruimte zou worden gelaten voor tussenvormen, gradaties en semantische vaagheid. Zadeh is de grondlegger van wat in het engels als ‘fuzzy set theory’ en ‘fuzzy logic’ bekend staat; termen die in het nederlands kunnen worden vertaald als vage verzamelingenleer en vage of meerwaardige logica. De toevoeging ”vage” slaat uiteraard niet op de theorie (die is wiskundig exact), maar op het feit dat de grens tussen wat wel en niet tot een verzameling behoort, en tussen wel en niet waar zijn van een uitspraak, niet meer scherp hoeft te zijn. In het frans spreekt men van ‘ensemble flou’, in het duits van ‘unscharfe Menge’. In feite wordt bij deze benadering uitgegaan van een oneindig aantal mogelijke gradaties. In de laatste 30 jaar is de wiskundige basis geconsolideerd en uitgebreid, zijn vele tientallen boeken over dit onderwerp verschenen, en duizenden artikelen over toepassingen in o.a. de regeltechniek¹, systeemkunde, informatica, besliskunde, economie, ecologie, aardwetenschappen, sociologie, psychologie en organisatiekunde. Zie McNeill and Freiburger (1993) voor een overzicht van de ontwikkelingen. De belangrijkste principes van de theorie worden hierna uitgelegd.

2.2. Vage verzamelingen

2.2.1. Definitie en lidmaatschapfuncties

Op intuïtief niveau kan een vage verzameling worden omschreven als een verzameling die de mogelijkheid van gedeeltelijk lidmaatschap toelaat. Formeel is een vage verzameling A in universum X gedefinieerd als een klassieke verzameling van geordende paren (Kandel, 1986):

$$A = \{x, \mu_A(x)\}, \quad x \in X$$

waarin $\mu_A(x)$ de lidmaatschapgraad van x in A wordt genoemd. Een lidmaatschapgraad is een getal in het interval $[0,1]$, waarbij 1 en 0 volledig lidmaatschap, resp. niet-lidmaatschap aangeven. Een voorbeeld van een vage verzameling A met slechts 3 elementen (a, b en c) is:

$$A = \{(a, 1.0), (b, 0.0), (c, 0.5)\}$$

¹Behalve publicaties zijn er al meer dan 2000 patenten op technische vindingen die van ‘fuzzy control’ gebruik maken (McNeill and Freiburger, 1993).

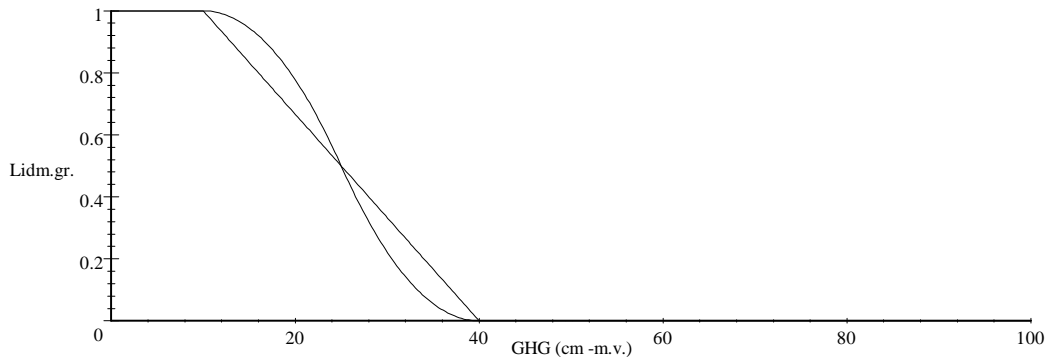


Figure 2.1: Lidmaatschapsgraad in een vage klasse ‘Slechte ontwatering’, als links-open stuksgewijs lineaire functie en als Z-functie van de GHG met grensparame- ters $\gamma_1=10$ cm en $\gamma_2=40$ cm.

Hierin heeft element a volledig en element b in het geheel geen lidmaatschap in A, terwijl element c een middenpositie inneemt.

Het vormen van een vage verzameling komt dus neer op het toekennen van lidmaatschapsgraden aan elementen. Een veel gevolgde methode om dat te doen is om de graden te definiëren als een functie van een of meer eigenschappen van de elementen. Men spreekt dan van een lidmaatschapfunctie (eng.: ‘membership function’). De lidmaatschapsgraden van een vage klasse ‘Slechte ontwatering’ zouden bijvoorbeeld kunnen worden bepaald als een functie van de Gemiddelde Hoogste Grondwaterstand (GHG). Zo’n functie moet dan bij ondiepe GHG’s hoge lidmaatschapsgraden opleveren, en bij diepe GHG’s lage graden. Er zijn diverse soorten functies die voor een dergelijk doel in aanmerking komen, bijvoorbeeld links-open stuksgewijs lineaire functies en Z-functies. Figuur 2.1 laat een voorbeeld zien van deze twee soorten functies.

Figuur 2.2 laat een voorbeeld zien van een stuksgewijs lineaire functie die eerst stijgt van 0 tot 1, dan constant blijft, en tenslotte weer tot 0 daalt. Op deze wijze ontstaat een trapezium vorm, vandaar de naam trapeziumfunctie. Het voorbeeld in figuur 2.2 zou een lidmaatschapfunctie kunnen zijn voor een vage klasse ‘Matige ontwatering’, welke op de GHG-as overlappend grenst aan de klasse ‘Slechte ontwatering’ van figuur 2.1.

In principe kan elke functie die waarden tussen 0 en 1 oplevert dienen als lidmaatschapfunctie (LF). Concentreren we ons op de veel gebruikte LFs, dan zijn die in te delen in drie klassen (Lindskog, 1997), zoals in de volgende paragrafen wordt besproken.

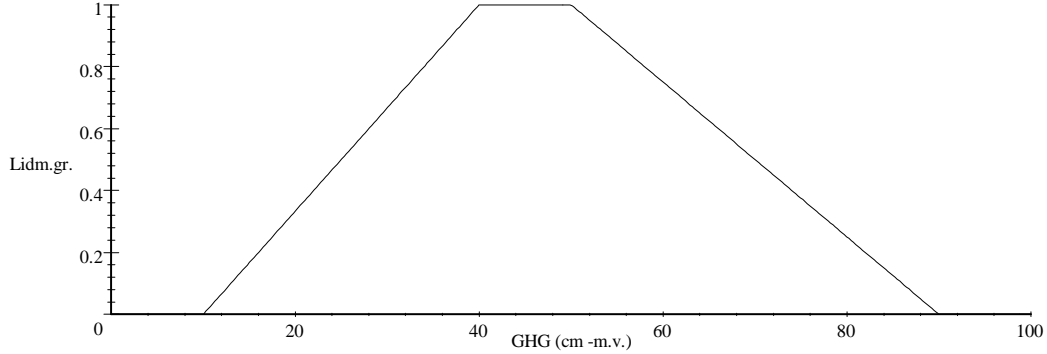


Figure 2.2: Lidmaatschapgraad in een vage klasse 'Matige ontwatering', als trapeziumfunctie van de GHG met grensparameters $\gamma_1=10$ cm, $\gamma_2=40$ cm, $\gamma_3=50$ cm en $\gamma_4=90$ cm.

2.2.2. Netwerk-klassieke LFs

Dit zijn de sigmoïdale en de Gaussische LFs, gedefinieerd als:

$$\text{Ifsig}(u, \beta, \gamma) : \quad \mu_A(u, \beta, \gamma) = \frac{1}{1 + e^{-\beta(u-\gamma)}} \quad (2.1)$$

$$\text{Ifgauss}(u, \beta, \gamma) : \quad \mu_A(u, \beta, \gamma) = e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{u-\gamma}{\beta}\right)^2} \quad (2.2)$$

Hierin is de variabele u een kwantitatieve eigenschap van de elementen (bijvoorbeeld de GHG), de parameters β en γ zijn gerelateerd aan respectievelijk de schaal en de positie van de LF (zie figuur 2.3 en 2.4).

2.2.3. Zadeh LFs

Deze bestaan uit de dalende Z-, de stijgende S- en de klokvormige π -functies (genoemd naar de vorm), met de grensparameters $\gamma_1 \leq \gamma_2 \leq \gamma_3 \leq \gamma_4$ gedefinieerd als:

$$\text{lfz}(u, \gamma_1, \gamma_2) : \quad \mu_A(u, \gamma) = \begin{cases} 1 & \text{als } u \leq \gamma_1 \\ 1 - 2\left(\frac{u-\gamma_1}{\gamma_2-\gamma_1}\right)^2 & \text{als } \gamma_1 < u \leq \frac{\gamma_1+\gamma_2}{2} \\ 2\left(\frac{u-\gamma_2}{\gamma_2-\gamma_1}\right)^2 & \text{als } \frac{\gamma_1+\gamma_2}{2} < u \leq \gamma_2 \\ 0 & \text{als } u > \gamma_2 \end{cases} \quad (2.3)$$

$$\text{ifs}(u, \gamma_1, \gamma_2) : \quad \mu_A(u, \gamma) = 1 - \text{lfz}(u, \gamma_1, \gamma_2) \quad (2.4)$$

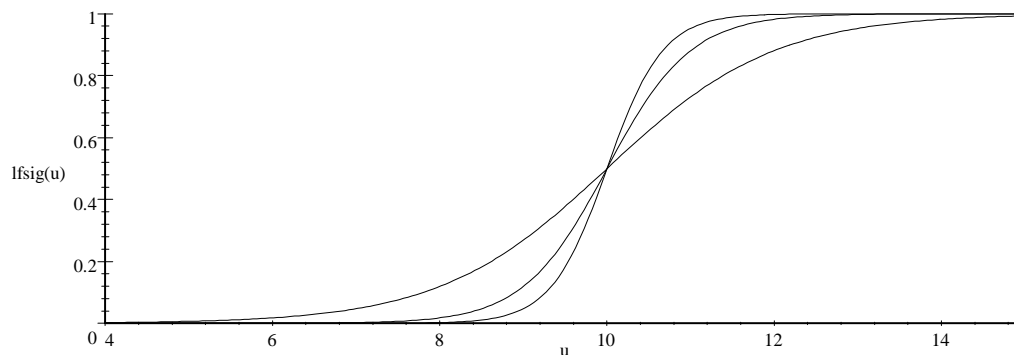


Figure 2.3: Sigmoidale lidmaatschapfuncties met $\gamma=10$ en $\beta=1, 2$ en 3 (toenevende steilte).

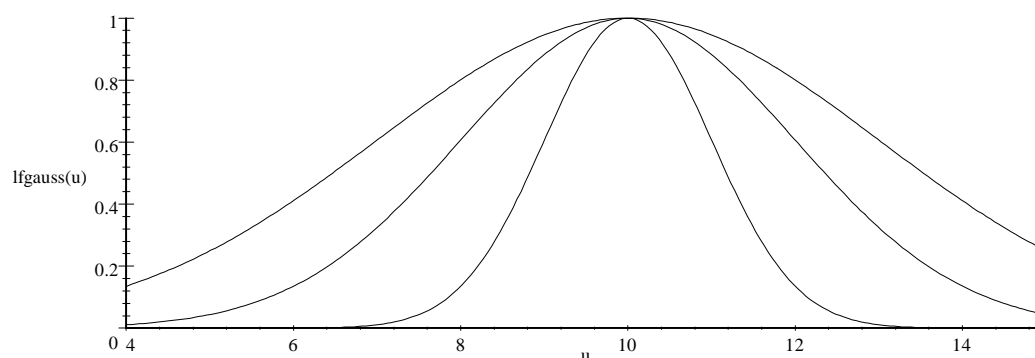


Figure 2.4: Gaussische lidmaatschapfuncties met $\gamma=10$ en $\beta=1, 2$ en 3 (afnemende steilte).

$$\text{lfp}(u, \gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \gamma_4) : \mu_A(u, \gamma) = \begin{cases} \text{lfs}(u, \gamma_1, \gamma_2) & \text{als } u \leq \gamma_2 \\ 1 & \text{als } \gamma_2 < u \leq \gamma_3 \\ \text{lfs}(u, \gamma_3, \gamma_4) & \text{als } u > \gamma_3 \end{cases} \quad (2.5)$$

Hierin zijn de parameters γ_1 en γ_2 de punten op de X-as waar de functie begint en eindigt met dalen (lfs), of stijgen (lfs en lfp); γ_3 en γ_4 zijn de punten waar de functie wederom begint en eindigt met dalen (lfp). Midden hiertussen, dus bij $(\gamma_1 + \gamma_2)/2$ en bij $(\gamma_3 + \gamma_4)/2$ is de lidmaatschapgraad precies gelijk aan $\frac{1}{2}$. Dit punt wordt in dit rapport verder het oversteekpunt (Eng.: crossover point) genoemd. Zie figuur 2.5 voor voorbeelden van de Z- en de S-functie.

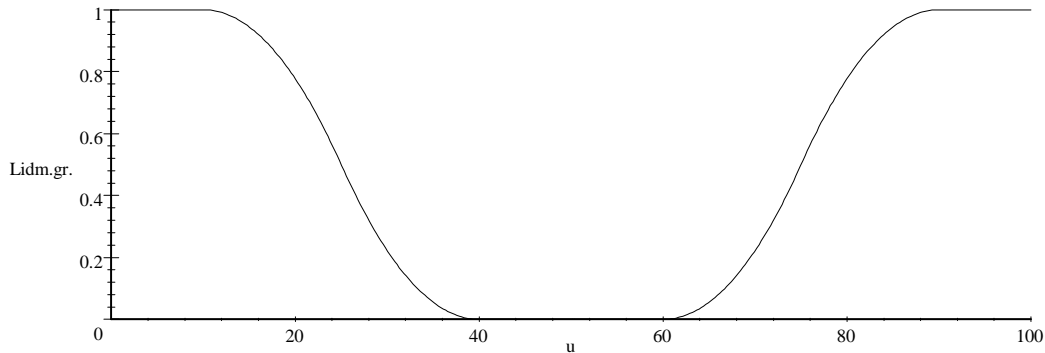


Figure 2.5: Zadeh lidmaatschapfuncties: Z-functie met grensparameters 10 en 40, en S-functie met grensparameters 60 en 90.

2.2.4. Stuksgewijs lineaire LFs

Deze bestaan uit de links-open, rechts-open, driehoek- en trapeziumfunctie, met de grensparameters $\gamma_1 \leq \gamma_2 \leq \gamma_3 \leq \gamma_4$ gedefinieerd als:

$$\text{Ifl}(u, \gamma_1, \gamma_2) : \mu_A(u, \gamma) = \begin{cases} 1 & \text{als } u \leq \gamma_1 \\ \frac{\gamma_2 - u}{\gamma_2 - \gamma_1} & \text{als } \gamma_1 \leq u \leq \gamma_2 \\ 0 & \text{als } u \geq \gamma_2 \end{cases} \quad (2.6)$$

$$\text{of korter} : \mu_A(u, \gamma) = \max\left(\min\left(\frac{\gamma_2 - u}{\gamma_2 - \gamma_1}, 1\right), 0\right) \quad (2.7)$$

$$\text{Ifr}(u, \gamma_1, \gamma_2) : \mu_A(u, \gamma) = \max\left(\min\left(\frac{u - \gamma_1}{\gamma_2 - \gamma_1}, 1\right), 0\right) \quad (2.8)$$

$$\text{Iftri}(u, \gamma_1, \gamma_2, \gamma_3) : \mu_A(u, \gamma) = \max\left(\min\left(\frac{u - \gamma_1}{\gamma_2 - \gamma_1}, \frac{\gamma_3 - u}{\gamma_3 - \gamma_2}\right), 0\right) \quad (2.9)$$

$$\text{Iftrap}(u, \gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \gamma_4) : \mu_A(u, \gamma) = \max\left(\min\left(\frac{u - \gamma_1}{\gamma_2 - \gamma_1}, 1, \frac{\gamma_4 - u}{\gamma_4 - \gamma_3}\right), 0\right) \quad (2.10)$$

De γ 's spelen hier dezelfde rol als bij de Zadeh functies. Zie figuur 2.6 voor enkele voorbeelden.

Het definiëren van een vage klasse op basis van een kwantitatieve variabele komt dus neer op het kiezen van een type lidmaatschapfunctie en van de bijbehorende grensparameters. Op beide keuzen wordt ingegaan in hoofdstuk 3 over toepassingen in de landevaluatie. Bij die toepassingen zal het vrijwel altijd zo zijn

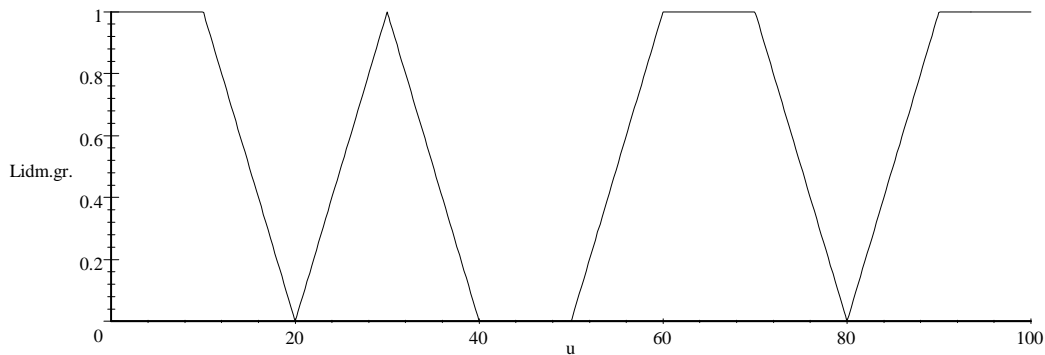


Figure 2.6: Links-open, driehoek-, trapezium- en rechts-open lidmaatschapfunctie met grensparameters $\gamma = 10, 20, \dots, 90$.

dat vage klassen moeten worden gedefinieerd op basis van meerdere variabelen. Hoe je dat kunt doen wordt besproken in de volgende paragraaf.

2.3. Meerwaardige logica

Als eenmaal een aantal vage klassen zijn gedefinieerd, dan kunnen daar net als bij klassieke verzamelingen bepaalde bewerkingen (operatoren) op worden toegepast om ze te combineren tot nieuwe klassen. Enkele belangrijke operatoren worden hierna kort beschreven.

2.3.1. Max operator voor ‘vereniging’

De vereniging (Eng.: ‘union’) van A en B levert een nieuwe verzameling $C = A \cup B$, waarvan de lidmaatschapgraden kunnen worden gedefinieerd als de grootste van de twee lidmaatschapgraden in A en B :

$$\mu_C(x) = \text{Max}(\mu_A(x), \mu_B(x)) \quad \text{voor alle } x \in X$$

Deze operator correspondeert met het logische OR. Stel dat voor drie bodems a , b en c de lidmaatschapgraden in de klassen ‘Geschikt voor akkerbouw’ en ‘Geschikt voor weidebouw’ zijn bepaald als in onderstaande tabel. Dan kan met deze operator de klasse ‘Geschikt voor akker- of weidebouw’ als volgt worden

gevormd²:

Bodem	a	b	c
Geschikt voor akkerbouw	0.5	0.4	0.9
Geschikt voor weidebouw	0.5	1.0	0.3
Geschikt voor akker- of weidebouw	0.5	1.0	0.9

2.3.2. Begrensde Som operator voor ‘vereniging’

De Begrensde Som van van A en B levert een nieuwe verzameling $C = A \oplus B$, waarvan de lidmaatschapgraden zijn gedefinieerd als de som van de twee lidmaatschapgraden in A en B , met een maximum van 1:

$$\mu_C(x) = \text{Min}\{1, \mu_A(x) + \mu_B(x)\} \quad \text{voor alle } x \in X$$

Deze operator heeft geen strikt equivalent in de klassieke verzamelingenleer. Echter, toegepast op harde klassen, met lidmaatschap 1 en 0 als het element wel, resp. niet tot de klasse behoort, levert de Begrensde Som hetzelfde resultaat op als de Max operator. De Begrensde Som operator en de Max operator zijn in die zin dus vergelijkbaar. In het voorbeeld kan met deze operator de klasse ‘Geschikt voor akker- of weidebouw’ als volgt worden gevormd:

Bodem	a	b	c
Geschikt voor akkerbouw	0.5	0.4	0.9
Geschikt voor weidebouw	0.5	1.0	0.3
Geschikt voor akker- of weidebouw	1.0	1.0	1.0

Uit dit voorbeeld blijkt dat de Begrensde Som operator in zekere zin toleranter is dan de Max operator, omdat behalve de grootste lidmaatschapgraad van het element ook de lidmaatschapgraad in de ander klasse meetelt: een compensatie effect.

2.3.3. Min operator voor ‘doorsnede’

De doorsnede (Eng.: ‘intersection’) van A en B levert een nieuwe verzameling $C = A \cap B$, waarvan de lidmaatschapgraden kunnen worden gedefinieerd als de kleinste van de twee lidmaatschapgraden in A en B :

$$\mu_C(x) = \text{Min}(\mu_A(x), \mu_B(x)) \quad \text{voor alle } x \in X$$

²In het gewone spraakgebruik is het woordje “of” dubbelzinnig. De uitdrukking “A of B” kan namelijk twee betekenissen hebben. In de eerste betekenis zijn er 3 mogelijkheden: alleen A, alleen B, en zowel A als B. In de tweede betekenis zijn er slechts 2 mogelijkheden: alleen A en alleen B. Om aan te duiden dat de eerste betekenis wordt bedoeld, wordt soms de constructie en/of gebruikt. Hier wordt “of”, net als het logische OR, in de eerste betekenis gebruikt.

Deze operator correspondeert met het logische AND. Uitgaande van hetzelfde voorbeeld kan met deze operator de klasse ‘Geschikt voor akker- en weidebouw’ als volgt worden gevormd als:

Bodem	a	b	c
Geschikt voor akkerbouw	0.5	0.4	0.9
Geschikt voor weidebouw	0.5	1.0	0.3
Geschikt voor akker- en weidebouw	0.5	0.4	0.3

2.3.4. Algebraïsch Produkt operator voor ‘doorsnede’

Het Algebraïsch Produkt van A en B , in dit rapport verder korthedshalve Produkt genoemd, levert een nieuwe verzameling $C = AB$, waarvan de lidmaatschapgraden zijn gedefinieerd als het produkt van de twee lidmaatschapgraden in A en B :

$$\mu_C(x) = \mu_A(x) \cdot \mu_B(x) \quad \text{voor alle } x \in X$$

Ook deze operator heeft geen strikt equivalent in de klassieke verzamelingentheorie. Echter, toegepast op harde klassen, met lidmaatschap 1 en 0 als het element wel, resp. niet tot de klasse behoort, levert het Produkt hetzelfde resultaat op als de Min operator. De Produkt operator en de Min operator zijn in die zin dus weer vergelijkbaar. In het voorbeeld kan met deze operator de klasse ‘Geschikt voor akker- en weidebouw’ als volgt worden gevormd:

Bodem	a	b	c
Geschikt voor akkerbouw	0.5	0.4	0.9
Geschikt voor weidebouw	0.5	1.0	0.3
Geschikt voor akker- en weidebouw	0.25	0.4	0.27

Dit voorbeeld laat zien dat de Produkt operator en de Min operator niet alleen verschillende lidmaatschapgraden opleveren, maar dat ook de rangorde hiervan kan verschillen. In de klasse ‘Geschikt voor akker- en weidebouw’ hebben volgens de Min operator de bodems a en c de hoogste, resp. laagste lidmaatschapgraad, terwijl dat volgens de Produkt operator de bodems b en a zijn. Dit illustreert het feit dat, in tegenstelling tot de Min operator, bij de Produkt operator een lage lidmaatschapgraad in de ene klasse min of meer kan worden gecompenseerd door een hoge lidmaatschapgraad in de andere klasse (Zimmermann, 1996, pag. 42).

2.3.5. Complement operator voor ‘ontkenning’

Het complement van A levert een nieuwe verzameling $C = \overline{A}$, waarvan de lidmaatschapgraden zijn gedefinieerd als 1 minus de lidmaatschapgraad in A :

$$\mu_C(x) = 1 - \mu_A(x) \quad \text{voor alle } x \in X$$

Deze operator correspondeert met het logische NOT, en hiermee kan bijvoorbeeld de klasse ‘Niet geschikt voor akker- of weidebouw’ worden gevormd:

Bodem	a	b	c
Geschikt voor akker- of weidebouw	0.5	1.0	0.9
Niet geschikt voor akker- of weidebouw	0.5	0.0	0.1

2.3.6. Fuzzy rules

Het spreekt vanzelf dat de operatoren voor vereniging en doorsnede ook kunnen worden gebruikt om meer dan twee klassen met elkaar te combineren. Voor de specifieke varianten die hiervoor zijn besproken geldt dat ze behoren tot de familie van de z.g. t (co)normen, wat behalve enkele ander gunstige wiskundige eigenschappen óók inhoudt dat ze in geval van meer dan twee klassen recursief kunnen worden toegepast (Zimmermann, 1996). Dat betekent dat je niet per se alle klassen tegelijk met elkaar hoeft te combineren, maar dat je ook mag beginnen met een (willekeurig) tweetal, en het resultaat daarvan successievelijk met de andere klassen mag combineren.

De meerwaardige logica maakt gebruik van vage klassen via ‘fuzzy rules’. Een fuzzy rule is een formele linguïstische constructie van de volgende vorm:

if propositie then conclusie

Hierin is het onderdeel **propositie** van de vorm:

$(U_1 \text{ is } A_{1i}) * \dots * (U_l \text{ is } A_{lk})$

waarin elke $*$ één van de hiervoor beschreven operatoren voorstelt. De onderdelen $(U_1 \text{ is } A_{1i})$ t.e.m. $(U_l \text{ is } A_{lk})$ zijn elementaire proposities, die aan de linguïstische³ voorspellende variabelen U_1 t.e.m. U_l ‘waarden’ koppelen in de vorm van vage klassen A_{1i} t.e.m. A_{lk} .

Het onderdeel **conclusie** is van de vorm:

³Fuzzy set term voor een eigenschap die geen getallen maar verbale uitdrukkingen als mogelijke ‘waarden’ heeft, waarbij elke ‘waarde’ numeriek wordt gerepresenteerd als een vage klasse.

$$\boxed{Y \text{ is } B_s}$$

waarmee aan een te voorspellen linguïstische variabele Y een waarde wordt toegekend in de vorm van een vage klasse B_s . Voluit geschreven is een fuzzy rule dus van de vorm:

$$\boxed{\text{if } (U_1 \text{ is } A_{1i}) * \dots * (U_l \text{ is } A_{lk}) \text{ then } Y \text{ is } B_s}$$

Een voorbeeld van een fuzzy rule in het landevaluatiesysteem BODEGA is:

if	GEMIDDELDE HOOGSTE GRONDWATERSTAND	is	Klasse [25-40]	AND
	ORGANISCHESTOFGEHALTE BOVENSTE HORIZONT	is	Klasse [0-5]	AND
	LUTUMGEHALTE BOVENSTE HORIZONT	is	Klasse [0-8]	AND
	LEEMGEHALTE BOVENSTE HORIZONT	is	Klasse [17,5-100]	
then	STEVIGHEID BOVENGROND	is	Gradatie 2	

Aan dit voorbeeld op zichzelf is niet te zien dat het een fuzzy rule is. Het zou ook een ‘harde’ kennisregel kunnen zijn, geformuleerd in termen van tweewaardige logica. Echter, als de vier genoemde klassen en de gradatie niet als harde maar als vage klassen zijn gedefinieerd, en als AND niet een tweewaardige maar een meerwaardige logica operator is, bijvoorbeeld het Produkt, dan stelt dit een fuzzy rule voor. In dit geval bepaalt de regel dat de lidmaatschapgraad in de vage klasse ‘Gradatie 2’ van de te voorspellen variabele STEVIGHEID BOVENGROND dient te worden berekend als het produkt van de lidmaatschapgraden in de genoemde vage klassen van de predictoren GEMIDDELDE HOOGSTE GRONDWATERSTAND, ORGANISCHESTOFGEHALTE BOVENSTE HORIZONT, LUTUMGEHALTE BOVENSTE HORIZONT en LEEMGEHALTE BOVENSTE HORIZONT. Hoe met behulp van fuzzy rules zachte modellen zijn te bouwen wordt in de volgende paragraaf besproken.

2.4. Zachte modellen

In dit rapport kunnen we ons beperken tot modellen die één variabele voorspellen op grond van meerdere predictoren: MISO modellen (Multiple Input Single Output). Bij landevaluatie gaat het meestal om meer dan één te voorspellen variabele, bijvoorbeeld de geschiktheden voor diverse vormen van landgebruik. Echter, afzonderlijke MISO modellen zijn eenvoudig te combineren tot MIMO modellen, zodat het multivariate output karakter hier geen speciale aandacht behoeft.

Een ‘hard’ MISO model levert één waarde voor de te voorspellen variabele op als output, in het geval van een deterministisch model, of een kansverdeling van waarden in het geval van een stochastisch model. De voorspelling kan plaats vinden op verschillende meetniveau’s: ratio, interval, ordinaal of nominaal. Geschiktheidsbeoordeling via BODEGA, bijvoorbeeld, gebeurt gedeeltelijk op nominaal niveau en gedeeltelijk op ordinaal niveau. Er worden namelijk geschiktheidsklassen voorspeld met een verbale omschrijving van potenties en beperkingen, geen kilos of guldens per hectare (ratio niveau). Ook zijn de klassen niet alle te ordenen op een schaal van ‘goed’ tot ‘slecht’. BODEGA is dus een voorbeeld van een hard, deterministisch model dat op nominaal/ordinaal niveau voorspelt.

Een ‘zacht’ (fuzzy) MISO model levert een vage verzameling van waarden op als voorspelling van de te verklaren variabele. Omdat het geen gewone maar een vage verzameling is, gaat elke waarde dus vergezeld van een lidmaatschapgraad. Deze lidmaatschapgraad geeft aan in welke mate de betreffende waarde geacht wordt ‘waar’ of ‘mogelijk’ te zijn, gegeven de input. Ook nu kan de voorspelling weer plaats vinden op een ratio, interval, ordinale of nominale schaal. Een gefuzzifieerde vorm van BODEGA levert dus niet één geschiktheidsklasse op voor een gegeven bodem, maar lidmaatschapgraden in alle onderscheiden geschiktheidsklassen voor een bepaald bodemgebruik.

Zachte modellen worden afgeleid van kennis die materiedeskundigen bezitten over het betreffende systeem. Deze kennis kan in eerste instantie alleen in taal worden uitgedrukt, en is daarom min of meer vaag en weinig precies. Men spreekt daarom wel van zachte kennis. Ervaring en inzicht zijn de belangrijkste bronnen van deze kennis. De situaties waarin zachte modellen bij uitstek geschikt zijn, zijn die waarin men enerzijds geen of onvoldoende meetgegevens heeft waarmee langs statistische weg een bruikbaar model kan worden afgeleid, en anderzijds ook niet over een adequate theorie beschikt waarvan een model kan worden afgeleid. Landevaluatie valt in deze categorie omdat ‘geschiktheid’ moeilijk is te meten, en omdat het systeem van landgebruik als geheel meestal zo complex is dat complete fysisch-deterministische modellering vooralsnog praktisch niet haalbaar is. Zachte modellen nemen een middenpositie in tussen ‘black box’ modellen, die geheel zijn afgeleid van gegevens, en ‘white box’ modellen, die geheel zijn afgeleid van (veelal natuurkundige) theorie omtrent het systeem. De situatie is weergegeven in figuur 2.7.

De kern van een zacht model bestaat uit een aantal fuzzy rules: een ‘fuzzy

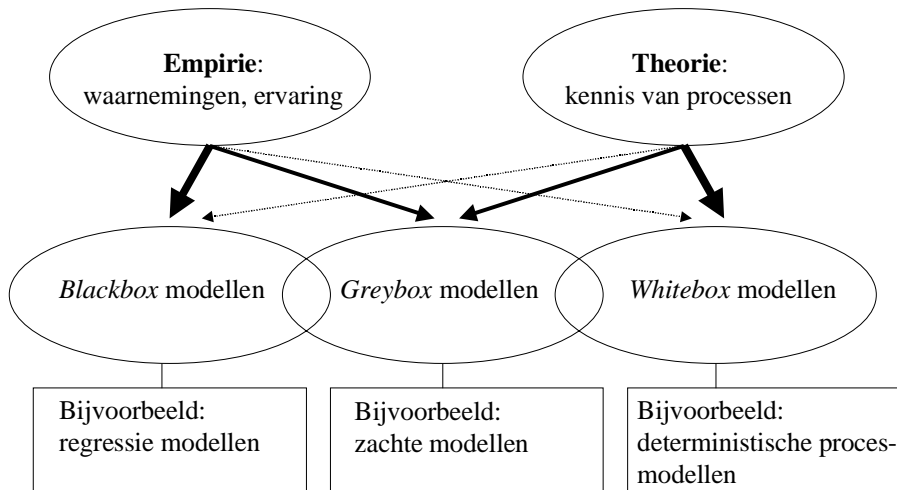


Figure 2.7: Empirie en theorie in blackbox, greybox en whitebox modellen

rule base' van de vorm:

$$\begin{array}{l}
 \text{if } (U_{11} \text{ is } A_{11i}) * \dots * (U_{1l} \text{ is } A_{1lk}) \text{ then } Y \text{ is } B_{1s} \\
 \text{if } (U_{21} \text{ is } A_{21i}) * \dots * (U_{2l} \text{ is } A_{2lk}) \text{ then } Y \text{ is } B_{2s} \\
 \dots \\
 \text{if } (U_{N1} \text{ is } A_{N1i}) * \dots * (U_{Nl} \text{ is } A_{Nlk}) \text{ then } Y \text{ is } B_{Ns}
 \end{array}$$

waarin N het aantal regels voorstelt. De voorspelde vage klassen B_{1s} t.e.m. B_{Ns} hoeven niet allemaal verschillend te zijn; verschillende regels kunnen tot dezelfde conclusie leiden. Hoewel dat niet noodzakelijk is, zouden dergelijke regels m.b.v. een OR operator tot één regel kunnen worden gecombineerd. Als voor OR de Begrensde Som operator (§ 2.3) wordt gebruikt, dan levert zo'n gecombineerde regel dezelfde lidmaatschapgraad op als de lidmaatschapgraden van de aparte regels bij elkaar opgeteld.

Met een zacht model kan voor een bepaald element een voorspelling worden berekend door de gemeten waarden van het element via de gekozen lidmaatschapfuncties om te zetten in lidmaatschapgraden van de vage klassen A van de predictoren U , en deze volgens de regels in de fuzzy rule base te combineren tot lidmaatschapgraden in de vage klassen B van de te voorspellen variabele Y . Net als fysisch-deterministische modellen kunnen ook zachte modellen worden gecali-

breed met gegevens, bijv. door middel van het Levenberg-Marquardt algoritme (Marquardt, 1963).

3. TOEPASSING VAN MEERWAARDIGE LOGICA BIJ LANDEVALUATIE

De toepassing van vage verzamelingen theorie en meerwaardige logica in de landevaluatie staat, ook internationaal gezien, nog in de kinderschoenen. De eerste publicatie op dit gebied is Burrough (1989). Hierin wordt voorgesteld om voor elke relevante bodemeigenschap afzonderlijk een zachte indeling te maken in 'goed' versus 'slecht' voor het betreffende bodemgebruik, en tenslotte de mate van bodemgeschiktheid te berekenen als een gewogen gemiddelde van de lidmaatschapgraden in de diverse 'goed' klassen. (Aangezien hierbij de gewichten alle positief moeten zijn en sommeren tot 1, wordt gesproken van een 'convexe combinatie' van vage verzamelingen.) Burrough et al. (1992) presenteren een case study waarin eveneens per eigenschap een zachte tweedeling in 'goed' versus 'slecht' wordt geconstrueerd, waarna voor de mate van bodemgeschiktheid de doorsnede van de diverse 'goed' klassen wordt genomen via de Min operator. Een groot probleem bij deze aanpak is dat, of nu een gewogen gemiddelde of het minimum van de lidmaatschapgraden wordt berekend, er geen mogelijkheid bestaat om interacties te modelleren. Van een interactie is sprake als het effect van een bepaalde bodemeigenschap op de geschiktheid afhangt van de waarde(n) van een of meer andere bodemeigenschappen. Dergelijke interacties spelen een belangrijke rol bij landevaluatie, en het is dus noodzakelijk om ze goed te kunnen modelleren. De procedures in Burrough (1989) en Burrough et al. (1992) zijn daarom ongeschikt voor algemene toepassing in de landevaluatie.

De methode voorgesteld door Tang et al. (1991) en Tang en Van Ranst (1992) gaat eveneens uit van een indeling in vage klassen voor elke 'land characteristic' afzonderlijk. Een verschil met de methode van Burrough is dat Tang vijf i.p.v. twee vage klassen per voorspellende eigenschap definieert, maar ook hier bestaat geen mogelijkheid om interacties te modelleren. Dobermann en Oberthür (1997) presenteren een case study waarbij de schaal van elke bodemeigenschap wordt verdeeld in drie vage klassen (laag, midden en hoog), die vervolgens via fuzzy rules worden gecombineerd tot vage klassen van potentiële productiviteit en nutriënten beschikbaarheid voor intensieve rijstteelt. Hoewel de fuzzy rule base in deze toepassing geen modellering van interacties laat zien, had dat in principe wel

gekund.

3.1. Keuze van lidmaatschapfuncties

De keuze van een lidmaatschapfunctie bestaat uit twee delen: het type functie en de bijbehorende grensparameters. We gaan hier nader in op beide keuzen, waarbij we focussen op toepassing in landevaluatie. Wat betreft het type lidmaatschapfunctie¹: dat zou zó moeten zijn dat de lidmaatschapgraden niet ongewild tot ver buiten de oorspronkelijke harde klassegrenzen na-ijlen doordat ze slechts asymptotisch tot nul naderen, wat het geval is bij de sigmoïdale en Gaussische functies (figuur 2.3 en 2.4). Dat zou namelijk tot gevolg hebben dat ook voorbij de direct aangrenzende klasse nog lidmaatschapgraden worden berekend die groter zijn dan nul, wat niet in overeenstemming lijkt te zijn met de bedoeling en de betekenis van de klassen. Bovendien zouden op die manier talloze heel kleine lidmaatschapgraden ontstaan die geen enkele reële betekenis hebben en slechts ruis in het systeem veroorzaken.

Van de veel gebruikte typen blijven dan over: de Zadeh functies (Z-, S- en π -functie) en de stuksgewijs lineaire functies. De verschillen tussen deze twee typen lijken niet erg belangrijk te zijn. Bij gelijke keuze van grensparameters lijken de grafieken veel op elkaar (zie figuur 2.1), in de zin dat ze ongeveer gelijke lidmaatschapgraden opleveren. Een voordeel van de Zadeh functies kan zijn dat ze overal differentieerbaar zijn, wat in geval van parameter-optimalisatie wellicht van pas kan komen. Daar staat tegenover dat, in tegenstelling tot Zadeh functies, met stuksgewijs lineaire functies (met name driehoeksfuncties) responsievlakken² kunnen worden gemodelleerd die overal strikt monotoon zijn, d.w.z. zonder dat bij grensovergangen kunstmatige horizontale plateau's ontstaan (Lindskog, 1997). Dit is een duidelijk voordeel indien, zoals bij landevaluatie meestal het geval is, volgens de beschikbare a priori kennis dergelijke plateau's in werkelijkheid niet voorkomen. Een licht voordeel van stuksgewijs lineaire functies is nog dat ze als enkelvoudige formules zijn te programmeren (zie vergelijking (2.7) t.e.m. (2.10)), wat de programma's iets overzichtelijker maakt. Onze voorlopige conclusie is dat stuksgewijs lineaire functies het meest geschikt zijn voor toepassing in de landevaluatie.

De keuze van de grensparameters bestaat ook weer uit twee delen: de plaats van de grenszones op de schalen van de diverse bodemeigenschappen, en de

¹De lidmaatschapfuncties van de diverse vage klassen behoeven in principe niet van hetzelfde type te zijn, maar het komt de eenvoud en overzichtelijkheid van het model ten goede als wel van één type wordt uitgegaan.

²Vlakken die het niveau van Y beschrijven als functie van de predictoren.

breedte van de zones. Als er al een landevaluatiesysteem zoals bijvoorbeeld BODEGA bestaat, dan hebben de deskundigen al harde klassegrenzen gekozen, en het ligt dan voor de hand om de middens van de grenszones (de oversteekpunten) op die plaatsen te leggen. In dat geval hoeven dus alleen nog de breedten van de grenszones te worden gekozen. Deze keuze zal altijd een enigszins arbitrair karakter hebben, net als indertijd de keuze van de harde klassegrenzen. Daar is op zichzelf niets mis mee, in die zin dat er op deze wijze geen exactheid of bepaaldheid verloren gaat. We richten ons immers op een situatie waarin onvoldoende data en theorie voorhanden zijn voor black-box of white-box model-lering, en waarin zachte kennis de belangrijkste bouwsteen is. Een zekere mate van onbepaaldheid is inherent aan zachte kennis. Bij het fuzzifiëren van een bestaand landevaluatiesysteem is het kiezen van de breedten van de grenszones te zien als een extra kennisexplicitatie achteraf. De deskundigen wordt daarbij gevraagd antwoord te geven op de vraag wat zij nog als grensgevallen zien, en wat niet meer. Als een bodem wat betreft één of meer van de eigenschappen tot een grensgeval wordt gerekend dan krijgt die bodem als het ware een oormerk mee dat in de output van het model weer tevoorschijn komt in de vorm van het feit dat zijn lidmaatschapgraden in de geschiktheidsklassen alle kleiner dan 1 zijn. Als omgekeerd in één van de geschiktheidsklassen een lidmaatschapgraad van exact 1 wordt behaald, dan houdt dat in dat de betreffende bodem in geen enkel opzicht als een grensgeval wordt gezien. (N.B.: Dit geldt alleen als geen asymptotisch verlopende lidmaatschapfuncties worden gebruikt; zie de opmerking hiervoor over ruis in het systeem.)

Het lijkt hoe dan ook wenselijk dat binnen een gefuzzifieerd systeem de gebruiker de breedten van de grenszones, en daarmee de mate van vaagheid van de output, interactief kan regelen om het model optimaal te kunnen instellen op de specifieke context van de betreffende toepassing. Als de gebruiker daarbij alle breedten op nul zou stellen, dan krijgt hij het oorspronkelijke harde model weer terug.

Het spreekt vanzelf dat de grensparameters van aan elkaar grenzende klassen zó moeten worden gekozen dat op het punt waar de lidmaatschapfunctie van de ene klasse begint te stijgen, die van de andere begint te dalen, en omgekeerd.

3.2. Keuze van operatoren

Behalve het type lidmaatschapfunctie en de grensparameters van de predictorklassen moet ook een keuze worden gemaakt uit de opties voor de OR en AND operatoren waarmee de elementaire proposities worden gecombineerd tot fuzzy rules (§ 2.3.6). In § 2.3.1 en 2.3.2 zijn twee operatoren besproken voor vereniging

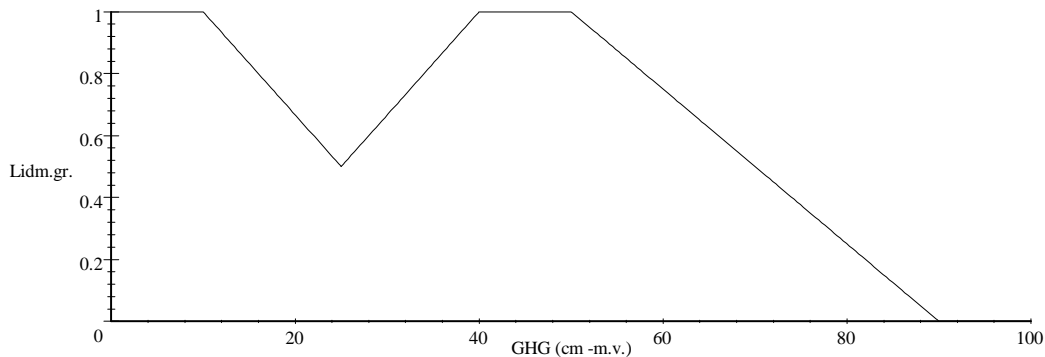


Figure 3.1: Lidmaatschapsfunctie van de klasse ‘Slechte of matige ontwatering’, gevormd door samenvoeging van de klassen ‘Slechte ontwatering’ en ‘Matige ontwatering’ via de Max operator.

van verzamelingen, of OR-combinatie van proposities: de Max operator en de Begrensde Som operator. Evenzo verschenen in § 2.3.3 en 2.3.4 de Min operator en de Produkt operator voor doorsnede van verzamelingen, of AND-combinatie van proposities. Over de keuze van operatoren in de context van landevaluatie merken we het volgende op.

De Max operator voor OR-combinatie van proposities heeft een ongewenst effect als twee aangrenzende klassen bijeen worden gevoegd. In de voormalige grenszone tussen de twee klassen blijft dan namelijk een ‘dip’ over in de lidmaatschapsfunctie van de gecombineerde klasse. Dit terwijl het voor de modelvoorspellingen niet zou mogen uitmaken of de twee klassen vóór invoer in het model worden samengevoegd tot één klasse, danwel binnen het model via een operator worden samengevoegd. De Begrensde Som operator vertoont deze ongewenste eigenschap niet. De figuren 3.1 en 3.2 illustreren het optreden en achterwege blijven van het dip-effect bij de Max, resp. Begrensde Som operator. De lidmaatschapsfuncties in deze figuren representeren elk de klasse ‘Slechte of matige ontwatering’, die werd gevormd door samenvoeging van de aan elkaar grenzende klassen ‘Slechte ontwatering’ en ‘Matige ontwatering’ van figuur 2.1 en 2.2, via de Max operator en de Begrensde Som operator.

Het dip-effect van de Max operator treedt niet alleen op in het univariate geval van twee aangrenzende klassen van dezelfde predictor, het komt ook naar voren als er twee of meer predictoren zijn. Deze en enkele andere eigenschappen van operatoren illustreren we aan de hand van het volgende eenvoudige voorbeeld.

Stel we hebben een model waarmee een variabele GESCHIKTHEID, met de

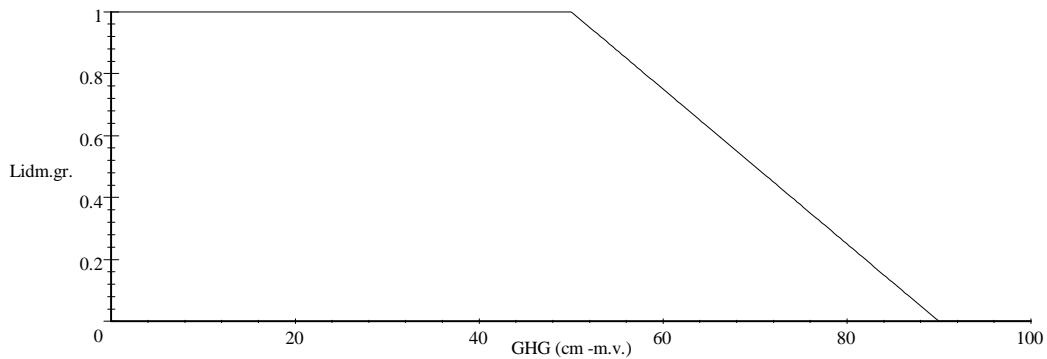


Figure 3.2: Lidmaatschapfunctie van de klasse 'Slechte of matige ontwatering', gevormd door samenvoeging van de klassen 'Slechte ontwatering' en 'Matige ontwatering' via de Begrensdde Som operator.

klassen 'Slecht' en 'Goed', wordt voorspeld met de twee predictoren LUTUMGEHALTE en ORGANISCHSTOFGEHALTE, beide met de klassen 'Laag' en 'Hoog'. We beginnen met een hard model, dus met scherpe klassegrenzen. Eenvoudigheidshalve kiezen we voor zowel LUTUMGEHALTE als ORGANISCHSTOFGEHALTE de grens tussen 'Laag' en 'Hoog' bij 5 %. Stel verder dat GESCHIKTHEID 'Goed' is als LUTUMGEHALTE en ORGANISCHSTOFGEHALTE beide 'Laag' zijn, en 'Slecht' in alle andere gevallen. Modellen als deze zijn weer te geven als tabel, grafiek, beslisboom, en rule base.

Als tabel is het model:

LUTUMGEHALTE	ORGANISCHSTOFGEHALTE	GESCHIKTHEID
Laag	Laag	Goed
Laag	Hoog	Slecht
Hoog	Laag	Slecht
Hoog	Hoog	Slecht

Als grafiek is het model weergegeven in figuur 3.4-A, en als beslisboom in figuur 3.3.

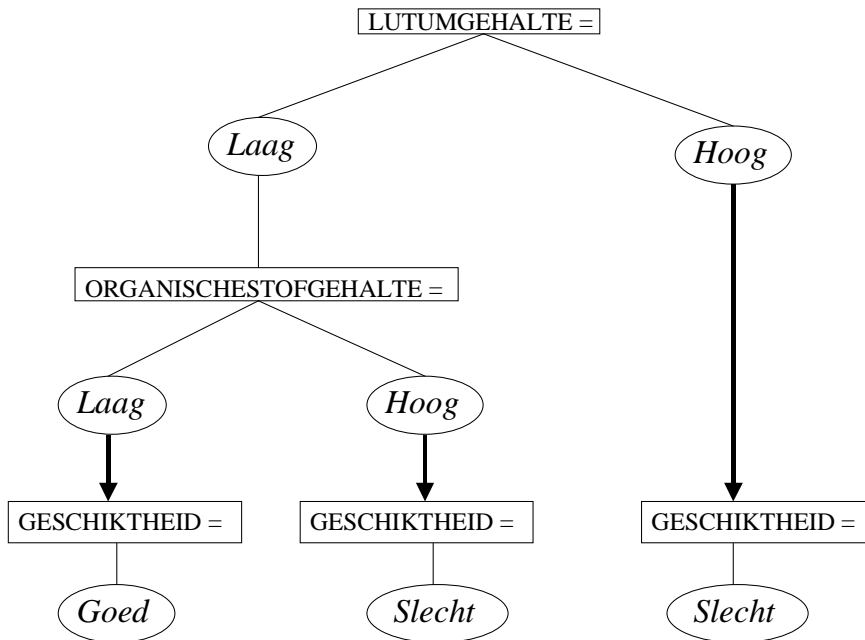
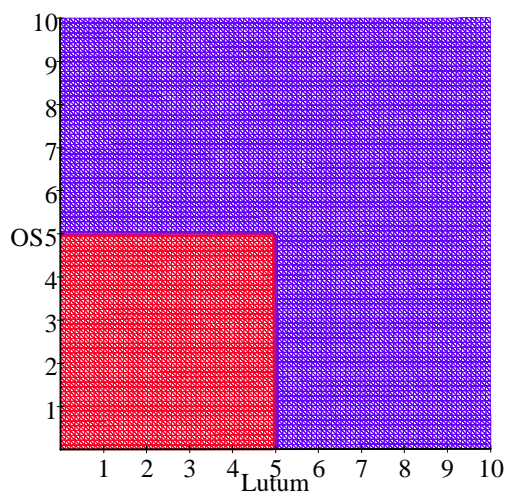


Figure 3.3: Eenvoudig voorbeeld van een beslisboom als representatie van een geschiktheidsmodel

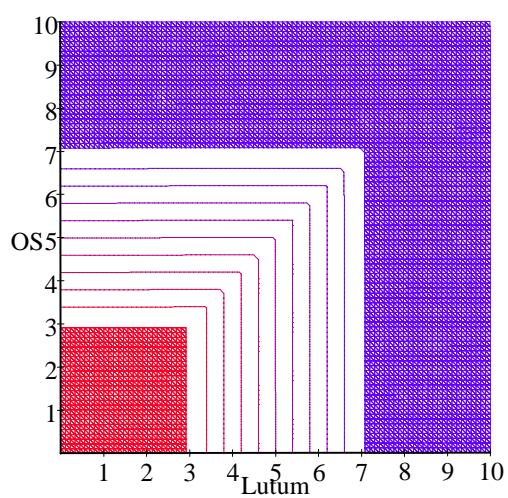
Als rule base kan het model als volgt worden geformuleerd:

if	LUTUMGEHALTE	is	Laag	AND	
	ORGANISCHESTOFGEHALTE	is	Laag		
then	GESCHIKTHEID	is	Goed		
if	LUTUMGEHALTE	is	Laag	AND	(3.1)
	ORGANISCHESTOFGEHALTE	is	Hoog	OR	
	LUTUMGEHALTE	is	Hoog		
then	GESCHIKTHEID	is	Slecht		

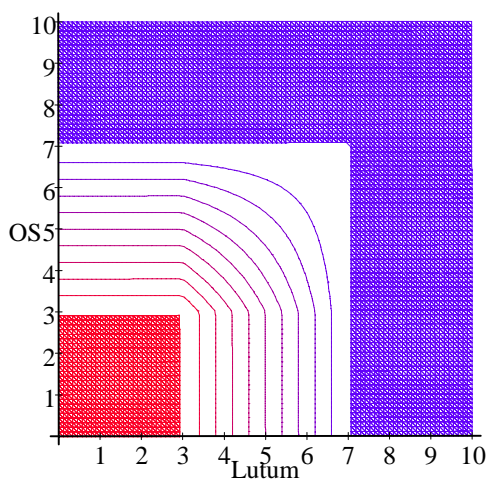
De tweede regel hierin, met de conclusie 'GESCHIKTHEID is Slecht', kan ook



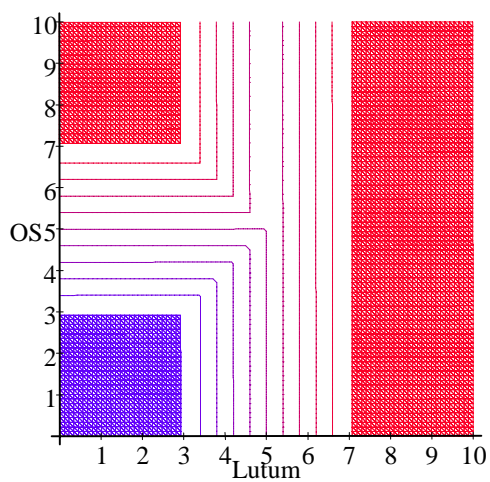
A. Harde klassen 'Goed' en 'Slecht'



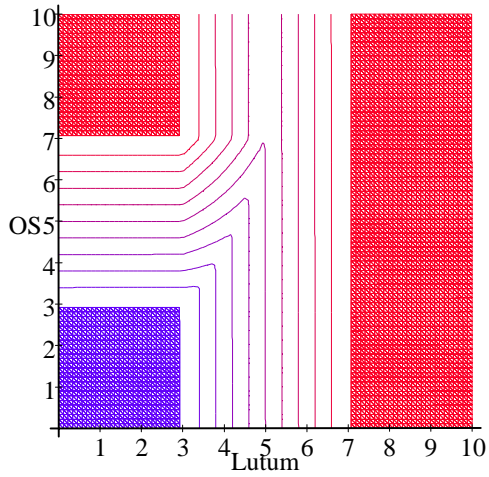
B. Zachte klasse 'Goed', Min operator



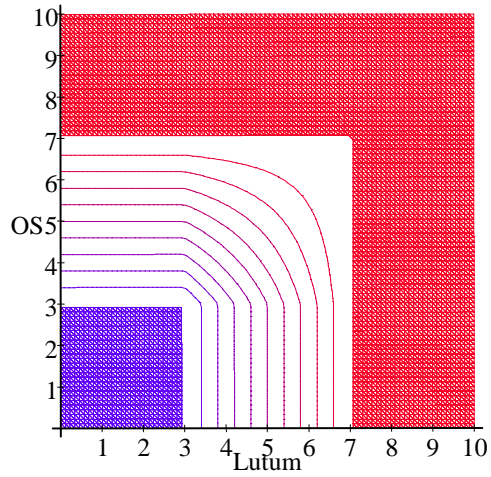
C. Zachte klasse 'Goed', Produkt oper.



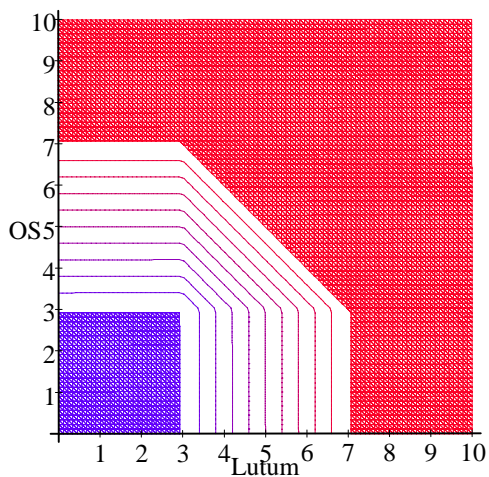
D. Zacht 'Slecht', Max en Min



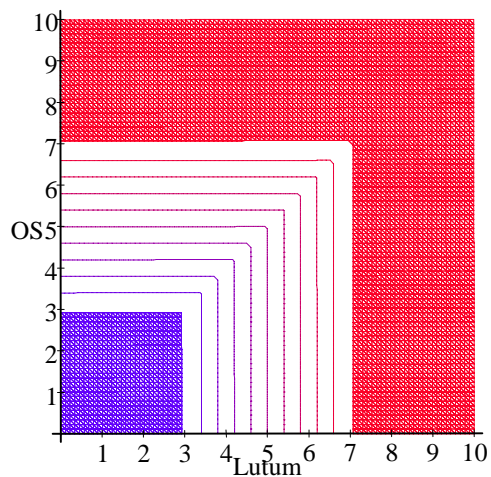
E. Zacht 'Slecht', Max en Produkt



F. Zacht 'Slecht', Som en Produkt



G. Zacht 'Slecht', Som en Min



H. Zacht 'Slecht', Max

Figure 3.4: A: Harde klassen 'Goed'(rood) en 'Slecht'(blauw). B: Lidmaatschapgraad in zachte klasse 'Goed' (rood=1; blauw=0), berekend met Min operator. C: Idem, met Produkt operator. D: Lidmaatschapgraad in zachte klasse 'Slecht' (rood=1; blauw=0), berekend met Max en Min operator. E: Idem, met Max en Produkt. F: Idem, met Begrensde Som en Produkt. G: Idem, met Begrensde Som en Min. H: Idem, met Max.

worden geformuleerd als:

if	ORGANISCHESTOFGEHALTE	is	Laag	AND	
	LUTUMGEHALTE		is	Hoog	OR
	ORGANISCHESTOFGEHALTE	is	Hoog		
then	GESCHIKTHEID	is	Slecht		

(3.2)

of als:

if	LUTUMGEHALTE	is	Hoog	OR	
	ORGANISCHESTOFGEHALTE	is	Hoog		
then	GESCHIKTHEID	is	Slecht		

(3.3)

Zolang het model hard is stellen in deze rule base AND en OR de klassieke (Booleaanse) operatoren voor, maar als we het model zacht maken (fuzzifiëren) dan komen daar de zachte operatoren Min, Max, Begrensde Som en/of Produkt voor in de plaats. Gebruiken we bijvoorbeeld Min voor AND, dan wordt volgens de eerste regel van de rule base de lidmaatschapgraad in de vage klasse Goed van GESCHIKTHEID berekend volgens:

$$\mu_{GH,Goed} = \min(\mu_{LU,Laag}, \mu_{OS,Laag}) \quad (3.4)$$

waarin $\mu_{LU,Laag}$ en $\mu_{OS,Laag}$ de lidmaatschapgraden zijn in de klasse Laag van LUTUMGEHALTE, resp. ORGANISCHESTOFGEHALTE.

Als we voor $\mu_{LU,Laag}$ en $\mu_{OS,Laag}$ een links-open stuksgewijs lineaire functie kiezen, met het oversteekpunt bij 5 % en links en rechts daarvan 2 % grenszone, dan zien de contourlijnen van de lidmaatschapgraad $\mu_{GH,Goed}$, berekend volgens Verg. (3.4), eruit als in figuur 3.4-B.

Wanneer we daarentegen voor AND de Produkt operator in plaats van de Min operator gebruiken, dan wordt de lidmaatschapgraad in klasse 'Goed' berekend volgens:

$$\mu_{GH,Goed} = \mu_{LU,Laag} \cdot \mu_{OS,Laag} \quad (3.5)$$

en ontstaat het beeld in figuur 3.4-C.

Vergelijken we figuur 3.4-B met figuur 3.4-C, dan zien we dat bij toepassing van de Min operator de contourlijnen rechte hoeken vertonen, die verdwijnen als we de Produkt operator gebruiken. Een belangrijk verschil is verder dat bij de Min operator de lidmaatschapgraad langs de voormalige harde grenzen bij 5 % een constante waarde van 0,5 heeft, terwijl die bij de Produkt operator in de richting van het grenshoekpunt (5 % LUTUMGEHALTE, 5 % ORGANISCHESTOFGEHALTE) geleidelijk afneemt tot 0,25. Met name dit laatste pleit voor de Produkt operator, omdat het grenshoekpunt dichter bij het centrum van de klasse Slecht ligt

Table 3.1: Formules voor de lidmaatschapgraad in de vage geschiktheidsklasse 'Slecht', voor verschillende combinaties van fuzzy rules en operatoren.

Regel	OR	AND	Formule voor $\mu_{GH,Slecht}$	Figuur
(3.1)	Max	Min	$\text{Max}(\text{Min}(\mu_{LU,Laag}, \mu_{OS,Hoog}), \mu_{LU,Hoog})$	3.4-D
(3.1)	Max	Produkt	$\text{Max}((\mu_{LU,Laag} \cdot \mu_{OS,Hoog}), \mu_{LU,Hoog})$	3.4-E
(3.1)	Begr. Som ¹	Produkt	$\mu_{LU,Laag} \cdot \mu_{OS,Hoog} + \mu_{LU,Hoog}$	3.4-F
(3.1)	Begr. Som ¹	Min	$\text{Min}(\mu_{LU,Laag}, \mu_{OS,Hoog}) + \mu_{LU,Hoog}$	3.4-G
(3.2)	Max	Min	$\text{Max}(\text{Min}(\mu_{OS,Laag}, \mu_{LU,Hoog}), \mu_{OS,Hoog})$	3.4-D ²
(3.2)	Max	Produkt	$\text{Max}((\mu_{OS,Laag} \cdot \mu_{LU,Hoog}), \mu_{OS,Hoog})$	3.4-E ²
(3.2)	Begr. Som ¹	Produkt	$\mu_{OS,Laag} \cdot \mu_{LU,Hoog} + \mu_{OS,Hoog}$	3.4-F
(3.2)	Begr. Som ¹	Min	$\text{Min}(\mu_{OS,Laag}, \mu_{LU,Hoog}) + \mu_{OS,Hoog}$	3.4-G
(3.3)	Max		$\text{Max}(\mu_{LU,Hoog}, \mu_{OS,Hoog})$	3.4-H
(3.3)	Begr. Som		$\text{Min}((\mu_{LU,Hoog} + \mu_{OS,Hoog}), 1)$	3.4-G ³

¹) De begrenzing tot maximaal 1 is in deze constellatie overbodig, en is daarom niet in de formule verwerkt.

²) Gespiegeld t.o.v. de 45 graden lijn.

³) Er kan worden bewezen dat de Begrensd Som operator hetzelfde oplevert als de combinatie van de Begrensd Som en de Min operator.

(grotendeels is omgeven door situaties die als Slecht zijn beoordeeld) dan bij het centrum van de klasse Goed.

De lidmaatschapgraad in de GESCHIKTHEID klasse Slecht kan op meer dan twee manieren worden berekend, omdat niet alleen twee operatoren in aanmerking komen voor zowel AND als OR, maar ook omdat het verschil maakt van welke regel we uitgaan, die van (3.1), (3.2) of (3.3). Als we de diverse opties met elkaar combineren dan krijgen we de formules in tabel 3.1.

Figuur 3.4-D laat duidelijk zien dat de combinatie van Max en Min, toegepast op regel (3.1) voor OR en AND, het al eerder gesignaleerde dip-effect veroorzaakt. De dip heeft hier de vorm van een geul die het gebied met lidmaatschapgraad 1 doorsnijdt. Deze geul maakt bovendien de lidmaatschapfunctie asymmetrisch t.o.v. de 45° lijn. Zowel het dip-effect als de asymmetrie moeten worden beschouwd als artefacten die het gevolg zijn van de modellering en niet voortvloeien uit de a priori kennis waarvan in dit voorbeeld wordt uitgegaan. Bij de combinatie Max en Produkt, toegepast op regel (3.1), treden dezelfde verschijnselen op zoals te zien in Fig 3.4-E, hoewel de geul een iets andere vorm heeft.

De operator combinatie Begrensd Som en Produkt, toegepast op regel (3.1), levert het symmetrische patroon op van figuur 3.4-F. De figuur laat zien dat de klasse Slecht, op deze manier gedefinieerd, het complement is van de klasse Goed zoals gedefinieerd met de Produkt operator (zie figuur 3.4-C). Er kan hierbij nog worden opgemerkt dat de begrenzing van de lidmaatschapgraden tot maximaal 1 in deze situatie overbodig is, omdat de gewone som niet groter kan worden dan

1. De Begrensde Som in combinatie met de Min operator levert het patroon in figuur 3.4-G. Dit patroon is weliswaar symmetrisch, maar het is niet het complement van een van de twee patronen van de klasse Goed in figuur 3.4-B en 3.4-C. Ongewenst is verder dat het grenshoekpunt (5 % LUTUMGEHALTE, 5 % ORGANISCHESTOFGEHALTE) met lidmaatschapgraad 1 geheel tot de klasse Slecht wordt gerekend.

Uitgaan van regel (3.2) levert bij alle operator combinaties hetzelfde op als regel (3.1), behalve dat de asymmetrische patronen worden gespiegeld. Als we daarentegen regel (3.3) als uitgangspunt nemen en daar de Max operator op toepassen, dan ontstaat het patroon van figuur 3.4-H. Dit is het complement van het patroon van de klasse Goed, berekend met de Min operator (figuur 3.4-B). Toepassen van de Begrensde Som geeft het patroon van figuur 3.4-G, d.w.z. hetzelfde als de combinatie Begrensde Som en Min toegepast op regel (3.1) of (3.2).

Resumerend kunnen we stellen dat alle combinaties van operatoren en regels een of meer ongewenste effecten geven (dip-effect, asymmetrie, Goed en Slecht niet elkaars complement, inadequate behandeling van grenshoekpunten), behalve de combinatie Produkt en Begrensde Som met regel (3.1) of (3.2). We concluderen daarom dat de operatoren Produkt en Begrensde Som het meest geschikt zijn voor het soort toepassingen waar het hier om gaat, echter met dien verstande dat ze worden toegepast op regels van het type (3.1) of (3.2). Dit laatste houdt in dat de te fuzzifiëren regels zo zijn geformuleerd dat de harde klassen die met OR worden gecombineerd elkaar in de multivariate eigenschappenruimte niet overlappen, ofwel disjunct zijn. Dit klinkt als een ingewikkelde en onhandige beperking, maar bij nadere beschouwing is het dat niet. Als we namelijk de te fuzzifiëren regels formuleren aan de hand van een (meerdimensionale) geschiktheidstabel, dan stelt elke cel van de tabel een combinatie voor van harde klassen van de diverse predictoren. Deze combinaties overlappen elkaar niet, d.w.z. dat een element met gegeven eigenschappen maar in één cel thuis hoort. Als nu eerst elke cel wordt vertaald in een logische regel, dan is voor het combineren van de elementaire proposities alleen de AND operator nodig. Als vervolgens de regels die tot dezelfde conclusie (in dit geval: geschiktheid) leiden, worden gecombineerd met de OR operator, dan is ‘vanzelf’ voldaan aan de bovengenoemde eis van disjunctie. Hetzelfde geldt als we voor het formuleren van de regels uitgaan van een beslisboom in plaats van een tabel.

3.3. Kartering en kartografische weergave

Kartering van vage klassen kan in principe op dezelfde manieren plaatsvinden als harde klassen. We beschrijven in het kort de twee belangrijkste benaderingen: de klassieke en de geostatistische.

De klassieke aanpak van kartering houdt in dat eerst een bodemkaart wordt gemaakt en voor elk kaartvlak daarvan een z.g. representatief bodemprofiel wordt vastgesteld. Vervolgens wordt van elk representatief profiel de geschiktheid vastgesteld, en deze geschiktheid wordt van toepassing verklaard op het gehele kaartvlak. Bij deze methode (de gebruikelijke bij Alterra) vindt het ruimtelijk afgrenzen van de geschiktheidsklassen dus al plaats tijdens het maken van de bodemkaart in het veld, op grond van zowel visuele landschappelijke kenmerken als puntgegevens verkregen via boringen. In geval van vage klassen worden, in plaats van de ene geschiktheidsklasse van het representatieve profiel, de lidmaatschapgraden van alle onderscheiden klassen aan het kaartvlak toegewezen.

Bij de geostatistische methode wordt uitgegaan van de puntgegevens van de boringen. Eerst wordt van elke boring de geschiktheidsklasse vastgesteld. Aangezien het resultaat een klasse-label is en geen getal waarmee kan worden gerekend, wordt de toegekende klasse omgezet in een reeks indicator-variabelen (één voor elke klasse van het classificatiesysteem), met de waarde 1 als de boring tot de betreffende klasse behoort, en 0 als hij er niet toe behoort. Bijvoorbeeld: als er vier harde geschiktheidsklassen **A**, **B**, **C** en **D** zijn gedefinieerd, dan worden vier indicator-variabelen gevormd: I_A, I_B, I_C en I_D . Als aan een bepaalde boring klasse **B** is toegekend, dan zijn voor die boring de waarden van deze indicator-variabelen: $I_A=0, I_B=1, I_C=0$ en $I_D=0$. Met behulp van een geostatistische methode, bijv. multiple indicatorkriging, kunnen nu de nullen en enen op de boorpunten voor elk van de indicator-variabelen ruimtelijk worden geïnterpoleerd naar een fijnmazig rooster. Aan elk roosterpunt wordt tenslotte de klasse worden toegekend waarvan de geïnterpoleerde indicator-waarde het hoogste is. In geval van vage klassen verloopt de geostatistische methode op ongeveer dezelfde wijze, echter in plaats van de nullen en enen van de indicator-variabelen worden nu de lidmaatschapgraden geïnterpoleerd³.

Wanneer eenmaal de ruimtelijke verdelingen van de lidmaatschapgraden in de geschiktheidsklassen in een GIS zijn vastgelegd, kunnen die op diverse manieren worden gevisualiseerd; op papier in de vorm van een of meer kaarten of op het

³Zie De Gruijter et al. (1998) en Walvoort en De Gruijter (2001) voor een geostatistische interpolatiemethode, Compositional Kriging, die op elk roosterpunt de nauwkeurigste schattingen van de indicator-variabelen levert, onder de voorwaarden dat de schattingen niet negatief zijn, en per roosterpunt optellen tot 1.

beeldscherm. Over de methodiek van dergelijk visualisatie bestaat al vrij veel GIS- en kartografische literatuur. Jiang (1996) geeft een uitgebreid overzicht van visualisatie methoden, en deed ook een empirisch onderzoek naar de perceptie-eigenschappen van verschillende visualisaties. Het spreekt vanzelf dat kleur in dit verband een zeer belangrijk hulpmiddel is. Jiang (1996) ontwierp een aangepast kleursysteem, met 3 onafhankelijke dimensies: ‘hue’, ‘saturation’ en ‘lightness’. Hij stelt voor de dimensie ‘hue’ te gebruiken om de klassen aan te geven (kwalitatief), en de andere twee dimensies voor de mate van onzekerheid (kwantitatief).

Men kan voor elke klasse een aparte kaart maken en daarbij verschillende kleuren of tinten gebruiken om de lidmaatschapgraad in de betreffende klasse aan te geven, of één kaart voor alle klassen tegelijk, met verschillende kleuren voor combinaties van lidmaatschapgraden. In het laatste geval kan het aantal verschillende kleuren worden beperkt door de classificatie eerst te defuzzifiëren. Daarbij worden harde klassen gedefinieerd op basis van de berekende lidmaatschapgraden. Bijvoorbeeld, alle punten met lidmaatschapgraad $> 0,8$ in zachte klasse **A** vormen de harde centrale klasse **A**, en alle punten met lidmaatschapgraad $> 0,4$ in de zachte klassen **A** en **B** vormen de harde overgangsklasse **AB**. Een intuïtief kleurschema kent dan aan **AB** een mengkleur toe tussen de basiskleuren voor **A** en **B**.

Een visualisatiemethode die het continue karakter van de classificatie beter bewaart dan bij defuzzifiëren, is voorgesteld door de Gruijter et al. (1997). Volgens die methode wordt het gebied verdeeld in een groot aantal kleine cellen, met daarbinnen een fijnmazig rooster van bijvoorbeeld $10 \times 10 = 100$ pixels. Aan de pixels binnen een cel worden kleuren toegewezen die corresponderen met de onderscheiden klassen, zodanig dat de pixels met eenzelfde kleur zo goed mogelijk over de cel worden verspreid, en de verhoudingen van de kleuren overeenkomen met de lidmaatschapgraden welke voor die cel zijn berekend. Als bijvoorbeeld een cel lidmaatschapgraad $0,35$ heeft in klasse **A** en $0,65$ in klasse **B**, en aan **A** en **B** zijn de kleuren blauw, resp. groen toegekend, dan worden verspreid over die cel 35 pixels blauw gekleurd en 65 groen (bij een resolutie van 100 pixels per cel). In principe kunnen op deze manier geleidelijke overgangen tussen meerdere klassen tegelijk in beeld worden gebracht. Zie de Gruijter et al. (1997) voor een toepassing.

4. GENERALISATIE VAN TWEewaARDIGE NAAR MEERwaARDIGE LOGICA IN HET LANDEVALUTIESYSTEEM BODEGA

4.1. Het harde geschiktheidsmodel in BODEGA

Voor een bespreking van het bestaande harde geschiktheidsmodel in BODEGA wordt verwezen naar Boogaard en Kiestra (1999); voor de gebruikershandleiding naar Boogaard en Otjens (2000). Hier kan worden volstaan met een bespreking van het harde submodel voor grasland, omdat de zachte modellering alleen voor dat landgebruik is uitgewerkt.

De volgende beoordelingsfactoren worden gebruikt om de geschiktheid van gronden voor de landgebruiksvorm weidebouw te beoordelen:

- ontwateringstoestand
- stevigheid bovengrond
- vochtleverend vermogen

Deze beoordelingsfactoren worden in de volgende paragrafen toegelicht. Het accent ligt op de beoordelingsfactor stevigheid van de bovengrond omdat deze beoordelingsfactor wordt gebruikt om het zachte model toe te lichten.

4.1.1. Stevigheid van de bovengrond

De stevigheid van de bovengrond geeft een aanduiding van het weerstandsvermogen van de grond tegen de belasting, die optreedt bij het beweiden door vee en het berijden met landbouwmachines. Onvoldoende stevigheid van de bovengrond heeft de volgende nadelen:

- uitrijden van mest in het voorjaar wordt belemmerd;
- bij beweiding gaat gras verloren door vertrapping;

- bedrijfsmanagement wordt belemmerd (niet op tijd uitvoeren van werkzaamheden of werkzaamheden worden uitgevoerd met als gevolg spoorvorming, vernieling van de graszode etc.).

In de kennis-versie 1.0 van BODEGA 2.1/1.0 wordt de stevigheid van de bovengrond bepaald door:

- gemiddelde hoogste grondwaterstand (GHG);
- organischestofgehalte van de bovenste horizont;
- textuur (lutum- en leemgehalte) van de bovenste horizont.

De stevigheid van de bovengrond heeft de volgende gradaties:

gradatie 1 = zeer groot

gradatie 2 = vrij groot

gradatie 3 = vrij gering

Figuur 4.1 geeft het harde submodel voor stevigheid bovengrond weer als beslisboom

4.1.2. Ontwateringstoestand

De ontwateringstoestand geeft een indicatie voor de kwaliteit van de luchthuishouding in de bodem: de mate waarin de poriën in het bovenste deel van de bodem (0 tot 50 à 100 cm) met lucht gevuld zijn en van de wijzigingen die zich in de loop van het jaar voordoen. De luchthuishouding in de bodem is o.a. belangrijk voor:

- wortelgroei en wortelactiviteit
- microbiologische processen (slechte aëratie zoals op natte gronden remt de stikstofmineralisatie)
- bodemtemperatuur in het voorjaar (natte gronden hebben een tragere start, een korter weideseizoen etc.)
- flexibiliteit in het bewerken van de grond (drogere gronden geven meer armslag in de voor- en najaarswerkzaamheden)

In de kennis-versie 1.0 van BODEGA wordt de ontwateringstoestand bepaald door:

- gemiddelde hoogste grondwaterstand (GHG)

- grondsoort

De volgende gradaties zijn onderscheiden:

- gradatie 1 = zeer diep
- gradatie 2 = vrij diep
- gradatie 3 = matig diep
- gradatie 4 = vrij ondiep
- gradatie 5 = zeer ondiep

4.1.3. Vochtleverend vermogen

Het vochtleverend vermogen is de hoeveelheid vocht die in een groeiseizoen van 150 dagen (1 april - 1 september) en in een 10 % droogtejaar aan de plantewortel kan worden geleverd. De grootte ervan wordt bepaald door de hoeveelheid beschikbaar vocht in de effectieve bewortelingsdiepte plus de hoeveelheid vocht die vanuit de ondergrond aan de effectieve bewortelingsdiepte kan worden geleverd. Gewassen in Nederland zijn op het vochtleverend vermogen van de bodem aangewezen omdat in het groeiseizoen de verdamping de neerslag overtreft. Eens in de 10 jaar is dit neerslagtekort in De Bilt voor een gras-achtig gewas ruim 200 mm. In veel gevallen is de bodemvoorraad ontoereikend om in dit tekort te voorzien. Vooral op zandgronden en/of gronden met diepe grondwaterstanden komt droogte-gevoeligheid voor. Dit heeft opbrengstvermindering tot gevolg of extra kosten voor irrigatie.

In de kennis-versie 1.0 van BODEGA wordt het vochtleverend vermogen bepaald door:

- vochthoudend vermogen van de effectieve bewortelingsdiepte
- gemiddelde hoogste grondwaterstand (GHG)
- gemiddelde laagste grondwaterstand (GLG)
- effectieve bewortelingsdiepte
- kritieke stijghoogte bij 2 mm per dag capillaire nalevering
- grondsoort.

De volgende gradaties zijn onderscheiden:

- gradatie 1 = zeer groot (≥ 200 mm)
- gradatie 2 = vrij groot (150 - 200 mm)
- gradatie 3 = matig (100 - 150 mm)
- gradatie 4 = vrij gering (50 - 100 mm)
- gradatie 5 = zeer gering (< 50 mm)

Table 4.1: Beschrijving geschiktheidsclassificatie weidebouw

1	Gronden met ruime mogelijkheden
1.1	Hoge bruto productie; weinig beweidingsverliezen; goed berijdbaar
1.2	Hoge bruto productie; weinig beweidingsverliezen, behalve in natte jaren; enigszins beperkt berijdbaar
1.3	Hoge bruto productie, behalve in droge jaren; weinig beweidingsverliezen; goed berijdbaar
1.4	Hoge bruto productie, behalve in droge jaren; weinig beweidingsverliezen, behalve in natte jaren; enigszins beperkt berijdbaar
2	Gronden met beperkte mogelijkheden
2.1	Hoge bruto productie; matige beweidingsverliezen; beperkt berijdbaar
2.2	Matige bruto productie in droge jaren; weinig beweidingsverliezen; goed berijdbaar
2.3	Matige bruto productie in droge jaren; matige beweidingsverliezen in natte jaren; beperkt berijdbaar
3	Gronden met weinig mogelijkheden
3.1	Matige of hoge bruto productie; grote beweidingsverliezen; zeer beperkt berijdbaar
3.2	Lage of matige bruto productie; weinig beweidingsverliezen; goed berijdbaar

4.1.4. Geschiktheid voor weidebouw

De geschiktheidclassificatie kent in de praktijk twee niveaus: een hoofd- en middenklasse. De hoofdklasse is onderscheiden naar gronden met ruime, beperkte en weinig mogelijkheden, gespiegeld aan een bepaald landgebruik. De middenklasse is een verdere verfijning van elke hoofdklasse waarbij het soort beperkingen voor het landgebruik de verdere verfijning bepalen. De middenklassen en hoofdklassen van de geschiktheidclassificaties akker-, weide-, resp. tuinbouw hebben elk een kwalitatieve beschrijving (ten Cate et al., 1995). De beschrijving van de geschiktheidsklassen voor weidebouw is gegeven in tabel 4.1.

4.2. Een zacht geschiktheidsmodel voor BODEGA

Op grond van de exploratie in hoofdstuk 3 concluderen we dat als besloten zou worden het bestaande harde geschiktheidsmodel in BODEGA te fuzzifiëren, d.w.z. de tweewaardige logica te generaliseren naar een meerwaardige, dat het beste kan

worden gedaan aan de hand van de volgende keuzen.

- Alle bestaande harde klassen van de predictoren fuzzifiëren met stuksgewijs lineaire lidmaatschapsfuncties, waarbij de oversteekpunten worden gelegd bij de bestaande grenzen. De breedten van de grenszones kunnen per klasse verschillen, maar moeten gelijk zijn voor elk tweetal aangrenzende klassen, en zijn bij voorkeur door de gebruiker als modelparameters in te stellen. Zie § 3.1 voor de argumentatie.
- Toepassen van de Product operator voor de AND conjunctie, en de Begrensde Som operator voor de OR conjunctie van de elementaire proposities in de beslisregels. Zie § 3.2 voor de argumentatie.
- De beslisregels zò formuleren dat de proposities slechts betrekking hebben op niet-overlappende (disjuncte) klassen, d.w.z. regels van het type (3.1) of (3.2) in het voorbeeld van § 3.2. Dit kan eenvoudig worden gerealiseerd door de beslisregels af te leiden van de bestaande beslisbomen. Daarbij wordt in eerste instantie elke tak vertaald in een regel. (Dit is goed uitvoerbaar; de grootste bestaande beslisboom in BODEGA (geschiktheid voor akkerbouw) heeft 76 takken.) De regels die tot dezelfde conclusie, i.c. geschiktheid, leiden worden vervolgens gecombineerd met de Begrensde Som operator. In § 3.2 is al aangegeven dat de begrenzing tot maximum 1 in deze situatie overbodig is.

Opgemerkt wordt dat van de bestaande predictoren er één is die niet op de hiervoor aangegeven wijze kan worden gefuzzifieerd, n.l. de kwalitatieve variabele **Bodemtype**. We stellen voor de klassen van deze variabele vooralsnog hard te laten, aangezien zij zijn gedefinieerd in termen van een groot aantal primaire bodemvariabelen en fuzzifiëren daarom in dit stadium onevenredig veel tijd en moeite zou kosten.

Het zachte BODEGA model kan het beste worden toegepast op bodemgegevens door gebruik te maken van de bestaande tweetrapsstructuur: eerst gradaties van beoordelingsfactoren afleiden uit de primaire eigenschappen, vervolgens voor een bepaald bodemgebruik de geschiktheid afleiden uit de gradaties. Dit houdt in dat in de eerste trap de lidmaatschapsgraden in alle gradaties worden berekend uit de gegevens van een bodem. In de tweede trap worden dan de lidmaatschapsgraden in alle geschiktheidsklassen van het betreffende bodemgebruik berekend uit de lidmaatschapsgraden van de eerste trap. De efficiëntie van deze werkwijze is gelegen in het feit dat de gradaties niet afhangen van het bodemgebruik.

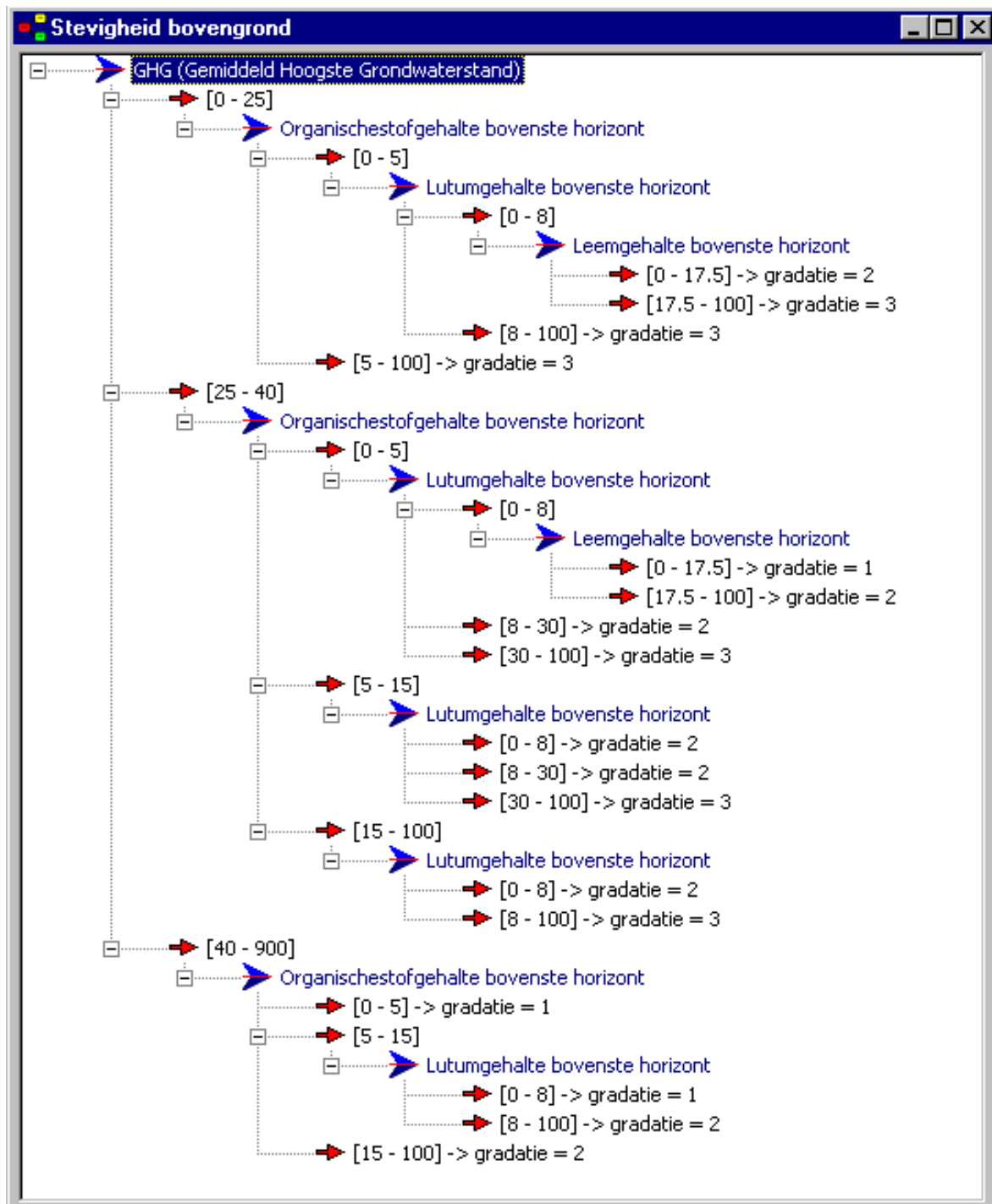


Figure 4.1: Het harde submodel voor stevigheid bovengrond, weergegeven als beslissingsboom.

5. TOEPASSING: GESCHIKTHEID VOOR WEIDEBOUW IN NOORD-BRABANT

5.1. Inleiding

Dit hoofdstuk beschrijft een toepassing waarin het harde geschiktheidsmodel in BODEGA wordt vergeleken met een zacht model. Daarvoor is een studiegebied gekozen in Noord-Brabant. Voor dit studiegebied is de geschiktheid voor weidebouw en de gradaties voor de onderliggende beoordelingsfactoren (ontwatering, stevigheid bovengrond en vochtleverend vermogen) bepaald volgens beide modellen. Het harde geschiktheidsmodel is reeds beschreven in § 4.1; de uitgangspunten voor het zachte model zijn besproken in § 4.2.

5.2. Beschrijving studiegebied

Het studiegebied ligt grofweg ten noorden van de lijn Breda-Tilburg en wordt in het noorden begrensd door de rivier de Maas. De verdeling van het areaal over verschillende groepen gronden is grofweg:

- 40 % zandgronden in het zuiden en zuidoosten van het gebied (plateau);
- 5 % veen- en moerige gronden geïsoleerd in het midden en westen van het gebied (beekdalen, marien, depressies);
- 12 % rivierklei in het noordoosten van het gebied (ten noorden van de Bergse Maas);
- 17 % mariene klei in het noordwesten en midden (ten westen van Waalwijk, rondom de Maas) van het gebied.

Een meer gedetailleerde verdeling van de gronden is gegeven in tabel 5.1. De ruimtelijke verspreiding is weergegeven in de kaart van aanhangsel C.

Table 5.1: Gronden in het studiegebied in Brabant.

Gronden	Hoofdgroep	Areaal (ha)	Percentage
Podzolgronden	Zandgronden	16049	18,5
Enkeerdgronden	Zandgronden	9783	11,3
Gooreerdgronden	Zandgronden	2880	3,3
Beekeerdgronden	Zandgronden	1612	1,9
Overige zandgronden	Zandgronden	3437	4,0
Leemgronden	Zandgronden	278	0,3
Veengronden	Organischestof rijke gronden	2277	2,6
Moerige gronden	Organischestof rijke gronden	1964	2,3
Rivierklei	Fluviatiele kleigronden	1397	1,6
Rivierkleigronden - droog	Fluviatiele kleigronden	710	0,8
Rivierkleigronden - nat	Fluviatiele kleigronden	8804	10,1
Zeeklei	Mariene kleigronden	15101	7,4
Overslaggronden	Rest	590	0,7
Associaties	Rest	5167	6,0
Overig (steden, water etc.)	Niet ingedeeld	16768	19,2
Totaal		86817	100,0

5.3. Acquisitie van basisgegevens

In de zachte variant van BODEGA zoals ontwikkeld in S-plus (MathSoft, 1999) is de geschiktheidclassificatie voor weidebouw ingebouwd, inclusief de daarvoor benodigde beoordelingsfactoren ontwatering, stevigheid bovengrond en vochtleverend vermogen. Om deze geschiktheid te berekenen zijn verschillende gegevens over de bodem en het grondwater nodig. Deze basisgegevens zijn overgenomen uit de studie ‘Verkenning van bodemgeschiktheid ter identificatie van kansrijke gebieden voor de landbouwsector in Noord-Brabant’ (Van Diepen et al., in voorbereiding). Hieronder wordt beschreven hoe de gegevens zijn verzameld.

Voor 329 belangrijke eenheden (eenheden > 500 ha) van de Bodemkaart, schaal 1 : 50000 in Nederland zijn profielschetsen gemaakt (De Vries, 1999). Deze profielschetsen worden gebruikt om invoergegevens te genereren voor BODEGA. Alle overige kleinere eenheden van de eerder genoemde bodemkaart zijn op basis van verwantschap gekoppeld aan één van de 329 profielschetsen. De beschrijving geldt voor de bodemeenheid, dus los van de grondwatertrap.

Elk kaartvlak in Noord-Brabant wordt via een ArcInfo AML-procedure gekoppeld met één van de 329 profielschetsen. Van de 9244 kaartvlakken in Noord-Brabant hebben 8242 kaartvlakken een volledige beschrijving: zowel bodem als

grondwatertrap. De beschrijving betreft kenmerken zoals:

- textuur (per horizont)
- organischestofgehalte (per horizont)
- kalkgehalte (per horizont)
- GHG, GLG
- effectieve bewortelingsdiepte

Voor de huidige situatie zijn de grondwatertrappen vertaald in een GHG en GLG volgens de methode beschreven in aanhangsel B. Deze basisgegevens worden gebruikt om invoer te genereren voor de verschillende beoordelingsfactoren.

5.4. Berekeningen met het zachte model

Zoals aangegeven in § 3.1 en 4.2 zijn de breedten van de grenszones van de predictorklassen te beschouwen als vrij te kiezen parameters van het zachte geschiktheidsmodel. De parameterwaarden die voor deze toepassing zijn gekozen, worden vermeld in tabel 5.2. Bij reguliere toepassingen behoren deze parameterwaarden door experts te worden vastgesteld. In dit geval is dat niet gebeurd. Weliswaar is getracht min of meer realistische waarden te kiezen, maar deze dienen slechts voor demonstratie in deze case study.

De berekeningen zijn uitgevoerd met enkele voor dit doel geschreven programma's in de statistische programmeertaal S-Plus (MathSoft, 1999), welke zijn opgenomen in aanhangsel A:

- aanhangsel A.1: programma voor berekening van lidmaatschapgraden in de klassen van de predictoren GHG, Grondsoort, Organischestofgehalte, Lutumgehalte, Leemgehalte, Criterium hangwaterprofiel, Criterium grondwaterprofiel, Vochthoudend vermogen en Breekdag.
- aanhangsel A.2: programma voor berekening van lidmaatschapgraden in de gradaties van de beoordelingsfactoren Ontwateringstoestand, Stevigheid van de bovengrond en Vochtleverend vermogen.
- aanhangsel A.3: programma voor berekening van lidmaatschapgraden in de geschiktheidsklassen voor weidebouw, zoals gedefinieerd voor de toepassing in Noord Brabant.

Table 5.2: Halve breedten van de grenszones van de predictorclassen, toegepast in de case study.

Predictor	Oversteekpunt	Halve breedte grenszone
GHG	5	3
	15	3
	25	3
	40	5
	80	10
ORGANISCHESTOFGEHALTE	5	2
	15	3
LUTUMGEHALTE	8	3
	30	5
LEEMGEHALTE	17,5	2,5
CRITERIUM HANGWATER	0	10
CRITERIUM GRONDWATER	0	10
VOCHTHOUDEND VERMOGEN	50	4
	90	4
	100	4
	140	4
	150	4
	180	4
	190	4
	200	4
BREEKDAG	60	10
	105	10

5.5. Resultaten van het zachte model

Het zachte model geeft in grote lijnen hetzelfde beeld als het harde. Dit is een aanwijzing dat het concept klopt en de technische implementatie van het zachte model in S-plus geslaagd is.

De gronden met een stevige bovengrond (gradatie 'zeer groot') zijn over het algemeen de zandgronden en mariene zeeleiggronden. Op fluviatiele kleigronden (noordoosten) en verspreid liggende veen- en moerige gronden is de stevigheid 'vrij groot' of 'vrij gering'. De laatste categorie komt vooral voor in het hart van de fluviatiele kleigronden en de verspreid liggende veen- en moerige gronden.

Het zachte model geeft per gradatie een lidmaatschapgraad. In plaats van één waarde (gradatie 1, 2 of 3) zoals bij het harde model, geeft het zachte model dus

een verdeling van lidmaatschapgraden over de mogelijke gradaties. Hoe worden de resultaten van een zacht model nu gepresenteerd? Elke ruimtelijke eenheid (kaartvlak) heeft immers meerdere waarden, namelijk de lidmaatschapgraden in de gradaties ‘zeer groot’, ‘vrij groot’ en ‘vrij gering’.

In § 3.3 wordt besproken hoe **puntgegevens** grafisch kunnen worden weergegeven in een vlakdekkende kaart. Dit voorbeeld voor Noord-Brabant genereert gefuzzifieerde resultaten voor kaartvlakken van een bodemkaart. Er zijn verschillende mogelijkheden om de gefuzzifieerde resultaten voor kaartvlakken zichtbaar te maken.

- Alleen de lidmaatschapgraad presenteren van één van de klassen (methode 1). Dit geeft dus de ruimtelijke verspreiding van de lidmaatschapgraad in één specifieke klasse. Drie klassen, bijvoorbeeld, geven dus evenzoveel kaarten.
- De verdeling van de lidmaatschapgraden in alle klassen in één kaart integreren. Dit kan op ten minste twee manieren.
 - Continue weergave (methode 2). Elke klasse krijgt een basiskleur. Vervolgens wordt de waarde voor ‘stevigheid van de bovengrond’ voor een kaartvlak gepresenteerd door eerst het kaartvlak onder te verdelen in een groot aantal pixels. Elke pixel kan één van de basiskleuren hebben maar de verdeling van de basiskleuren over de pixels binnen het kaartvlak moet overeenkomen met de verdeling van de lidmaatschapgraden over de verschillende klassen voor dit kaartvlak.
 - Discrete weergave (methode 3). Bij discrete weergave worden alsnog harde klassen gedefinieerd, maar dan zo dat grensgevallen herkenbaar blijven door die in aparte klassen onder te brengen. Voorbeeld van discretisering: bepaal van het te classificeren kaartvlak in welke klasse dit kaartvlak de hoogste lidmaatschapgraad heeft. Stel dat dat klasse X_z is. Als deze lidmaatschapgraad groter is dan bijvoorbeeld 0.8, deel het kaartvlak dan in bij de harde ‘zuivere’ klasse X_h . Als de lidmaatschapgraad kleiner is dan 0.8, deel het kaartvlak dan in bij de harde ‘grens’ klasse XY_h , waarbij Y de klasse is waarin het kaartvlak de op een na hoogste lidmaatschapgraad heeft. Bij het kiezen van een kleur voor de grensklasse XY_h wordt rekening gehouden met het feit dat het gaat om een overgang van X naar Y (verschillend van de overgang van Y naar X).

5.5.1. Resultaten per lidmaatschapgraad (methode 1)

In deze paragraaf worden als voorbeeld de resultaten voor de stevigheid van de bovengrond volgens methode 1 gepresenteerd. Aanhangsel D geeft de lidmaatschapgraad in gradatie 1 ('zeer groot'). Deze lidmaatschapgraad kan vergeleken worden met de legenda-eenheid gradatie 1 van het harde model. Kaartvlakken met een lidmaatschapgraad 1 in gradatie 1 komen overeen met de kaartvlakken die volgens het harde model de gradatie 1 hebben. Dit zijn vooral de zandgronden en de mariene kleigronden.

Daarnaast zijn er een aantal kaartvlakken die volgens het harde model de gradatie 1 hebben terwijl het zachte model daar een lidmaatschapgraad geeft die kleiner is dan 1. Dit betreft een oppervlaktepercentage van 6,1% (85,9–79,8; zie tabel 5.3). Deze kaartvlakken horen niet alleen tot gradatie 1 maar ook tot gradatie 2 ('vrij groot') of zelfs gradatie 3 ('vrij gering'). Overigens is het, door het gekozen concept, niet mogelijk dat het harde model de waarde 'zeer groot' aangeeft als het zachte model een lidmaatschapgraad van 0 aangeeft voor die gradatie. (De kaartvlakken met lidmaatschapgraad 0 in gradatie 1 zijn gesitueerd op fluviatiele gronden in het noordoosten, op veen- en moerige gronden ten zuiden van de Maas, en op enkele geïsoleerde plaatsen in het zandgebied).

Ter illustratie wordt één van de grensgevallen in het navolgende uitgelicht. In dit voorbeeld leidt het zachte model dus tot lidmaatschapgraden in verschillende gradaties. De mariene kleigrond (Mn25Av) heeft een lidmaatschapgraad van 0,85 in gradatie 1 ('zeer groot') en 0,15 in gradatie 2 ('vrij groot'). De verdeling over deze twee gradaties is het gevolg van het 'organischestofgehalte van de bovenste horizont', dat 3,6 % bedraagt (zie ook figuur 4.1). Deze waarde ligt links van het oversteekpunt 5 %, maar binnen de grenszone van 3 tot 7 % daaromheen (zie tabel 5.2 voor de grensparameters). Deze zone vormt via een stuksgewijs lineaire functie een geleidelijke overgang tussen de klasse 0 - 5 % links, en de klasse 5 - 15 % rechts daarvan. Invullen van de waarde 3,6 in de links-open functie (verg. 2.7) en de trapeziumfunctie (verg. 2.10) geeft een lidmaatschapgraad van respectievelijk 0,85 en 0,15.

De basiskennmerken GHG en het 'lutumgehalte van de bovenste horizont' hebben waarden van respectievelijk 80 cm - mv en 22 %. Deze waarden liggen niet binnen de halve grenszone-breedtes van de relevante oversteekpunten 40 cm - mv en 8 %.

De elementaire proposities zoals de lidmaatschapgraad in klasse 40-900 van de GHG en in klasse 0-5 % van 'organischestofgehalte van de bovenste horizont' worden in een fuzzy rule gecombineerd tot een lidmaatschapgraad in bijvoorbeeld de gradatie 'zeer groot'. Elke fuzzy rule is een route door de beslisboom (zie figuur 4.1). Als de operatoren Produkt en Begrensde Som worden toegepast zoals

Table 5.3: De voorkomende verdelingen van de lidmaatschapgraad in de gradaties voor Stevigheid Bovengrond en hun oppervlaktepercentages in het studiegebied in Brabant.

1: 'Zeer groot'	2: 'Vrij groot'	3: 'Vrij gering'	Percentage
Zacht model			
1,00	0,00	0,00	79,8
0,85	0,15	0,00	0,1
0,75	0,25	0,00	5,9
0,50	0,50	0,00	2,7
0,25	0,75	0,00	1,6
0,25	0,50	0,25	0,1
0,00	1,00	0,00	7,4
0,00	0,50	0,50	0,4
0,00	0,45	0,55	0,2
0,00	0,25	0,75	0,1
0,00	0,10	0,90	0,1
0,00	0,00	1,00	1,6
Hard model			
1,00	0,00	0,00	85,9
0,00	1,00	0,00	12,3
0,00	0,00	1,00	1,8

aangegeven in § 3.2, worden de verschillende lidmaatschapgraden in een fuzzy rule (route) eerst met elkaar vermenigvuldigd. Vervolgens worden de resultaten van fuzzy rules die tot dezelfde gradatie leiden gesommeerd, waarbij de som niet groter dan 1 mag zijn.

In het voorbeeld van de mariene kleigrond (Mn25Av) zijn er twee routes door de beslisboom waarbij alle lidmaatschapgraden in de route groter zijn dan 0 (figuur 5.1):

- de grond wordt via de klasse 0-5 % organischestof geclassificeerd en leidt tot gradatie 1 ('zeer groot');
- de grond wordt via de klasse 5-15 % organischestof geclassificeerd. Door het 'lutumgehalte van de bovenste horizont' van 22 % komt de grond in gradatie 2 ('vrij groot') terecht.

In beide routes zijn alle lidmaatschapgraden gelijk aan 1, behalve die van het 'organischestofgehalte van de bovenste horizont', die respectievelijk 0,85 en 0,15

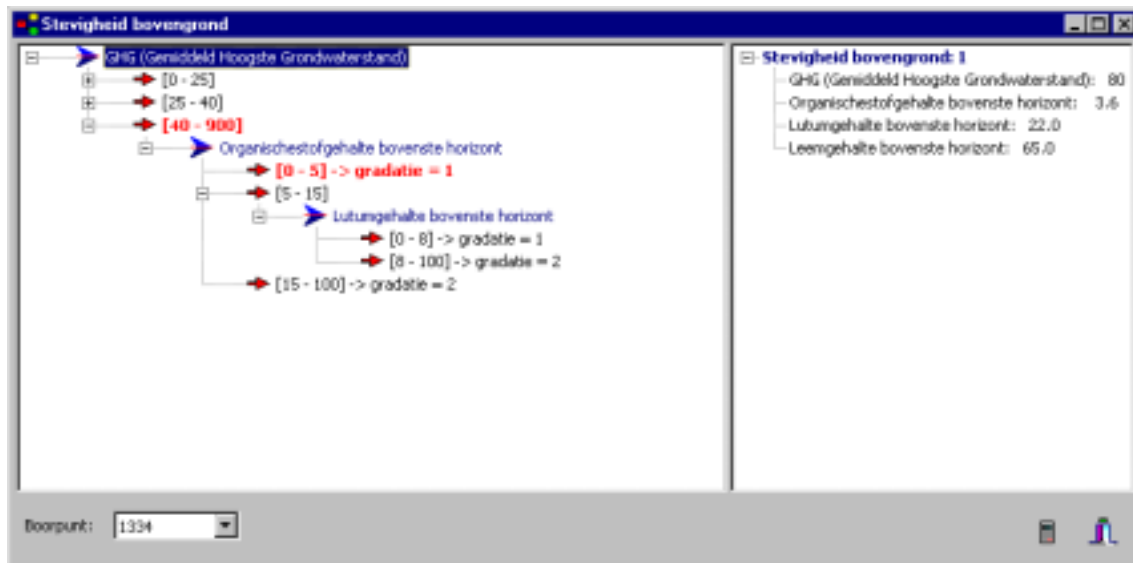


Figure 5.1: Stevigheid bovengrond van de mariene kleigrond (Mn25Av) volgens het harde model.

bedragen. De Produkt operator leidt dus voor beide routes tot respectievelijk de waarden 0,85 en 0,15. Alle andere routes hebben de waarde 0, omdat één van de lidmaatschapgraden in deze routes de waarde 0 heeft en de fuzzy rule met de Produkt operator wordt uitgevoerd. Wanneer tenslotte alle resultaten van de routes per gradatie gesommeerd worden met de Begrensde Som operator heeft gradatie 1 ('zeer groot') de waarde 0,85 en de gradatie 2 ('vrij groot') de waarde 0,15.

5.5.2. Discrete kartografische weergave van resultaten (methode 3)

De resultaten van het zachte model kunnen worden gedefuzzifieerd en dan integraal kartografisch worden weergegeven. De lidmaatschapgraden in de gradaties worden daartoe hard geclassificeerd, waarbij onderscheid wordt gemaakt tussen een hoge lidmaatschapgraad in een specifieke gradatie en overgangsklassen met een lidmaatschapgraad verspreid over meerdere gradaties. De aanhangsels E tot en met H geven een ruimtelijk beeld van de gedefuzzifieerde resultaten voor het studiegebied. De tabellen 5.4 tot en met 5.7 beschrijven de gedefuzzifieerde classificaties zoals gebruikt voor dit ruimtelijk beeld.

Table 5.4: Defuzzificatie van de zachte classificatie voor Stevigheid Bovengrond: nieuwe harde klassen gedefinieerd op basis van de lidmaatschapgraden in de zachte gradaties.

Klasse	‘Zeer groot’ (gradatie 1)	‘Vrij groot’ (gradatie 2)	‘Vrij gering’ (gradatie 3)
1: Gradatie 1	0,8 - 1		
2: Overgang gradatie 1 naar 2	0,5 - 0,8	> gradatie 3	
3: Overgang gradatie 2 naar 1	> gradatie 3	0,5 - 0,8	
4: Gradatie 2		0,8 - 1	
5: Overgang gradatie 2 naar 3		0,5 - 0,8	> gradatie 1
6: Overgang gradatie 3 naar 2		> gradatie 1	0,5 - 0,8
7: Gradatie 3			0,8 - 1

Stevigheid bovengrond

Aanhangsel E geeft aan welke kaartvlakken tot meerdere gradaties behoren. Voor deze kaartvlakken is het dus onduidelijk tot welke gradatie ze behoren. Het zijn voornamelijk kaartvlakken in het rivierkleigebied (noordoosten) die zowel tot gradatie 1 (‘zeer groot’) als gradatie 2 (‘vrij groot’) behoren, alhoewel ze een groter lidmaatschapgraad hebben in gradatie 1. De lidmaatschapgraad in beide gradaties wordt veroorzaakt door het organischestofgehalte van deze gronden die 4 en 5 % bedraagt. Deze waarden liggen links van en op het oversteekpunt 5 %, en binnen de grenszone van 3 tot 7 % daaromheen (zie tabel 5.2 voor de grensparameters). Een klein aantal kaartvlakken bevinden zich volgens het zachte model tussen gradatie 2 en 3 (dichterbij gradatie 3) terwijl het harde model gradatie 2 geeft. Het zijn gronden met veel lutum of organischestof ten noorden van Breda met een GHG- waarden van 25 en 40 cm. Beiden GHG-waarden liggen exact op een oversteekpunt.

Ontwateringstoestand

Een relatief groot oppervlak van het gebied valt in een overgangszone tussen gradatie 1 (‘zeer diep’) naar 2 (‘vrij diep’) waarbij de lidmaatschapsgraad in gradatie 1 en 2 even groot is, namelijk 0,5 (zie aanhangsel F). Dit zijn gronden met een GHG van 80 cm beneden mv. Deze waarde is een oversteekpunt in de beslisboom voor ontwateringstoestand (zie figuur 5.2).

Daarnaast vallen een aantal kaartvlakken op die volgens het harde model tot gradatie 3 (‘matig diep’) behoren, terwijl het zachte model aangeeft dat deze kaartvlakken lid zijn van gradatie 3 en 4. Deze gronden hebben een GHG van 25 cm, hetgeen ook een oversteekpunt is in de beslisboom.

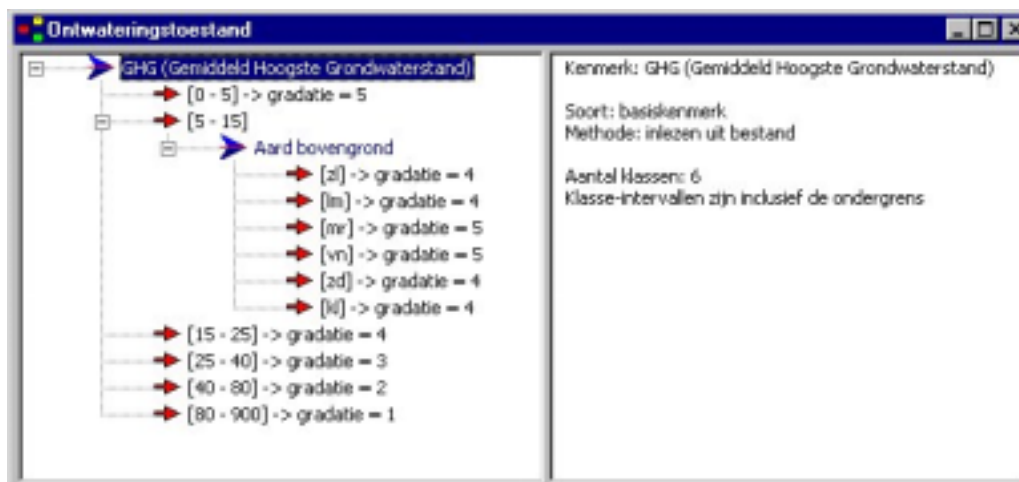


Figure 5.2: Beslisboom ontwateringstoestand volgens het harde model.

Table 5.5: Defuzzificatie van de zachte classificatie voor Ontwateringstoestand: nieuwe harde klassen gedefinieerd op basis van de lidmaatschapgraden in de zachte gradaties.

Klasse	Zeep diep gradatie 1	Vrij diep gradatie 2	Matig diep gradatie 3	Vrij ondiep gradatie 4	Zeep ondiep gradatie 5
1: gradatie 1	0,8-1				
2: overgang 1>2	0,5-0,8	> gradatie 3, 4 en 5			
3: gradatie 2		0,8-1			
4: overgang 2>3		0,5-0,8	> gradatie 1, 4 en 5		
5: gradatie 3			0,8-1		
6: overgang 3>4			0,5-0,8	> gradatie 1, 2 en 5	
7: gradatie 4					0,8-1

Vochtleverend vermogen

Het harde model geeft voor het vochtleverend vermogen een divers beeld (aanhangel G). Alle 5 gradaties komen verspreid voor in het gebied. De meeste kaartvlakken behoren tot gradatie 4 ('vrij gering') of gradatie 5 ('zeep gering'). Dit zijn vooral gronden met een hangwaterprofiel en een vochthoudend vermogen van de effectieve bewortelingsdiepte dat minder dan 100 mm bedraagt. Dit zijn de hogere zandgronden en kleigronden met geringe capillaire opstijging. De

Table 5.6: Defuzzificatie van de zachte classificatie voor Vochtleverend Vermogen: nieuwe harde klassen gedefinieerd op basis van de lidmaatschapgraden in de zachte gradaties.

Klasse	Zeer groot grad. 1	Vrij groot grad. 2	Matig grad. 3	Vrij gering grad. 4	Zeer gering grad. 5
1: gradatie 1	0,8-1				
2: overgang 1>2	0,5-0,8	> grad. 3, 4 en 5			
3: overgang 2>1	> grad. 3, 4 en 5	0,5-0,8			
4: gradatie 2		0,8-1			
5: overgang 2>3		0,5-0,8	>grad. 1, 4 en 5		
6: overgang 3>2		>grad. 1, 4 en 5	0,5-0,8		
7: gradatie 3			0,8-1		
8: overgang 4>3			0,5-0,8	>grad. 1, 2 en 5	
9: overgang 4>3			>grad. 1, 2 en 5	0,5-0,8	
10: gradatie 4				0,8-1	
11: overgang 4>5				0,5-0,8	>grad. 1, 2 en 3
12: overgang 5>4				>grad. 1, 2 en 3	0,5-0,8
13: gradatie 5					0,8-1

gronden met een ‘zeer groot’ (gradatie 1) of ‘vrij groot’ (gradatie 2) vochtleverend vermogen liggen verspreid over het gebied. Dit zijn overwegend gronden met een grondwaterprofiel of een contactprofiel waarvan het contact met het grondwater pas aan het einde van het groeiseizoen wordt doorbroken. Dit betreft voornamelijk enkeerdgronden en moerige gronden. Tussen Tilburg en Waalwijk geeft het zachte model een aantal gronden die zich bevinden tussen gradatie 4 en 5. Dit zijn voornamelijk gronden met een hangwaterprofiel en een vochthoudend vermogen van 50 mm. Deze waarde voor het vochthoudend vermogen ligt op een oversteekpunt in de beslisboom voor het vochtleverend vermogen tussen gradatie 4 (> 50 mm) en 5 (< 50 mm). Tenslotte liggen een aantal kaartvlakken net op de grens tussen een hangwaterprofiel en een contactprofiel.

Geschiktheid voor weidebouw

Binnen elke hoofdklasse van geschiktheid zijn 3 tot 4 subklassen onderscheiden. Het opnemen van alle subklassen en bijbehorende overgangklassen in de gedefuzzifieerde classificatie leidt tot ongeveer 30 legenda-eenheden. In dit onderzoek is gekozen om de gedefuzzifieerde classificatie (tabel 5.7) en de ruimtelijke presentatie daarvan (aanhangsel H) te beperken tot de hoofdklassen. Het gevolg is dat een overgangklasse tussen gradaties voor één van de beoordelingsfactoren niet tot uiting hoeft te komen in een overgangklasse tussen hoofdklassen van geschiktheid, maar alleen kan leiden tot een overgangklasse tussen subklassen binnen een hoofdklasse. Tabel 5.8 geeft voor hoofdklasse 1 ('ruime mogelijkheden') de voorkomende verdelingen van de lidmaatschapgraad in de vier mogelijke subklassen van geschiktheid voor weidebouw. Het valt op dat een groot oppervlakte zowel een lidmaatschap heeft in subklasse 1.1 als in 1.3. Gronden met een lidmaatschap in subklasse 1.2 (weinig beweidingsverliezen, behalve in natte jaren) komen zeer weinig voor.

Opvallend is dat een overgang tussen hoofdklassen in aanhangsel H vooral terug te voeren is naar een overgang tussen gradaties van het vochtleverend vermogen. Dit komt overeen met het relatief zware gewicht dat is toegekend aan het vochtleverend vermogen in de afleiding van de geschiktheid voor weidebouw. Daarentegen is een overgang van gradatie 1 ('zeer diep') naar 2 ('vrij diep') bij ontwateringstoestand (aanhangsel F) niet meer te vinden in een overgang tussen hoofdklassen van geschiktheid. Gradatie 1 en 2 voor ontwateringstoestand wordt in de afleiding van de geschiktheid gelijk behandeld. In de geschiktheidclassificatie is dus een overgang tussen deze twee gradaties ook niet relevant.

Table 5.7: Defuzzificatie van de zachte classificatie voor Geschiktheid voor Weidebouw: nieuwe harde klassen gedefinieerd op basis van de lidmaatschapgraden in de zachte hoofdgeschiktheidklassen.

Klasse	Ruime mogelijkheden	Beperkte mogelijkheden	Weinig mogelijkheden	Zeer weinig mogelijkheden
1: Hoofdklasse 1	0,8-1			
2: Overgang 1>2	0,5-0,8	>grad. 3 en 4		
3: Overgang 2>1	>grad. 3 en 4	0,5-0,8		
4: Hoofdklasse 2		0,8-1		
5: Overgang 2>3		0,5-0,8	>grad. 1 en 4	
6: Overgang 3>2		>grad. 1 en 4	0,5-0,8	
7: Hoofdklasse 3			0,8-1	
8: Overgang 3>4			0,5-0,8	>grad. 1 en 4
9: Overgang 4>3			>grad. 1 en 4	0,5-0,8
10: Hoofdklasse 4				0,8-1
11: Hoofdklasse 1, 2 en 3	<0,5	<0,5	<0,5	

Table 5.8: Oppervlakte percentages van gronden met een lidmaatschapgraad >0 in een of meer van de zachte subklassen van hoofdklasse 1: 'Ruime mogelijkheden'.

Gedefuzzifieerde subklasse	Oppervlakte (%)
1: Subklasse 1.1	13
2: Overgang van subklasse 1.1 naar 1.3	14
3: Overgang van subklasse 1.3 naar 1.1	28
4: Lidmaatschap in subklasse 1.1, 1.2, 1.3 en 1.4	2
5: Subklasse 1.2	2
6: Overgang van subklasse 1.2 naar 1.4	1
7: Overgang van subklasse 1.4 naar 1.2	1
8: Subklasse 1.3	28
9: Ook lidmaatschap in andere hoofdklassen	11

6. CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

In allerlei verschillende studies op Alterra en daarbuiten worden gegevens via booleaanse beslisregels geclassificeerd om uitspraken te doen over een specifiek onderwerp. Daarbij wordt de ontwerp(st)er van deze regels gedwongen keuzes te maken bij welke waarden gegevens tot een andere klasse leiden. In veel gevallen zijn deze grenzen niet eenduidig aan te geven maar bestaat er een bandbreedte waarin deze grens zich bevindt. Door het toepassen van een zacht model kan deze onzekerheid integraal worden meegenomen.

Ten opzichte van het harde model past het zachte model beter in studies waarin kennisregels, gebaseerd op ervaring en deskundigheid, worden toegepast op gegevens. Dergelijke zachte kennis is eigenlijk ongeschikt om harde uitspraken te doen via een booleaanse classificatie. Zachte kennis in de vorm van ervaringsregels gaat gepaard met een bepaalde mate van een onzekerheid. Het zachte model biedt de mogelijkheid om deze onzekerheid mee te modelleren.

Bij de bepaling van de bodemgeschiktheid komt het regelmatig voor dat een bepaalde bodem via het harde model in een bepaalde klasse wordt ingedeeld terwijl uit de praktijk/ervaring volgt dat de bodem eigenlijk tot een andere klasse behoort. Vaak hebben deze bodems waarden die net op een grens in de classificatie liggen. Het zachte model nuanceert deze twijfelgevallen en laat ze beter tot hun recht komen.

Onze conclusies zijn:

1. Bestaande evaluatiesystemen, gebaseerd op beslistabellen, beslisbomen, of beslisregels, kunnen op eenvoudige en correcte wijze worden gefuzzifieerd door lidmaatschapgraden te berekenen met stuksgewijs lineaire lidmaatschapfuncties, en deze lidmaatschapgraden te combineren door optellen en vermenigvuldigen. Dit geldt ook voor het landevaluatiesysteem BODEGA.
2. Bodemgeschiktheidskaarten gebaseerd op een gefuzzifieerd landevaluatiesysteem tonen meer gedifferentieerde beoordelingen dan kaarten gebaseerd op een klassiek landevaluatiesysteem.
3. Een gefuzzifieerde, zachte vorm van BODEGA is te zien als een generalisatie van de oorspronkelijke harde vorm, in die zin dat de harde vorm een

bijzonder geval is van de zachte vorm. Als de gebruiker de breedten van alle klassegrenszones op nul stelt dan krijgt hij/zij het oorspronkelijke harde systeem weer terug.

4. Het fuzzifiëren van BODEGA opent de mogelijkheid om puntgegevens verkregen uit profielbeschrijvingen intensiever te gebruiken, door lidmaatschapsgraden in geschiktheidsklassen geostatistisch te interpoleren, daarbij eventueel gebruikmakend van hulpinformatie in de vorm van bodemgrenzen.
5. Het fuzzifiëren van BODEGA opent de mogelijkheid om, behalve de kwalitatieve geschiktheidsklassen, ook de kwantitatieve waarde van gronden te schatten op een meer objectieve en inzichtelijke wijze dan tot nu toe. Het zachte model dient daartoe te worden gecalibreerd op een reeks bodemprofielen met een vastgestelde waarde.
6. Het fuzzifiëren van BODEGA opent de mogelijkheid om nieuwe, voor de gebruiker wellicht meer behulpzame vormen van kartografische weergave te ontwikkelen.
7. Uit de ervaring met het fuzzifiëren van het weidebouw-gedeelte van BODEGA blijkt dat het programmeerwerk nodig om geheel BODEGA te fuzzifiëren niet meer dan enkele dagen hoeft te kosten. De programmeertaal S-plus bleek goed te voldoen.

Onze aanbevelingen zijn:

1. Een prototype BODEGA-fuzzy maken, met de mogelijkheid voor de gebruiker om de breedten van klassegrenszones interactief te kiezen.
2. In een landevaluatieproject BODEGA-fuzzy toepassen op profielgegevens en het geostatistisch interpoleren van lidmaatschapsgraden in geschiktheidsklassen uitproberen.
3. In een landevaluatieproject BODEGA-fuzzy toepassen, en daarbij samen met de opdrachtgever nieuwe kaartvormen uitproberen.
4. In een landevaluatieproject BODEGA-fuzzy toepassen, en daarbij kwantitatieve waardebepaling van gronden uitproberen via calibratie op een reeks van bodemprofielen.

BIBLIOGRAPHY

- [1] Boogaard, H.J. en Kiestra, E., 1999. Waarderen van gronden met BODEGA. Wageningen, DLO-Staring Centrum, Rapport 678.
- [2] Boogaard, H.J. en Otjens, A.J., 2000. Gebruikershandleiding BODEGA 2.1/1.0. Wageningen, Alterra, Research Instituut voor de Groene Ruimte. Alterra-rapport 008.
- [3] Burrough, P.A., 1989. Fuzzy mathematical methods for soil survey and land evaluation. *J. of Soil Science* 40: 477-492.
- [4] Burrough, P.A., MacMillan, R.A. and van Deursen, 1992. Fuzzy classification methods for determining land suitability from soil profile observations and topography. *J. of Soil Science* 43: 193-210.
- [5] de Gruijter, J.J., Walvoort, D.J.J. and van Gaans, P.F.M., 1997. Continuous soil maps - a fuzzy set approach to bridge the gap between aggregation levels of process and distribution models. *Geoderma* 77: 169-195.
- [6] de Vries, F., 1999. Karakterisering van Nederlandse gronden naar fysisch-chemische kenmerken. Wageningen, DLO-Staring Centrum, Rapport 654.
- [7] Dobermann, A. and Oberthur, T., 1997. Fuzzy mapping of soil fertility - a case study on irrigated riceland in the Philippines. *Geoderma* 77: 317-339.
- [8] Jiang, B., 1996. Fuzzy Overlay Analysis and Visualization in Geographic Information Systems. Doctoral thesis, University of Utrecht.
- [9] Lindskog, P., 1997. Fuzzy identification from a grey box modeling point of view. In: H. Hellendoorn and D. Driankov (Eds.), *Fuzzy model identification*. Springer, Berlin.
- [10] Marquardt, D.W., 1963. An algorithm for least squares estimation of nonlinear parameters. *Journal of the Society of Industrial and Applied Mathematics* 11: 431-441.

- [11] MathSoft, 1999. S-Plus 2000 Programmer's Guide. MatSoft, Inc. Seattle, Washington.
- [12] McNeill, D. and Freiburger, P., 1993. Fuzzy logic - The discovery of a revolutionary computer technology and how it is changing our world. Bookman Press, Melbourne.
- [13] Tang, H.J., Debaveye, J., Ruan, D. and Van Ranst, E., 1991. Land suitability classification based on fuzzy set theory. *Pedologie*, XLI-3: 277-290.
- [14] Tang, H.J. and Van Ranst, E., 1992. Testing of fuzzy set theory in land suitability assessment for rainfed grain maize production. *Pedologie* XLII-2: 129-147.
- [15] ten Cate, J.A.M., van Holst, A.F., Kleijer, H. en Stolp, J., 1995. Handleiding bodemgeografisch onderzoek. Richtlijnen en voorschriften. Deel D: Interpretatie van bodemkundige gegevens voor diverse vormen van bodemgebruik. Wageningen, DLO-Staring Centrum. Technisch Document 19D.
- [16] van Diepen, C.A., Schoumans, O., Boogaard, H.L., Brouwer, F. en de Vries, F., 2001. Verkenning van bodemgeschiktheid ter identificatie van kansrijke gebieden voor de landbouwsector in Noord-Brabant. Wageningen, Alterra, Research Instituut voor de Groene Ruimte.
- [17] Walvoort, D.J.J and de Gruijter, J.J., 2001. Compositional kriging: a spatial interpolation method for compositional data. *Mathematical Geology* 33: 951-966.
- [18] Zimmermann, H.-J., 1996. Fuzzy set theory and its applications. (3rd ed.) Kluwer Acad. Publ., Boston.

A. S-PLUS PROGRAMMA'S VOOR BEREKENING VAN LIDMAATSCHAPGRADEN IN VAGE KLASSEN VAN GESCHIKTHEID VOOR WEIDEBOUW (NOORD BRABANT)

A.1. Lidmaatschapgraden in predictorklassen

```
# Memberships in univariate klassen van basis-variabelen

# Verklaring van namen van variabelen:
# GH = GHG
# GS = grondsoort
# OS = organische stof-gehalte
# LU = lutum-gehalte
# LE = leem-gehalte
# CH = criterium hangwater profiel
# CG = criterium grondwater profiel
# SV = soort vochtprofiel
# VB = vochthoudend vermogen effectieve bewortelingsdiepte
# BD = breekdag

# Inlezen van basisgegevens:
import.data("primvarE.xls", FileType="EXCEL", DataFrame="primvarS", NameRow=1, ColNames=1)
ProfNr <- primvarS$ProfNr
GH <- primvarS$GH
GS <- primvarS$GS
OS <- primvarS$OS
LU <- primvarS$LU
LE <- primvarS$LE
CH <- primvarS$CH
CG <- primvarS$CG
VB <- primvarS$VB
BD <- primvarS$BD
```

```

# GS: GRONDSOORT

# GS memberships:
GS1 <- as.double(GS=="lm")
GS2 <- as.double(GS=="kl")
GS3 <- as.double(GS=="zl")
GS4 <- as.double(GS=="zd")
GS5 <- as.double(GS=="mr")
GS6 <- as.double(GS=="vn")

# GHG

# GHG klassen:
# GH1 = GH<5
# GH2 = 5<GH<15
# GH3 = 15<GH<25
# GH4 = 25<GH<40
# GH5 = 40<GH<80
# GH6 = GH>80

# GHG grensparameters:
bGH12 <- 5
dGH12 <- 3
bGH23 <- 15
dGH23 <- 3
bGH34 <- 25
dGH34 <- 3
bGH45 <- 40
dGH45 <- 5
bGH56 <- 80
dGH56 <- 10

# GHG memberships:
GH1 <- (GH<= (bGH12- dGH12)) + (GH> (bGH12- dGH12) & GH<= (bGH12+ dGH12))* (bGH12+ dGH12- GH) / (2*
dGH12)
GH2 <- (GH> (bGH12- dGH12) & GH<= (bGH12+ dGH12))* (GH- bGH12+ dGH12) / (2* dGH12) + (GH>
(bGH12+ dGH12) & GH<= (bGH23- dGH23)) + (GH> (bGH23- dGH23) & GH<= (bGH23+ dGH23))* (bGH23+
dGH23- GH) / (2* dGH23)
GH3 <- (GH> (bGH23- dGH23) & GH<= (bGH23+ dGH23))* (GH- bGH23+ dGH23) / (2* dGH23) + (GH> (bGH23+
dGH23) & GH<= (bGH34- dGH34)) + (GH> (bGH34- dGH34) & GH<= (bGH34+ dGH34))* (bGH34+ dGH34- GH) /
(2* dGH34)

```

```

GH4 <- (GH> (bGH34- dGH34) & GH<= (bGH34+ dGH34))* (GH- bGH34+ dGH34)/ (2* dGH34) + (GH> (bGH34+
dGH34) & GH<= (bGH45- dGH45)) + (GH> (bGH45- dGH45) & GH<= (bGH45+ dGH45))* (bGH45+ dGH45- GH)/
(2* dGH45)
GH5 <- (GH> (bGH45- dGH45) & GH<= (bGH45+ dGH45))* (GH- bGH45+ dGH45)/ (2* dGH45) + (GH> (bGH45+
dGH45) & GH<= (bGH56- dGH56)) + (GH> (bGH56- dGH56) & GH<= (bGH56+ dGH56))* (bGH56+ dGH56- GH)/
(2* dGH56)
GH6 <- (GH> (bGH56- dGH56) & GH<= (bGH56+ dGH56))* (GH- bGH56+ dGH56)/ (2* dGH56) + (GH> (bGH56+
dGH56))

```

```
# OS: ORGANISCHE STOF-GEHALTE
```

```
# OS klassen:
```

```
# OS1 = OS<5
```

```
# OS2 = 5<OS<15
```

```
# OS3 = OS>15
```

```
# OS grensparameters:
```

```
bOS12 <- 5
```

```
dOS12 <- 2
```

```
bOS23 <- 15
```

```
dOS23 <- 3
```

```
# OS memberships:
```

```
OS1 <- (OS<= (bOS12- dOS12)) + (OS> (bOS12- dOS12) & OS<= (bOS12+ dOS12))* (bOS12+ dOS12- OS)/ (2*
dOS12)
```

```
OS2 <- (OS> (bOS12- dOS12) & OS<= (bOS12+ dOS12))* (OS- bOS12+ dOS12)/ (2* dOS12) + (OS> (bOS12+
dOS12) & OS<= (bOS23- dOS23)) + (OS> (bOS23- dOS23) & OS<= (bOS23+ dOS23))* (bOS23+ dOS23- OS)/ (2*
dOS23)
```

```
OS3 <- (OS> (bOS23- dOS23) & OS<= (bOS23+ dOS23))* (OS- bOS23+ dOS23)/ (2* dOS23) + (OS> (bOS23+
dOS23))
```

```
# LU: LUTUM-GEHALTE
```

```
# LU klassen:
```

```
# LU1 = LU<8
```

```
# LU2 = 8<LU<30
```

```
# LU3 = LU>30
```

```
# LU grensparameters:
```

```

bLU12 <- 8
dLU12 <- 3
bLU23 <- 30
dLU23 <- 5

# LU memberships:
LU1 <- (LU<= (bLU12- dLU12)) + (LU> (bLU12- dLU12) & LU<= (bLU12+ dLU12))* (bLU12+ dLU12-LU)/ (2*
dLU12)
LU2 <- (LU> (bLU12- dLU12) & LU<= (bLU12+ dLU12))* (LU- bLU12+ dLU12)/ (2* dLU12) + (LU> (bLU12+
dLU12) & LU<= (bLU23- dLU23)) + (LU> (bLU23- dLU23) & LU<= (bLU23+ dLU23))* (bLU23+ dLU23- LU)/ (2*
dLU23)
LU3 <- (LU> (bLU23- dLU23) & LU<= (bLU23+ dLU23))* (LU- bLU23+ dLU23)/ (2* dLU23) + (LU> (bLU23+
dLU23))

# LE: LEEM-GEHALTE

# LE klassen:
# LE1 = LE<17.5
# LE2 = LE>17.5
# LE grensparameters:
bLE12 <- 17.5
dLE12 <- 2.5
# LE memberships:
LE1 <- (LE<=(bLE12-dLE12)) + (LE> (bLE12- dLE12) & LE<= (bLE12+ dLE12))* (bLE12+ dLE12- LE)/ (2*
dLE12)
LE2 <- 1-LE1

# CH: CRITERIUM HANGWATER PROFIEL

# CH klassen:
# CH1 = CH<0
# CH2 = CH>0
# CH grensparameters:
bCH <- 0
dCH <- 10
# CH memberships:
CH1 <- (CH<= (bCH- dCH)) + (CH> (bCH- dCH) & CH<= (bCH+ dCH))* (bCH+ dCH- CH)/ (2* dCH)
CH2 <- 1- CH1

```

```

# CG: CRITERIUM GRONDWATER PROFIEL

# CG klassen:
# CG1 = CG<0
# CG2 = CG>0
# CG grensparameters:
bCG <- 0
dCG <- 10
# CG memberships:
CG1 <- (CG<= (bCG- dCG)) + (CG>(bCG- dCG) & CG<= (bCG+ dCG))* (bCG+ dCG- CG)/ (2* dCG)
CG2 <- 1- CG1

# VB: VOCHTH. VERMOGEN EFF. BEWORTELINGSDIEPTE

# VB klassen
# VB1 = VB<50
# VB2 = 50<VB<90
# VB3 = 90<VB<100
# VB4 = 100<VB<140
# VB5 = 140<VB<150
# VB6 = 150<VB<180
# VB7 = 180<VB<190
# VB8 = 190<VB<200
# VB9 = VB>200
# VB grensparameters:
bVB12 <- 50
dVB12 <- 4
bVB23 <- 90
dVB23 <- 4
bVB34 <- 100
dVB34 <- 4
bVB45 <- 140
dVB45 <- 4
bVB56 <- 150
dVB56 <- 4
bVB67 <- 180

```

```

dVB67 <- 4
bVB78 <- 190
dVB78 <- 4
bVB89 <- 200
dVB89 <- 4

# VB memberships:
VB1 <- (VB<= (bVB12- dVB12)) + (VB> (bVB12- dVB12) & VB<= (bVB12+ dVB12))* (bVB12+ dVB12- VB)/ (2*
dVB12)
VB2 <- (VB> (bVB12- dVB12) & VB<= (bVB12+ dVB12))* (VB- bVB12+ dVB12)/ (2* dVB12) + (VB> (bVB12+
dVB12) & VB<= (bVB23- dVB23)) + (VB> (bVB23- dVB23) & VB<= (bVB23+ dVB23))* (bVB23+ dVB23- VB)/
(2* dVB23)
VB3 <- (VB> (bVB23- dVB23) & VB<= (bVB23+ dVB23))* (VB- bVB23+ dVB23)/ (2* dVB23) + (VB> (bVB23+
dVB23) & VB<= (bVB34- dVB34)) + (VB> (bVB34- dVB34) & VB<= (bVB34+ dVB34))* (bVB34+ dVB34- VB)/
(2* dVB34)
VB4 <- (VB> (bVB34- dVB34) & VB<= (bVB34+ dVB34))* (VB- bVB34+ dVB34)/ (2* dVB34) + (VB> (bVB34+
dVB34) & VB<= (bVB45- dVB45)) + (VB> (bVB45- dVB45) & VB<= (bVB45+ dVB45))* (bVB45+ dVB45- VB)/
(2* dVB45)
VB5 <- (VB> (bVB45- dVB45) & VB<= (bVB45+ dVB45))* (VB- bVB45+ dVB45)/ (2* dVB45) + (VB> (bVB45+
dVB45) & VB<= (bVB56- dVB56)) + (VB> (bVB56- dVB56) & VB<= (bVB56+ dVB56))* (bVB56+ dVB56- VB)/
(2* dVB56)
VB6 <- (VB> (bVB56- dVB56) & VB<= (bVB56+ dVB56))* (VB- bVB56+ dVB56)/ (2* dVB56) + (VB> (bVB56+
dVB56) & VB<= (bVB67- dVB67)) + (VB> (bVB67- dVB67) & VB<= (bVB67+ dVB67))* (bVB67+ dVB67- VB)/
(2* dVB67)
VB7 <- (VB> (bVB67- dVB67) & VB<= (bVB67+ dVB67))* (VB- bVB67+ dVB67)/ (2* dVB67) + (VB> (bVB67+
dVB67) & VB<= (bVB78- dVB78)) + (VB> (bVB78- dVB78) & VB<= (bVB78+ dVB78))* (bVB78+ dVB78- VB)/
(2* dVB78)
VB8 <- (VB> (bVB78- dVB78) & VB<= (bVB78+ dVB78))* (VB- bVB78+ dVB78)/ (2* dVB78) + (VB> (bVB78+
dVB78) & VB<= (bVB89- dVB89)) + (VB> (bVB89- dVB89) & VB<= (bVB89+ dVB89))* (bVB89+ dVB89- VB)/
(2* dVB89)
VB9 <- (VB> (bVB89- dVB89) & VB<= (bVB89+ dVB89))* (VB- bVB89+ dVB89)/ (2* dVB89) + (VB> (bVB89+
dVB89))

# BD: BREEKDAG

# BD klassen:
# BD1 = BD<60
# BD2 = 60<BD<105
# BD3 = BD>105
# BD grensparameters:

```



```

bBD12 <- 60
dBD12 <- 10
bBD23 <- 105
dBD23 <- 10

# BD memberships:
BD1 <- (BD<= (bBD12- dBD12)) + (BD> (bBD12- dBD12) & BD<= (bBD12+ dBD12))* (bBD12+ dBD12- BD)/
(2* dBD12)
BD2 <- (BD> (bBD12- dBD12) & BD<= (bBD12+ dBD12))* (BD- bBD12+ dBD12)/ (2* dBD12) + (BD> (bBD12+
dBD12) & BD<= (bBD23- dBD23)) + (BD> (bBD23- dBD23) & BD<= (bBD23+ dBD23))* (bBD23+ dBD23- BD)/
(2* dBD23)
BD3 <- (BD> (bBD23- dBD23) & BD<= (bBD23+ dBD23))* (BD- bBD23+ dBD23)/ (2* dBD23) + (BD> (bBD23+
dBD23))

```

A.2. Lidmaatschapgraden in gradaties van beoordelingsfactoren

```

# ONTWATERINGSTOESTAND
# Samenvoeging van bodemsoorten:
GSminer <-GS1 + GS2 + GS3 + GS4
GSpeaty <- GS5 + GS6

# Memberships in 5 gradaties van Ontwateringstoestand: ON1 = gradatie 1, enz.
ON1 <- GH6
ON2 <- GH5
ON3 <- GH4
ON4 <- GH3 + GH2* GSminer
ON5 <- GH1 + GH2* GSpeaty

# STEVIGHEID VAN DE BOVENGROND

# Samenvoeging van GH klassen:
GH123 <- GH1 + GH2 + GH3
GH56 <- GH5 + GH6
GH1234 <- GH123 + GH4
GH456 <- GH4 + GH56

# Samenvoeging van OS klassen:
OS12 <- OS1 + OS2
OS23 <- OS2 + OS3

# Samenvoeging van LU klassen:
LU12 <- LU1 + LU2
LU23 <- LU2 + LU3

```

```

# Memberships in 3 gradaties van Stevigheid: ST1 = gradatie 1, enz.
ST1 <- GH4* OS1* LU1* LE1 + GH56* OS1 + GH56* OS2* LU1
ST2 <- GH123* OS1* LU1* LE1 + GH4* OS1* (1- LU3- LU1* LE1) + GH4* OS2* LU12 + GH4* OS3* LU1 + GH56*
OS2* LU23 + GH56* OS3
ST3 <- GH123* OS1* (1- LU1* LE1) + GH123* OS23 + GH4* OS1* LU3 + GH4* OS2* LU3 + GH4* OS3* LU23

# VOCHTLEVEREND VERMOGEN

# Samenvoeging van grondsoorten:
GSKleiig <- GS2 + GS3
GSnietkl <- 1 - GSKleiig
# Samenvoeging van VB klassen:
VB12 <- VB1 + VB2
VB23 <- VB2 + VB3
VB45 <- VB4 + VB5
VB678 <- VB6 + VB7 + VB8
# Samenvoeging van BD klassen:
BD12 <- BD1 + BD2
BD23 <- BD2 + BD3
# Memberships in 3 soorten vochtprofiel (1=tijdelijk gr.w.; 2=h.w.; 3= gr.w.):
SV1 <- CH1* CG1
SV2 <- CH2
SV3 <- CH1* CG2
# Memberships in 5 gradaties van Vochtl. vermogen: VV1 = gradatie 1, enz.
VV1 <- SV1* (VB7* GSKleiig* BD3 + VB8* GSKleiig* BD23 + VB9) + SV2* VB9 + SV3
VV2 <- SV1* (VB12* BD3 + VB3* BD3 + VB4* BD3 + VB5* (GSKleiig* BD23 + GSnietkl* BD3) + VB6 + VB7* (1-
GSKleiig* BD3) + VB8* (1- GSKleiig* BD23)) + SV2* VB678
VV3 <- SV1* (VB12* BD2 + VB3* (GSKleiig* BD12 + GSnietkl* BD2) + VB4* BD12 + VB5* (GSKleiig* BD1 +
GSnietkl* BD12)) + SV2* VB45
VV4 <- SV1* VB12* BD1 + SV2* VB23
VV5 <- SV2* VB1

```

A.3. Lidmaatschapgraden in geschiktheidsklassen

```

# GESCHIKTHEID WEIDEBOUW BRABANT

```

```

# Memberships in geschiktheidsklassen, direct afgeleid van de tree,
# met een product voor elke root (GW11 = geschiktheidsklasse 11, enz.):

```

```

GWB11 <- ST1* VV1* (ON1+ ON2) + ST1* VV1* ON3
GWB12 <- ST2* VV1* (ON1+ ON2) + ST2* VV1* ON3
GWB21 <- ST3* VV1* (ON1+ ON2) + ST3* VV2* (ON1+ ON2) + ST3* VV1* ON3 + ST2* VV1* ON4 + ST2* VV2*
ON4 + (ST1+ ST2)* (VV1+ VV2+ VV3)* ON5
GWB13 <- ST1* VV2* (ON1+ ON2) + ST1* VV2* ON3 + ST1* VV2* ON4
GWB14 <- ST2* VV2* (ON1+ ON2) + ST2* VV2* ON3
GWB22 <- ST1* VV3* (ON1+ ON2) + ST1* VV3* ON3 +
ST1* VV3* ON4
GWB23 <- (ST2+ ST3)* VV3* (ON1+ ON2) + ST2* VV3* ON3 + ST2* VV3* ON4
GWB31 <- ST3* VV2* ON3 + ST3* VV3* ON3 + ST3* VV1* ON4 + ST3* VV2* ON4 + ST3* VV3* ON4 + ST3*
(VV1+ VV2+ VV3)* ON5
GWB32 <- ST1* VV4* (ON1+ ON2) + ST1* VV4* ON3 + ST1* VV4* ON4 + ST1* VV4* ON5
GWB33 <- (ST2+ ST3)* VV4* (ON1+ ON2) + ST2* VV4* ON3 + ST2* VV4* ON4 + ST2* VV4* ON5
GWB41 <- ST3* VV4* ON3 + ST3* VV5* ON3 + ST3* VV4* ON4 + ST3* VV5* ON4 + ST3* VV4* ON5 + ST3*
VV5* ON5
GWB42 <- ST1* VV5* (ON1+ ON2) + ST1* VV5* ON3 + ST1* VV5* ON4 + ST1* VV5* ON5
GWB43 <- (ST2 +ST3)* VV5* (ON1+ ON2) + ST2* VV5* ON3 + ST2* VV5* ON4 + ST2* VV5* ON5

```

Memberships na algebraïsche vereenvoudiging (alternatief):

```

GWB11 <- ST1* VV1* (ON1+ ON2+ ON3)
GWB12 <- ST2* VV1* (ON1+ ON2+ ON3)
GWB13 <- ST1* VV2* (1- ON5)
GWB14 <- ST2* VV2* (ON1+ ON2+ ON3)
GWB21 <- ST3* VV1* (ON1+ ON2+ ON3) + ST3* VV2* (ON1+ ON2) + ST2* (VV1+ VV2)* ON4 + (ST1+ ST2)*
(VV1+ VV2+ VV3)* ON5
GWB22 <- ST1* VV3* (1- ON5)
GWB23 <- (ST2+ ST3)* VV3* (ON1+ ON2) + ST2* VV3* (ON3+ ON4)
GWB31 <- ST3* (VV2+ VV3)* ON3 + ST3* (VV1+ VV2+ VV3)* (ON4+ ON5)
GWB32 <- ST1* VV4
GWB33 <- ST2* VV4 + ST3* VV4* (ON1+ ON2)
GWB41 <- ST3* (VV4+ VV5)* (ON3+ ON4+ ON5)
GWB42 <- ST1* VV5
GWB43 <- ST2*VV5 + ST3*VV5*(ON1+ON2)

```

Verzamelen en printen van memberships:

```

mGWB <- data.frame(GWB11, GWB12, GWB13, GWB14, GWB21, GWB22, GWB23, GWB31, GWB32, GWB33,
GWB41, GWB42, GWB43)
mGWB

```

B. ACQUISITIE VAN GHG EN GLG GEGEVENS VOOR HET STUDIEGEBIED

Om te kunnen rekenen met grondwatertrappen dienen de klassen van de grondwatertrappen (associaties) naar gemiddelde waarden voor GHG en GLG omgezet te worden (tabel B.2). Deze vertaling gebeurde voorheen met de kengetallen in Van der Sluijs (1991). De waarden die hierin genoemd worden zijn inmiddels verouderd. Vooral door een algemeen geldende tendens dat de gronden in Nederland de laatste decennia droger zijn geworden.

Een beproefde methode om de gemiddelde GHG-/GLG-waarden voor de verschillende grondwatertrappen (Gt-strata) vast te stellen, is aselekt te meten op voldoende plaatsen binnen de Gt-strata. Dit is uitgevoerd voor het project ‘Landelijke Steekproef Kaartbladen’ (LSK) (Visschers en Van het Loo, 1998/1999). Per Gt-stratum zijn, afhankelijk van de bijbehorende arealen, een aantal steekproeven door heel Nederland genomen. De uitkomsten van de GHG-/GLG-waarden zijn opgeslagen in een datamodel. Voor het project ‘Verkenning van bodemgeschiktheid ter identificatie van kansrijke gebieden voor de landbouwsector in Noord-Brabant’ zijn alleen de GHG-/GLG-waarden van de steekproeven gebruikt die relevant zijn voor de provincie Noord-Brabant. De steekproeven zijn binnen het datamodel nog niet te selecteren per provincie maar wel via coördinaten. Om de steekproeven van de provincie Noord-Brabant te selecteren, is een rechthoek om de provincie gelegd en zijn alle steekproeven binnen dit blok geselecteerd. De gemiddelde GHG-/GLG-waarden uit dit blok staan in tabel B.1 en B.2.

Enkele problemen die hierbij optraden waren:

- Gt I heeft binnen Noord-Brabant te weinig waarnemingen voor een betrouwbare subset; om dit probleem op te lossen, hebben we voor dit Gt-stratum de hele Nederlandse set moeten gebruiken.
- Gt IV was nog niet klaar; hierdoor hebben we voor dit Gt-stratum alleen veldschattingen gebruikt.
- Op de bodem-/grondwatertrappenkaart bestaan nauwkeuriger klasse-indelingen

binnen Gt-strata dan bij de 'Landelijke Steekproef Kaartbladen' onderscheiden zijn, bijv. Gt III en III*.

Om toch de extra informatie van de grondwatertrappenkaart te kunnen gebruiken, hebben we de volgende formules gebruikt:

$$\text{GHG_waarde_III} = \text{GHG_LSK} - \text{oppervlakte_fractie_III*} \times \text{bandbreedte}$$

$$\text{GLG_waarde_III} = \text{GLG_LSK} - \text{oppervlakte_fractie_III*} \times \text{bandbreedte}$$

$$\text{GHG_waarde_III*} = \text{GHG_LSK} + \text{oppervlakte_fractie_III} \times \text{bandbreedte}$$

$$\text{GLG_waarde_III*} = \text{GLG_LSK} + \text{oppervlakte_fractie_III} \times \text{bandbreedte}$$

Waarin:

GHG_LSK = de GHG-waarde voor Gt III volgens de LSK-methode

GLG_LSK = de GLG-waarde voor Gt III volgens de LSK-methode

oppervlakte_fractie_III = oppervlakte van Gt-stratum III/oppervlakte van Gt-stratum III + III*

oppervlakte_fractie_III* = oppervlakte van Gt-stratum III*/oppervlakte van Gt-stratum III + III*

bandbreedte = (gem. GHG-traject van Gt III* - gem GHG-traject van Gt III)/2:

bandbreedte bij Gt II, III en V: voor GHG = 10 cm; bandbreedte voor GLG = 5 cm

bandbreedte bij Gt VII: voor GHG en GLG = 200 cm

Table B.1: Gemiddelde GHG- en GLG-waarden per grondwatertrap voor de provincie Noord-Brabant (geactualiseerd aan de hand van LSK)

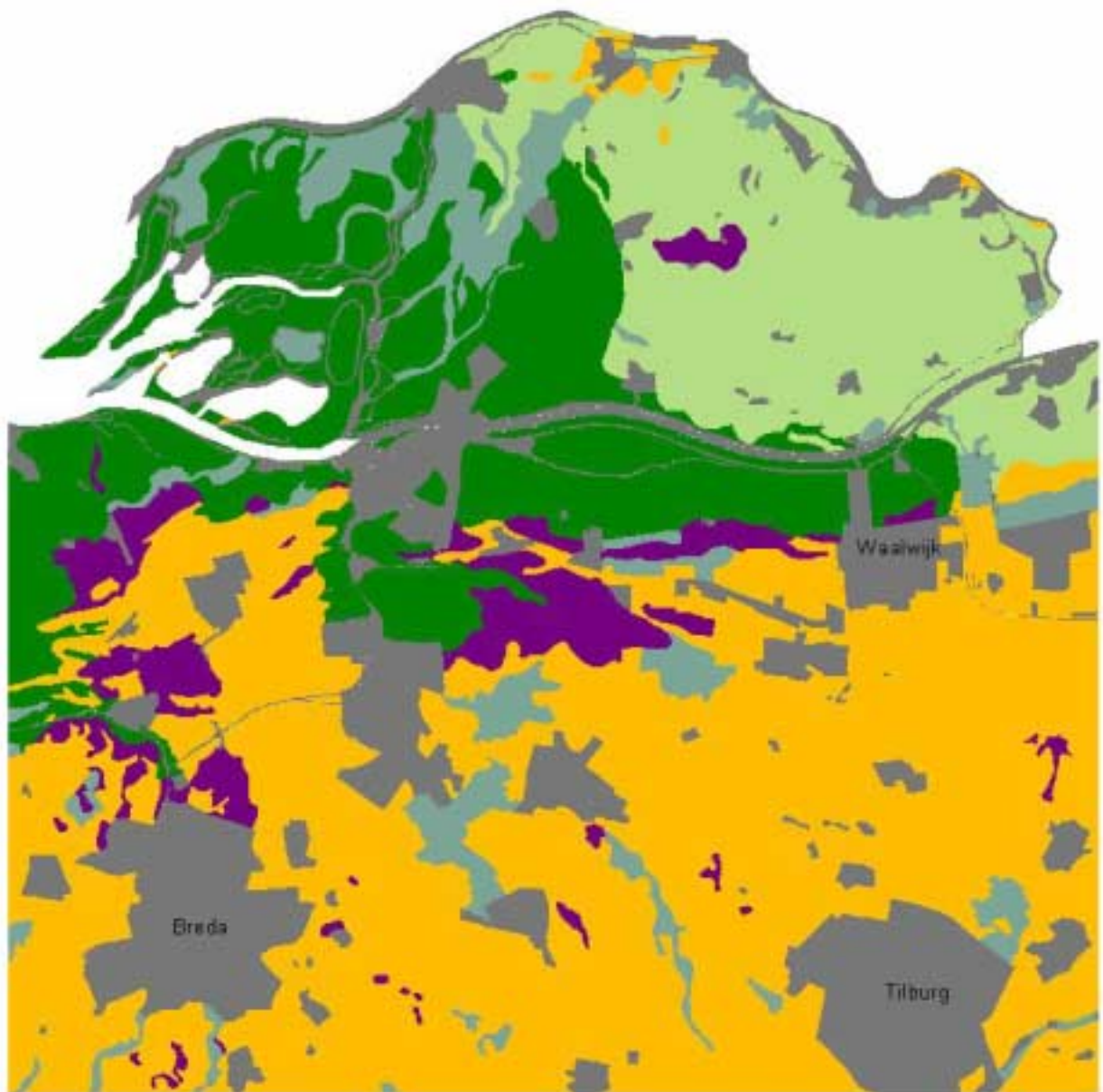
Gt	GHG	GLG	Bijzonderheden	n	Opp (ha)
I	22	68	Gemiddelde van geheel Nederland	115	458
II	26	86	-	10	6.921
IIa	-	-	Niet onderscheiden bij 1 : 50.000	-	-
IIb	36	91	-	-	751
III	45	108	-	34	42.976
IIIa	-	-	Niet onderscheiden bij 1 : 50.000	-	-
IIIb	55	113	-	-	22.269
IV	60	120	Geen LSK maar gebaseerd op veldkenmerken	21	24.550
V	59	158	-	45	46.961
Va	-	-	Niet onderscheiden bij 1 : 50.000	-	-
Vb	69	163	-	-	38.091
VI	82	161	-	51	134.831
VII	160	271	-	39	59.997
VIIa	-	-	Niet onderscheiden bij 1 : 50.000	-	-
VIIb	560	667	-	-	34.438

Table B.2: De gemiddelde GHG- en GLG-waarden per grondwatertrap volgens de tabellen van Van der Sluijs (1991) voor heel Nederland en de uit de LSK gegevens geschatte waarden voor de provincie Noord-Brabant (LSK, 1998/1999)

Gt	LSK		Van der Sluijs		Klasse- breedte	
	GHG	GLG	GHG	GLG	GHG	GLG
I	22	68	0	38	0-20	<50
II	26	86	7	66	0-30	50-80
IIa	-	-				
IIb	36	91	32	67	25-40	50-80
III	45	108	17	103	0-25/40	80-120
IIIa	-	-				
IIIb	55	113	32	102	25-40	80-120
IV	60	120	56	104	40-80	80-120
V	59	158	17	135	0-25/40	>120
Va	-	-				
Vb	69	163	32	142	25-40	>120
VI	82	161	61	155	40-80	>120
VII	160	271	101	190	80-140	>120
VIIa	-	-				
VIIb	560	667	185	281	>140	>160

C. RUIMTELIJKE VERSPREIDING VAN DE
HOOFDGROEPEN VAN GRONDEN IN HET
STUDIEGEBIED.

Appendix C Hoofdingeling van de gronden die in het studiegebied in Noord-Brabant voorkomen



- Hoofdingeling gronden
- Fluviatiele kleigronden
 - Marine kleigronden
 - Organischestof rijke gronden
 - Zandgronden
 - Rest (associaties/overslag)
 - Niet ingedeeld
 - Bebouwing, wegen enz.

Figure C.1:

D. STEVIGHEID BOVENGROND VOLGENS HARD
MODEL (A), EN LIDMAATSCHAP IN ZACHTE
GRADATIE 'ZEER GROOT' (B).

Appendix D De gradatie 1 ('zeer groot') van 'stevigheid van de bovengrond' in een studiegebied in Noord-Brabant via het 'harde' model en het 'zachte' model (B)

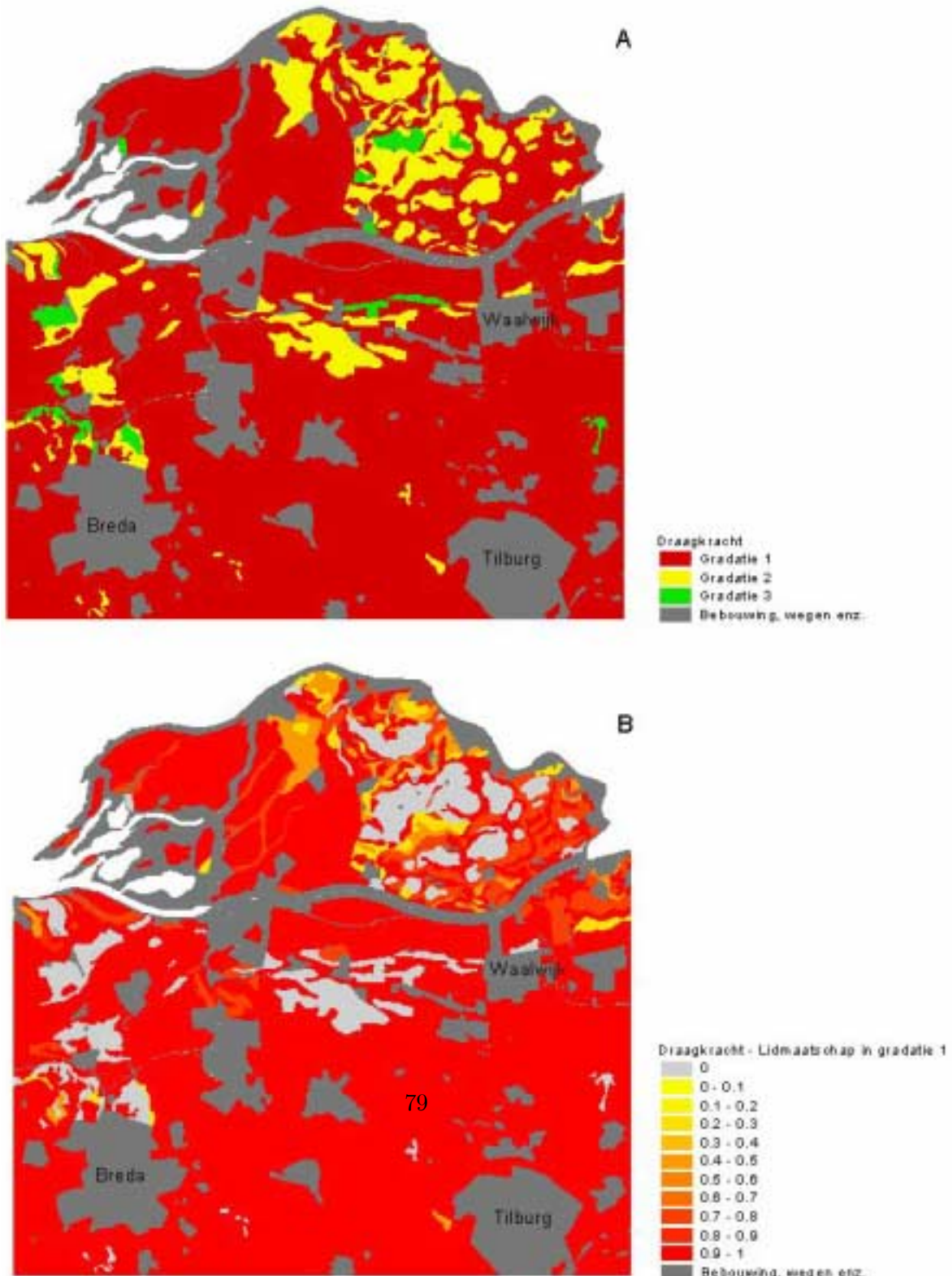


Figure D.1:

E. STEVIGHEID BOVENGROND VOLGENS HARD
MODEL (A) EN GEDEFUZZIFIEERD ZACHT MODEL
(B).

Appendix E De 'stevigheid van bovengrond' van gronden in een studiegebied in Noord-Brabant volgens het 'harde' (A) en 'zachte' model (B).

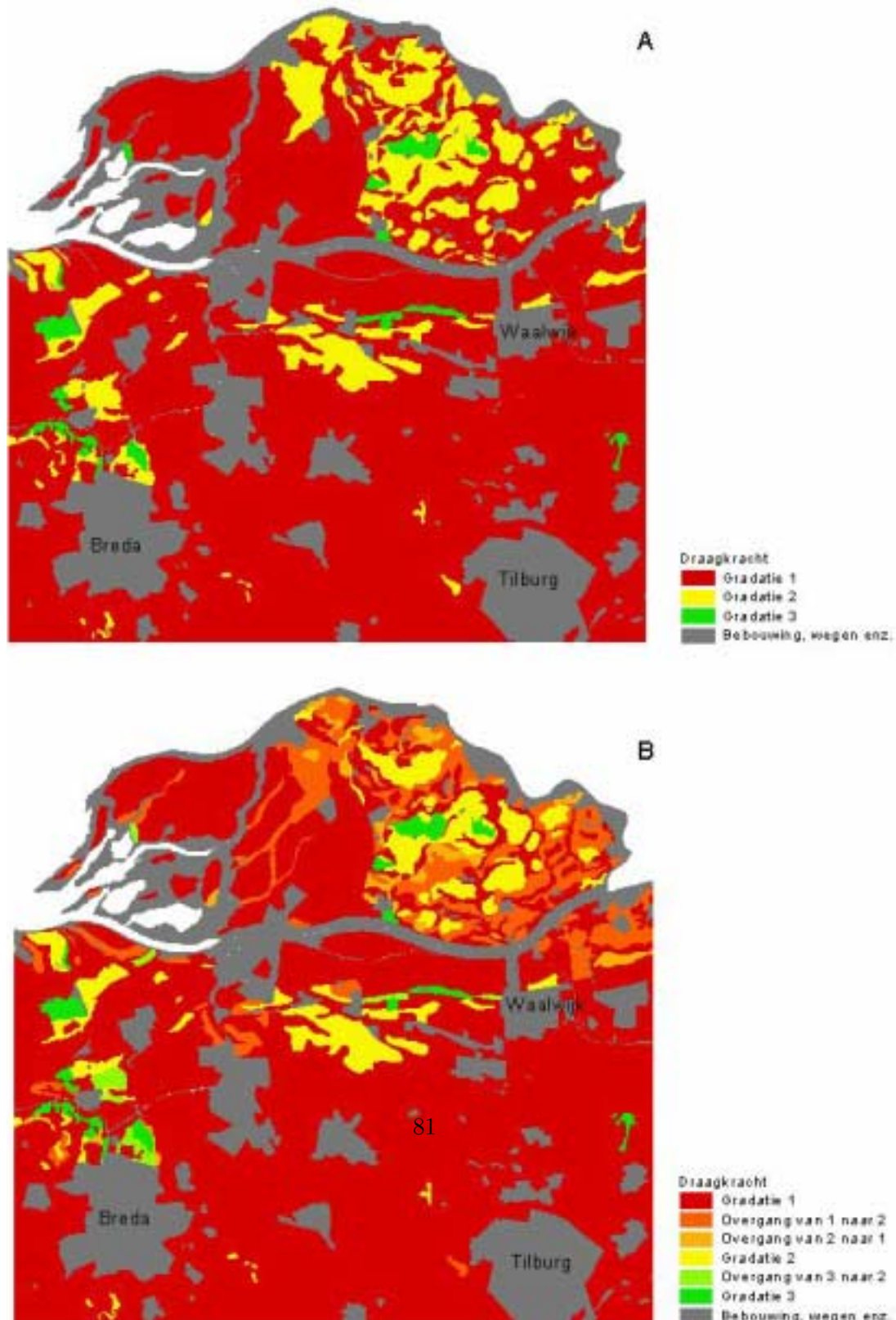


Figure E.1:

F. ONTWATERINGSTOESTAND VOLGENS HARD
MODEL (A) EN GEDEFUZZIFIEERD ZACHT MODEL
(B).

Appendix F De 'ontwateringstoestand' van gronden in een studiegebied in Noord-Brabant volgens het 'harde' (A) en het 'zachte' model (B).

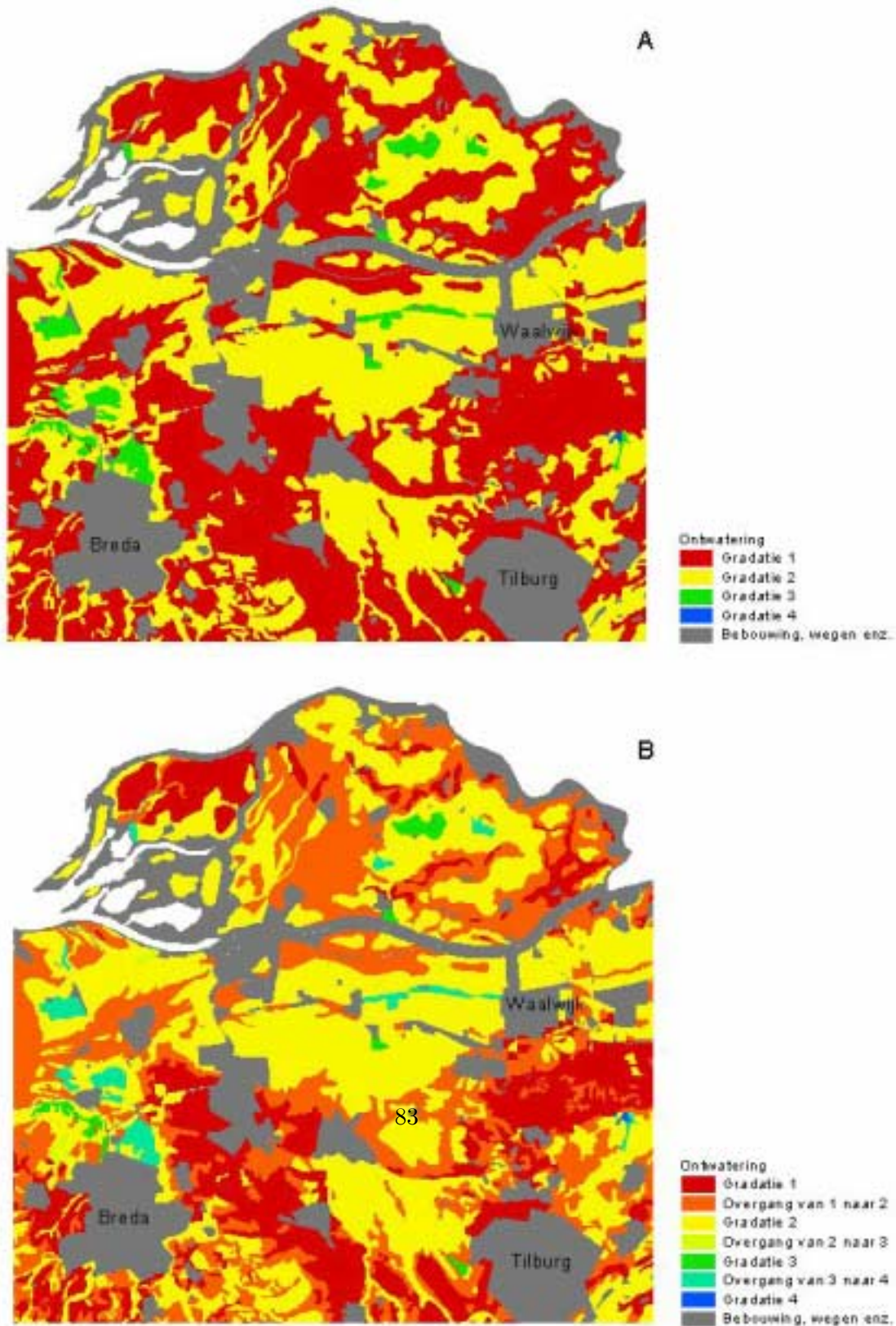


Figure F.1:

G. VOCHTLEVEREND VERMOGEN VOLGENS HARD
MODEL (A) EN GEDEFUZZIFIEERD ZACHT MODEL
(B).

Appendix G Het 'vochtleverend vermogen' van gronden in een studiegebied in Noord-Brabant volgens het 'harde' (A) en het 'zachte' model (B).

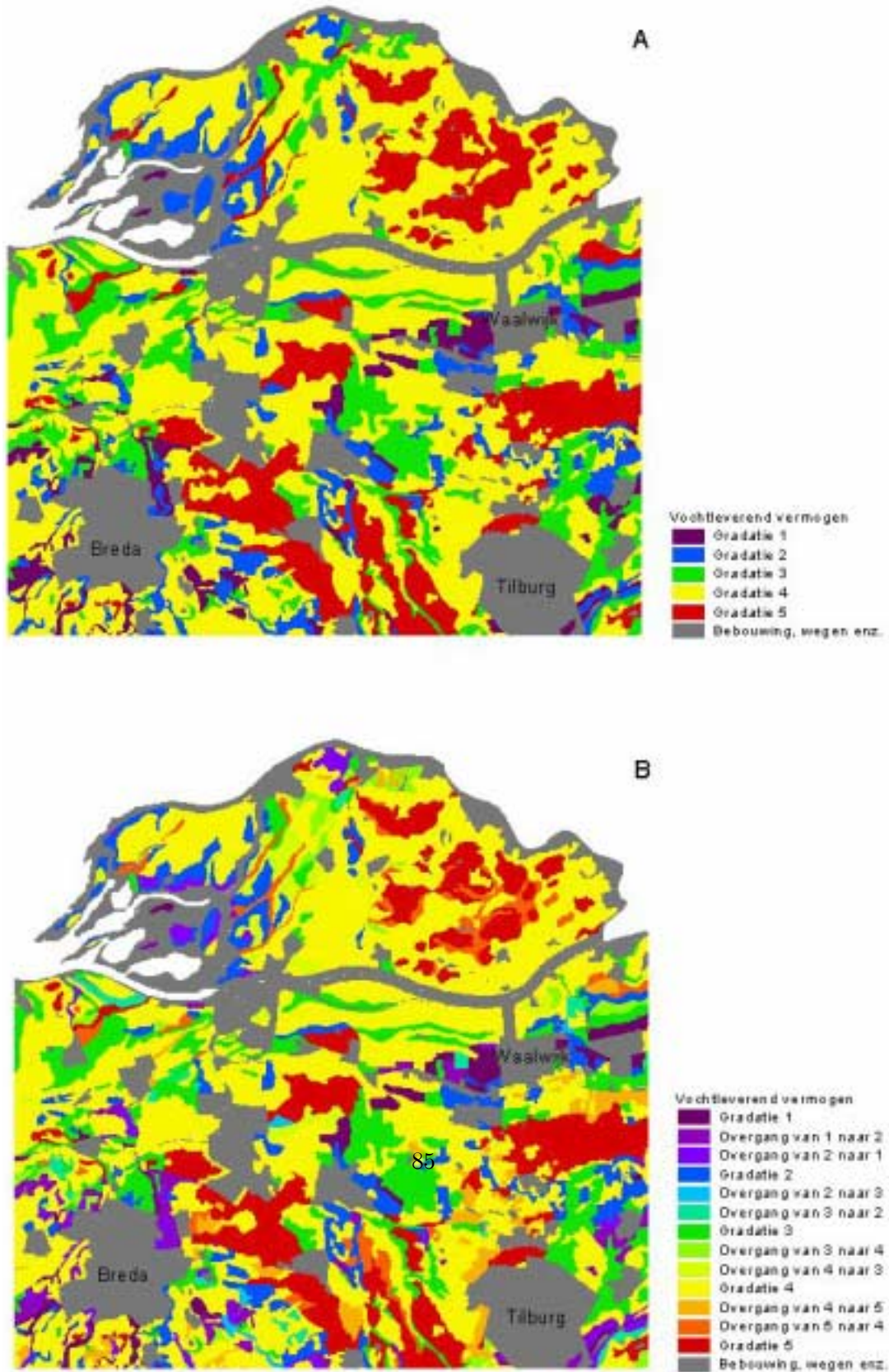


Figure G.1:

H. GESCHIKTHEID VOOR GRASLAND VOLGENS
HARD MODEL (A) EN GEDEFUZZIFIEERD ZACHT
MODEL (B).

Appendix H De geschiktheid voor weidebouw van gronden in een studiegebied in Noord-Brabant volgens het 'harde' (A) en het 'zachte' model (B).

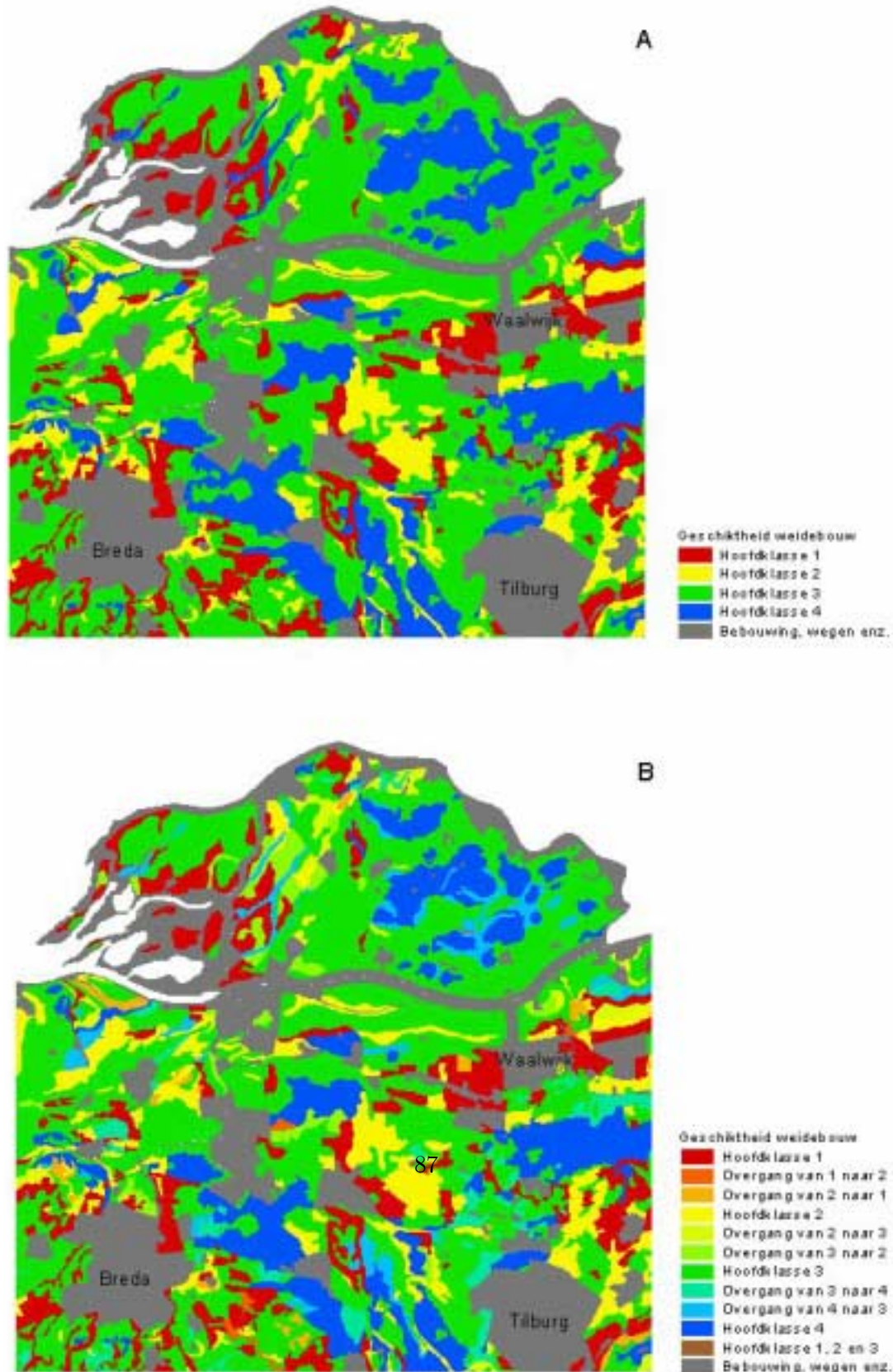


Figure H.1: