

Natuur.focus

Biodiversiteit in bermen



Natuurbeheer en
grondwatermodellen



De Stierkikker
in Vlaanderen



Natuurbeheer en grondwatermodellen

Een casestudie in het bos van Ranst

JAN STUCKENS, FLORIS VANDERHAEGHE, TOM CARRON & KOEN DEHEEGHER

Het is algemeen bekend bij natuurbeheerders dat juiste waterstanden en waterkwaliteit belangrijke voorwaarden zijn voor een kwaliteitsvolle natuur in natte en vochtige gebieden. In het Bos van Ranst werd het grondwatersysteem doorgrond met een computermodel. In dit artikel wordt besproken welke bos- en graslandtypes mogelijks tot ontwikkeling kunnen komen in de huidige omstandigheden. Met behulp van de verworven kennis worden dan optimale ingrepen voorgesteld en bijhorende vegetatiepotenties voorspeld.

Inleiding

Vaak wil men weten welke aanpassingen in de waterhuishouding nodig zijn om te kunnen komen tot een bepaald natuurtype, zoals Dottergrasland, Venige heide of Elzenbroekbos. Ingrepen kunnen bijvoorbeeld zijn: greppels ondieper maken, beken opstuwen of grachten omleiden. Deze ingrepen beïnvloeden grondwaterstanden, kweldrukken en dito stromingen. Op hun beurt beïnvloeden deze veranderingen de aanwezige natuur. Om redelijk trefzeker te kunnen werken, is het van belang om vooraf het uiteindelijke effect van zulke ingrepen in te schatten. Alleen zo is het mogelijk om uit het instrumentarium de meest gewenste maatregelen te kiezen.

Hier stellen we een mogelijke werkwijze voor aan de hand van een ecohydrologische studie te Ranst. In een ecohydrologische studie wordt de relatie onderzocht tussen natuurtypes en

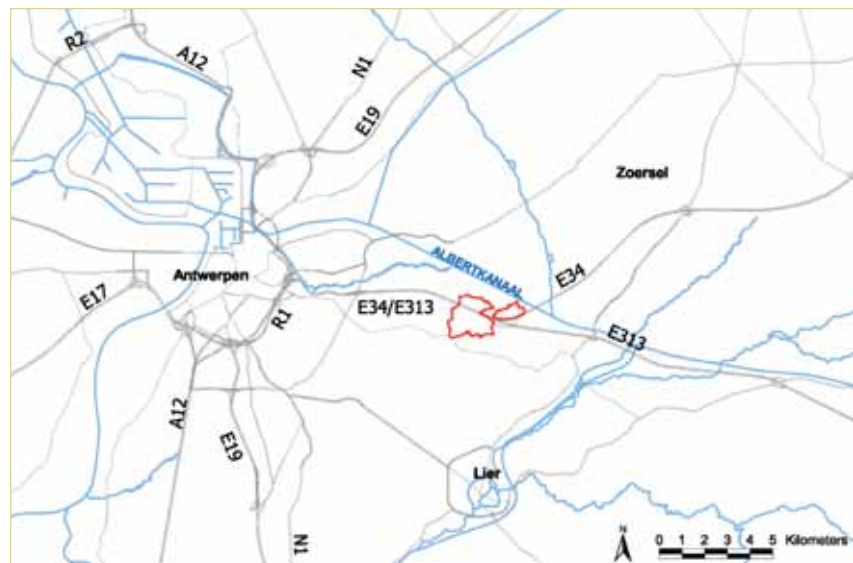


Fig. 1: Situering van het Bos van Ranst (rood omlijnd).

het grondwatersysteem (dynamiek en chemie). Op deze manier verkrijgen we inzicht in de werking van het ecosysteem. Dit vormt de basis van een beheer voor ecologische streefdoelen.

Bos van Ranst

Ten oosten van Antwerpen ligt het 'Bos van Ranst', ter hoogte van de verkeerswisselaar E313-E34. Het maakt deel uit van het habitatrichtlijngebied 'Bos- en heidegebieden ten Oosten van Antwerpen'. Het Bos van Ranst heeft een zandlemige bodem. Bepaalde bospercelen behoren tot het Elzen-Vogelkersverbond (*Alno-Padion*). Het Elzen-Vogelkersverbond is

door de Habitatrichtlijn aangeduid als prioritair habitat (bijlage I, code 91E0: alluviale bossen). Dit betekent dat de Europese lidstaten verplicht zijn dit bostype in stand te houden en te herstellen, omdat het bostype minder voorkomt buiten Europa. De soortenrijkere vormen van Elzen-Vogelkersbos in het Bos van Ranst betreffen de associatie Vogelkers-Essenbos (*Pruno-Fraxinetum*; zie Tab. 1 voor duiding van de in dit artikel vernoemde plantengemeenschappen). Ze worden aangetroffen onder mineraalrijke omstandigheden (vaak lemige of kleihoudende, alluviale bodems) en bij seizoenale grondwaterschommelingen van ongeveer een halve meter (De Becker *et al.* 2004). Een deel van het

gebied is bosreservaat (Muizenbos). Daarnaast zijn er ook potenties voor waardevolle graslanden, zoals blijkt uit een soortenrijk Glanshaverhooiland in het erkend natuurreservaat 'Zevenbergen', beheerd door Natuurpunt.

Onder andere Adriaens *et al.* (2000), Verheyen *et al.* (2001), Verheyen & Herry (2001) en De Keersmaeker *et al.* (2004) hebben het Muizenbos al beschreven. Delen van het Muizenbos werden aangelegd als populierenaanplant, maar evolueren spontaan tot Elzen-Vogelkersbos. De goed ontwikkelde boskern herbergt kalkminnende soorten als Gevlekte aronskelk, Slanke sleutelbloem, Groot heksenkruid en Eenbes. In het noorden treffen we een zuurder variant aan, waar deze soorten minder aanwezig zijn en waar meer Brede stekelvaren en Wijfjesvaren voorkomt. Het voorkomen van Elzen-Vogelkersbos of van kalkindicerende plantensoorten in de ondergroei wordt verklaard door de aanwezigheid van schelpen in het kleizandsubstraat, dat er doorgaans een meter diep zit. Deze schelpen zouden namelijk de zuurtegraad verminderen van ingesijpeld regenwater dat op het klei-zandsubstraat blijft 'hangen'. Ook het feit dat bemestingsinvloed van vroegere landbouw in deze bossen beperkt is gebleven, is naar voor geschoven om het voorkomen te verklaren van zo'n bijzondere vegetatie.

Doelstelling

In deze studie willen we vooreerst inzicht krijgen in de werking van het grondwatersysteem: hoe veranderen de grondwaterstanden seizoenal door het gebied? Waar dringt regenwater de bodem in (inzigging) en waar treedt het grondwater terug uit (kwel)? Meer in het bijzonder wensen we de hypothese te onderzoeken dat het schelpensubstraat een belangrijke voorwaarde is voor het voorkomen van Elzen-Vogelkersbos.

Daarnaast willen we weten welke vegetatietypes kunnen ontwikkelen, bij de huidige waterhuishouding en een bepaald natuurbeheer. Vervolgens willen we het effect van ingrepen in de waterhuishouding op deze potentiële vegetatie voorspellen. Met die kennis kunnen we een scenario van ecologisch optimale inrichting samenstellen, die het beheer omvat van zowel water als vegetatie. Daarbij wensen de beheerders zoveel mogelijk de typische soortenrijkere vorm van Elzen-Vogelkersbos te ontwikkelen, vermits dit op bepaalde plaatsen nu reeds mogelijk blijkt (Muizenbos) en omdat de typische kalkminnende soorten zeldzaam zijn.

Methodiek

De werking van het grondwatersysteem is beschreven met behulp van een wiskundig model. De basisgegevens voor zo'n model zijn geologie, topografie, bodem, grondgebruik, waterlopen, neerslag en metingen van grondwaterstand in peilbuizen. Het grondwatermo-



Fig. 2: Voorjaarsaspect van een goed ontwikkeld Elzen-Vogelkersbos, met Bosanemoon, Gulden boterbloem en Slanke sleutelbloem in de kruidlaag en Hazelaar in de struiklaag (foto: Luc De Keersmaeker).

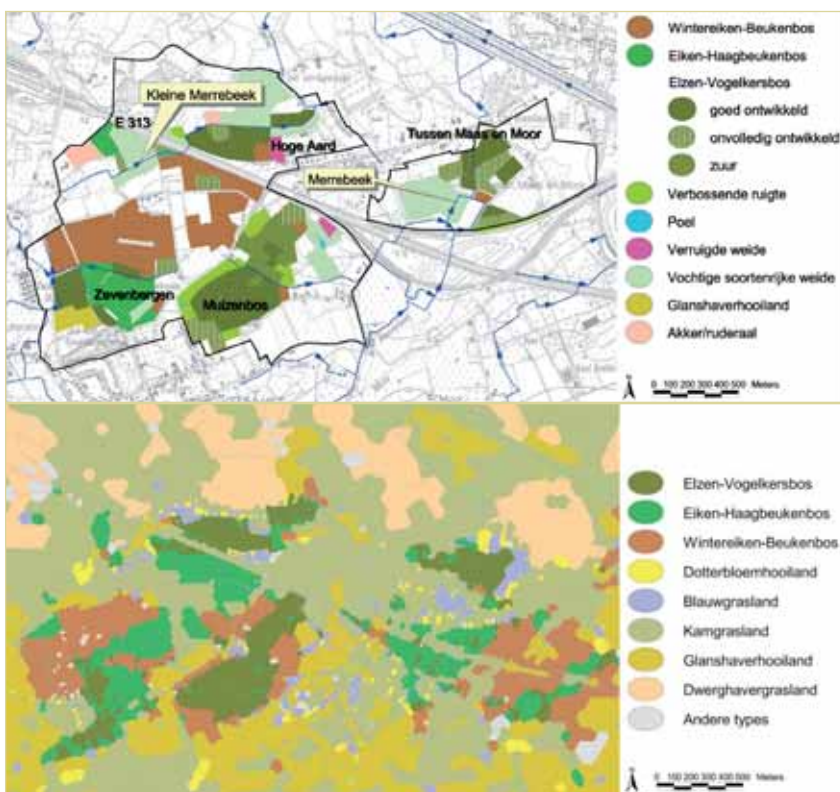


Fig. 3: Bovenaan de vegetatiekaart (2002) met toponiemen en beken, onderaan de potentiële vegetatietypes. De potentiële vegetatie is berekend met Duraveg voor een gemiddeld neerslagjaar, zonder ingrepen in de waterhuishouding.

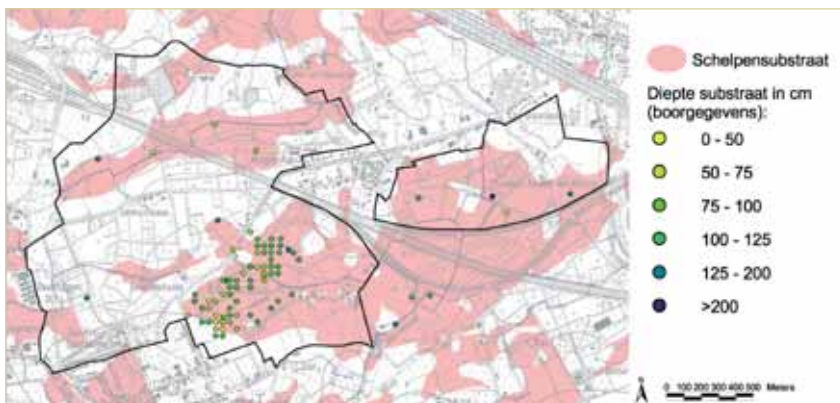


Fig. 4: Voorkomen en diepte van het schelpensubstraat te Ranst (bodemkaart + aanvullende boorgegevens).

Duurlijnenbundels en vegetatievoorspelling

Referentiekader: fysische voorwaarden van vegetatietypes aan grondwaterstanden, bodem en beheer

De vereisten van een vegetatietype aan grondwaterdynamiek kunnen goed worden beschreven met behulp van duurlijnen (Everts & de Vries 1991, Grootjans 1985, Niemann 1963, Šýkora 1983, Tüxen 1954). Duurlijnen zijn tijdsduurcurves die aangeven gedurende welk aandeel van het jaar (%) het grondwater boven een bepaald niveau staat (zie Vercoutere & De Becker 2004). Van een bepaalde peilbuis kan dus een duurlijn worden opgesteld wanneer er peilmetingen beschikbaar zijn gedurende minstens één jaar. De basis van het voorspellingsmodel Duraveg wordt gevormd door een dataset van duurlijnen, fysische bodemeigenschappen en beheersvormen, gemeten in een honderdtal verschillende vegetatietypes in Vlaanderen en Nederland. Het kan daarbij gaan om associaties, varianten, subassociaties, rompgemeenschappen, verbonden of anderszins gedefinieerde plantengemeenschappen. Afhankelijk van het vegetatietype varieert het aantal peilbuizen per type van ca. 10 tot enkele tientallen. De in dit artikel betrokken vegetatietypes (Tab. 1) zijn in dit opzicht goed gedocumenteerd.

De gemeten duurlijnen van één vegetatietype vormen samen een duurlijnenbundel. Er wordt van uitgegaan dat deze een goed beeld geeft van de bandbreedte waarbinnen het type kan voorkomen. Deze duurlijnenbundels worden in de vegetatievoorspelling gebruikt als referentiekader. Ook fysische bodemeigenschappen zijn in het referentiekader opgenomen; het gaat om een dertigtal verschillende bodemtypes. In figuur 5 worden enkele voorbeelden van duurlijnenbundels getoond. Links is de duurlijnenbundel van Ruigte-Elzenbroek weergegeven met behulp van een onder- en bovengrens. Dit is de natste vegetatie in deze figuur. Zowel de onder- als bovengrens van het grondwater liggen vast voor dit vegetatietype. Het Elzen-Vogelkersbos komt op iets minder natte standplaatsen voor. Drogere bostypes zijn het Eiken-Haagbeukenbos en op de droogste, zandige standplaatsen het Berken-Zomereikenbos. Hier ligt geen ondergrens vast. Het grondwater mag dus ver onder het maaiveld wegzakken.

Enkele gemeten duurlijnen uit het studiegebied te Ranst zijn weergegeven in kleur (peilbuisgegevens 2001-2002). Het aangegeven bostype kan op deze plaatsen ontwikkelen wanneer de gemeten duurlijnen representatief zijn voor de toekomstige waterhuishouding. Zo vallen duurlijnen in Muizenbos, Zevenbergenbos, 'Tussen Maas en Moor' en Hoge Aard binnen de grenzen van het Elzen-Vogelkersbos.

Vegetatievoorspelling met Duraveg

Het grondwatermodel Triwaco voorspelt een duurlijn voor elk knooppunt (bij tijdsafhankelijke berekening). Deze wordt getoetst aan de duurlijnenbundels van de verschillende vegetatietypes in het vegetatievoorspellingsmodel Duraveg. Hierbij wordt gebruik gemaakt van de punten van de voorspelde duurlijn die corresponderen met 10%, 50% en 90% overschrijdingsduur. Hiermee ligt de duurlijn qua vorm grotendeels vast. De punten voor 0% en 100% overschrijdingsduur komen overeen met slechts kortdurende extremen. Ze wegen daarom beter niet mee in de voorspelling.

Figuur 6 geeft schematisch weer hoe Duraveg tewerk gaat. Naargelangekende beperkingen aan de actuele of toekomstige chemische eigenschappen van het gebied, en/of wegens het van nature niet voorkomen van bepaalde vegetatietypes in een grote regio, kunnen bepaalde vegetatietypes aan de te toetsen set van vegetatietypes bij voorbaat worden onttrokken. Indien van bepaalde gebieden een beheersvorm wordt vooropgesteld, kan daarnaast de beperking worden opgelegd om enkel te toetsen aan die vegetatietypes die bij dat beheer kunnen voorkomen. Er dient minstens te worden aangegeven waar, als gevolg van beheer, bosontwikkeling wordt toegelaten en waar niet. Alle vegetatietypes waarvoor de drie toetsingspunten van de berekende duurlijn tussen de onder- en bovengrens liggen van de duurlijnenbundel van het type, worden weerhouden. Een verdere selectie onder deze vegetatietypes gebeurt op basis van de bodemeigenschappen van het knooppunt, afgeleid van de bodemkaart. Meestal hebben in deze fase nog enkele vegetatietypes de selectie doorstaan. Indien gewenst kunnen nu potentiële-verspreidingskaarten worden gemaakt per vegetatietype, die een basis vormen voor verdere interpretatie op basis van specifieke kennis van het gebied, kennis van naburige plantenpopulaties, enz. (welke van de geselecteerde vegetatietypes op een plek zullen in realiteit meest waarschijnlijk ontwikkelen?).

In Duraveg is een extra stap voorzien, waarbij uit de geselecteerde set vegetatietypes automatisch één type wordt gekozen. Dit gebeurt volgens een vaste rangschikking ('prioritering') van de vegetatietypes van minst naar meest droogtetolerant en, ondergeschikt hieraan, van deze met een nauwe duurlijnenbundel (meest kwetsbaar) naar deze met een brede duurlijnenbundel (minst kwetsbaar). Het eerste vegetatietype in dit rijtje wordt gekozen. Dit is het natste en meest kwetsbare type dat potentieel kan

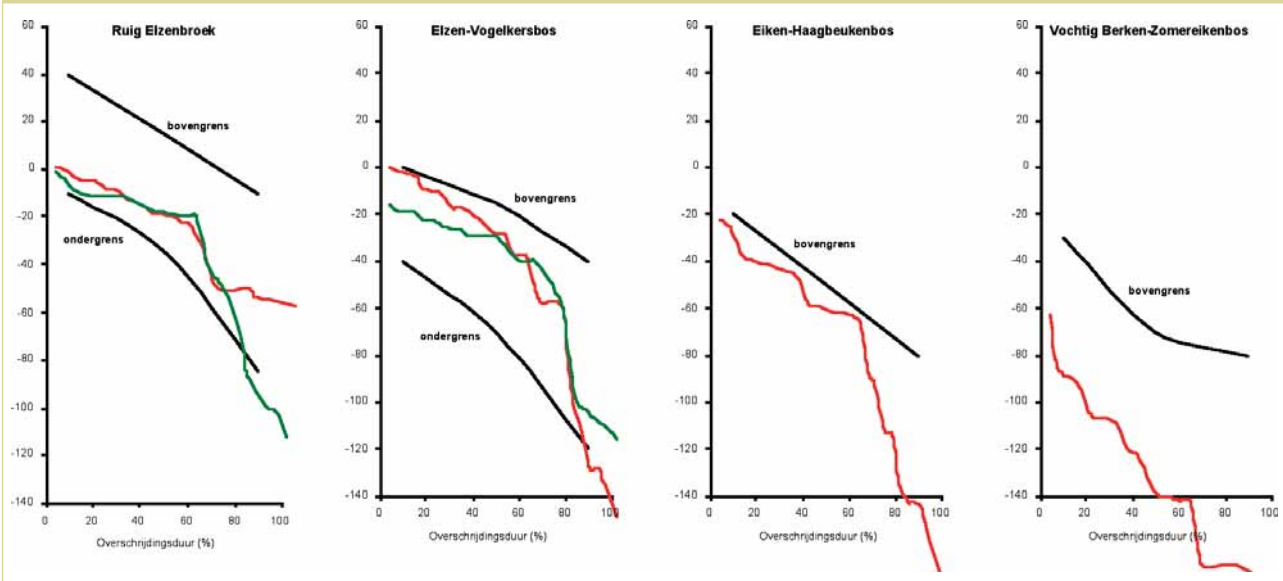


Fig. 5: De bandbreedtes van enkele bostypes voor de toetsing van duurlijnen. Enkele duurlijnen uit het studiegebied zijn weergegeven in kleur (peilbuisgegevens 2001-2002).

voorkomen volgens de opgegeven knooppunteigenschappen (duurlijn, bodem en beheer). Deze 'maximale potentie' onder de gegeven situatie, kan voor de beheerder immers een interessant referentiepunt zijn. Er dient dan voor deze potentie verder bekeken te worden welke andere randvoorwaarden nog een knelpunt of onmogelijkheid kunnen betekenen (in het bijzonder chemische milieukwaliteit), mocht men deze potentie willen ontwikkelen, via interpretatie op basis van literatuur, bijkomende gegevens of ervaring. Het is dus belangrijk te beseffen dat de voorspelde potentie bij standaard toepassing van Duraveg niet altijd realiseerbaar zal zijn, maar dat het wel een maximaal beeld geeft van welke vegetatietypes het ecosysteem zou kunnen herbergen omwille van zijn fysische kenmerken.

In Duraveg gebeurt de bovenstaande toetsing geautomatiseerd voor elk knooppunt van het grondwatermodel, zodat gebiedsdekkende potentievoorspellingen gedaan kunnen worden (Fig. 3, Fig. 8).

Onzekerheden van een modelresultaat

De belangrijkste rol van grondwater- en vegetatiemodellen is inzicht te bieden in de werking van het ecosysteem. Daarmee bedoelen we bv. de verschillen in grondwaterstand, kweldruk en vegetatiepotentie tussen verschillende deelzones en de mate waarin deze systeemkenmerken reageren op hydrologische ingrepen. Modellen dienen in de eerste plaats om bestaande overtuigingen te toetsen of uit te dagen (Oreskes et al. 1994). Een stuk voorzichtiger moet men zijn wanneer men de absolute voorspelde waarden interpreteert (bv. grondwaterstand, kweldruk, vegetatiepotentie): omdat een model een nabootsing is van de werkelijkheid, kan het nooit een perfect resultaat opleveren.

Vooreerst kan het resultaat nooit beter zijn dan de kwaliteit van de invoergegevens, waarvan de hoogte van het maaiveld (boven zeeniveau), lokale neerslaggegevens en de precieze geologische ondergrond ter hoogte van elk knooppunt voorbeelden zijn van mogelijke onzekerheden die het resultaat beïnvloeden. Daarnaast zijn er tal van andere factoren die in de werkelijkheid de potentiële vegetatie beïnvloeden: chemische milieukwaliteit, betreding, de interacties tussen aanwezige plantenpopulaties, zaadbankpotenties, afstand tot zaadspersiebronnen, enz.

Omdat Duraveg geen mathematisch model gebruikt voor de voorspelling, maar enkel beslissingsregels, is het niet mogelijk om de resultaten statistisch te onderbouwen met betrouwbaarheidsintervallen. Wel is het mogelijk om resultaten van de gevoeligheidsanalyse van het grondwatermodel door te rekenen met Duraveg, zodat de effecten van onzekerheden in het grondwatermodel op vegetatiepotenties bekeken kunnen worden. Voor zover van een bepaalde plaats door deskundigen beoordeeld wordt dat met de huidige vegetatie de maximale potentie al is gerealiseerd, kan nagegaan worden of Duraveg er dezelfde potentie voorspelt (zie kadertekst: 'Vegetatiekartering versus potentievoorspelling').

Als Duravegvoorspellingen enkel rekening houden met fysische systeem-eigenschappen, en onzekerheden van resultaten moeilijk te kwantificeren zijn, waarom zouden we dan nog overwegen om aan de voorspellingen veel waarde te hechten? Hier volgen enkele belangrijke pluspunten van de werkwijze van Duraveg:

del simuleert gebiedsdekkend de grondwaterschommelingen en -stromingen. In deze studie is het model Triwaco gebruikt. Triwaco berekent de grondwaterstanden in functie van de tijd (zie kader: grondwatermodellering). Tevens wordt de positie berekend van zones met kwel, de corresponderende inzigggebieden en van zones met een neerslaglens (zie verder). De modellering van de grondwaterdynamiek wordt aangevuld met - en in zekere zin getoetst aan - metingen van grond- en oppervlaktewaterkwaliteit. Immers, waar kwel optreedt zijn

hogere ionenconcentraties te verwachten in het grondwater dan in inzigggebieden. Het grondwater in kwelgebieden was namelijk al een hele tijd onderweg in de ondergrond, waardoor het met mineralen is verrijkt. De chemische samenstelling van grond- en oppervlaktewater is twee keer geanalyseerd. De resultaten werden met beschrijvende statistiek verwerkt. Bij de interpretatie zijn tevens gegevens van bodemprofielen betrokken. De interpretatie van dit onderzoeksluik komt in dit artikel enkel aan bod bij de beschrijving van het grondwatersysteem.

Op basis van de uitvoer van het grondwatermodel kunnen op alle locaties in het gebied duurlijnen worden berekend. Durlijnen zijn tijdsduurcurves die aangeven gedurende welk aandeel van het jaar (%) het grondwater boven een bepaald niveau staat. Voor verdere uitleg met betrekking tot duurlijnen verwijzen we naar Vercoutere & De Becker (2004) en het kader: 'durlijnenbundels en vegetatievoorspelling'. Een ander computermodel, Duraveg, kan aan de hand van deze duurlijn en de gegevens over het bodemtype en het landgebruik (al dan niet bos-

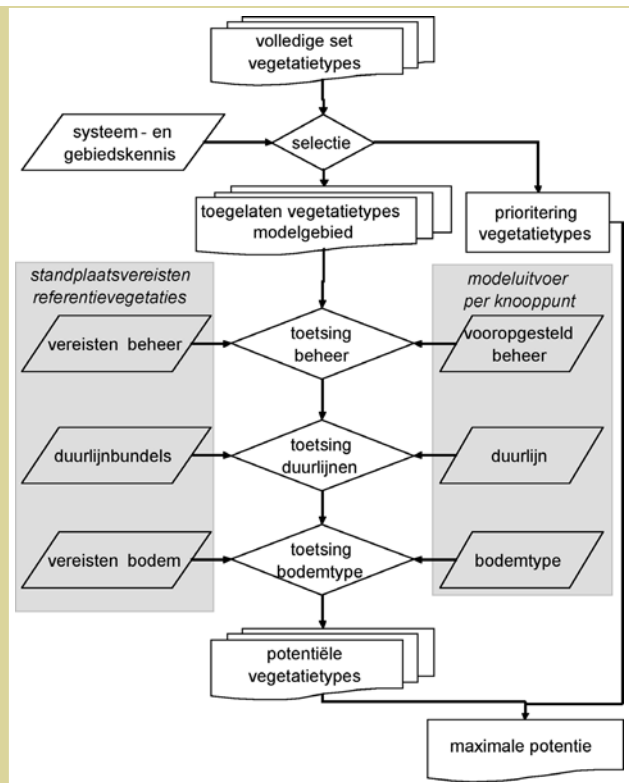


Fig. 6: Schematische voorstelling van de werkwijze van het vegetatievoorspellingsmodel Duraveg.

- het model steunt op een beperkt aantal verklarende variabelen: de 10%, 50% en 90% punten van de duurlijn, het bodemtype en de beheersvorm. Hoewel dit op het eerste zicht een onnauwkeurigheid lijkt, vergroot deze spaarzaamheid aan factoren de algemene toepasbaarheid en voorspellingscapaciteit. Wanneer veel factoren worden opgenomen, wordt ten onrechte 'ruis' gemodelleerd in de gebieden waar de basisgegevens van afkomstig zijn ('overfitting', zie Ginzburg & Jensen 2004), waardoor grote fouten kunnen ontstaan in doelgebieden (waar het model wordt toegepast).
- het is de verwachting dat de effecten van fysische variabelen op vegetatie over een groot regionaal gebied op een gelijke manier gelden. Dit vormt de hoofdreden waarom bij de ontwikkeling van Duraveg voor dit soort variabelen gekozen is. De effecten van chemische variabelen zijn meestal ook belangrijk, maar zelden naar dit geografisch niveau te veralgemenen. Hun effecten verschillen bv. op duinen en in de Kempen. Dit moet dus locatiegebonden bekeken worden.
- door met een vegetatiemodel te werken in combinatie met een grondwatermodel, is het mogelijk om vlakdekkende voorspellingen te doen.
- tenslotte is bewust gekozen voor de 10% en 90% punten, omdat kortdurende extremen in de natste (0-10%) en droogste (90-100%) perioden van het jaar een vertekend beeld kunnen geven van de gangbare grondwatercondities op een plaats.

ontwikkeling) een potentieel vegetatietype voorspellen op een gegeven plek, waar deze fysische standplaatskenmerken reeds aan voldoen. Daartoe wordt de berekende duurlijn vergeleken met gekende bandbreedtes van vegetatietypes. Voor het opstellen van de bandbreedtes is gesteund op Vlaamse en Nederlandse grondwaterpeilgegevens. Vervolgens dienen de voorspelde potenties alsnog geïnterpreteerd te worden met andere gegevensbronnen, zoals historisch of actueel aanwezige plantensoorten, chemische milieukwaliteit, betreding en de afstand tot zaadbronnen (voor meer info, zie kader: 'duurlijnenbundels en vegetatievoorspelling'). We spreken daarom van een 'fysisch gebaseerde potentie'.

Inzicht in het grondwatersysteem en de voorspelde vegetatiepotentie laten toe om bestaande inzichten voor het gebied te testen. Door vergelijking van de door de modellen voorspelde vegetatie met wat er nu op het terrein voorkomt, kunnen knelpunten naar voor komen. Beheeroplossingen kunnen worden voorgesteld en doorgerekend met het grondwater- en het vegetatiemodel. Zo kan het effect worden nagegaan van het dempen van een gracht op grondwaterstand of kwel, en vervolgens op de voorspelde vegetatiepotentie.

Grondwatersysteem: resultaten en interpretatie

De berekende waterstanden (jaargemiddelden) onderscheiden duidelijk de hogere en drogere gebieden van de nattere valleien. Onderaan figuur 7 is te zien hoeveel grondwater gemiddeld uit de grond treedt (kwel): hoe donkerder de kleur, hoe meer kwel. Opkwellend grondwater komt veel voor in Hoge Aard, 'Tussen Maas en Moor' en Zevenbergen. Dit grondwater is van lokale oorsprong; het is afkomstig van regenwater dat in de nabije heuvelruggen insijpelt. In de kwelzones brengt het kwelwater meer mineralen en basen naar de oppervlakte. Naar alle waarschijnlijkheid is deze mineralenrijkdom het gevolg van contact van dit water met het ondiepe, schelplenrijke substraat. In het Muizenbos is kwel afwezig in de winter. 's Winters wordt het regenwater er nauwelijks afgevoerd. Zo bouwt zich een regenwaterlens op die kwel onderdrukt en een zuurdere waterkwaliteit teweegbrengt, zoals vastgesteld bij chemische metingen.

Huidige versus potentiële vegetatie

De voorspelde bostypes komen goed overeen met de goed ontwikkelde bostypes op de vegetatiekaart (zie kader: 'vegetatiekartering versus potentievoorspelling'). In de natte, kwelgevoede valleien komt het Elzen-Vogelkersbos voor. Deze omstandigheden zijn voor dit bostype optimaal (Tabel 2). Op de drogere gronden komen Wintereiken-Beukenbossen en Eiken-Haagbeukenbossen voor.

Grondwatermodellering

Van het studiegebied en de omgeving is door middel van het programma TRIWACO een grondwatermodel opgesteld. Berekening van grondwaterstanden kan zowel voor een gemiddelde situatie (bv. 1 jaar) als tijdsafhankelijk. Een tijdsafhankelijk model berekent de waterstanden voor elk moment van het jaar, zodat duurlijnen berekend kunnen worden (zie tekst). Uitgebreide technische informatie over TRIWACO is te vinden in Solomatine et al. (1999), Zaadnoordijk (1999, 2003) en Zaadnoordijk & Strack (1993).

Het opstellen van een grondwatermodel verloopt in verschillende fasen:

1. Afbakenen van de modelgrenzen

Aan de grenzen van een grondwatermodel worden grondwaterstanden opgelegd. De grenzen zijn zodanig gekozen dat de berekeningsresultaten niet beïnvloed worden door de randvoorwaarden.

2. Opstellen van de schematisatie

Op basis van de geologische opbouw is een schematisatie van de ondergrond opgesteld. De basis van het hydrogeologisch systeem te Ranst wordt gevormd door de top van de Boomse Klei.

3. Opstellen van een rekennetwerk

In een grondwatermodel worden grondwaterstanden berekend volgens een rekennetwerk. Dit is een regelmatig of onregelmatig raster van vele met elkaar verbonden knooppunten. Voor het model te Ranst is gewerkt met een eindige-elementennetwerk, dat bestaat uit een netwerk gevormd door ongeveer 40.000 driehoekjes. Het dichter de knooppunten bij elkaar liggen en hoe kleiner de driehoekjes, hoe nauwkeuriger de berekeningen. In het kerngebied liggen de knooppunten minder dan 50 meter uit elkaar (bv. Muizenbos: 10 tot 40 meter).

4. Toekennen van de hydrogeologische parameters

Verschiedende eigenschappen van het watersysteem en de ondergrond worden gekenmerkt aan de hand van numerieke parameters, zoals de verdamping (afhankelijk van grondgebruik), het bodemtype (met een cijfercode), de diktes en de doorlatendheden van watervoerende lagen, de weerstanden van scheidende lagen en de natuurlijke grondwateraanvulling. Dit laatste is dat deel van de neerslag dat na verdamping het grondwater bereikt. In het kerngebied wordt de nuttige neerslag berekend op basis van neerslaggegevens, gecorrigeerd voor verdamping op verschillende bodemtypes en bij verschillende begroeiingen.

5. Kalibratie van het model

Na de toekenning van de parameters worden de grondwaterstanden berekend. De berekende stijghoogtes worden vervolgens vergeleken met de gemeten peilgegevens (2001-2002). De parameters worden dan bijgesteld om de berekende waterstanden zoveel mogelijk met de gemeten waarden te doen overeenkomen. In het kerngebied worden afwijkingen van minder dan 10 cm nagestreefd. Op die manier worden parameterwaarden bereikt, die de fysische situatie in het studiegebied zo goed mogelijk benaderen (doorlatendheid, laagdikte, ...).

6. Nauwkeurigheid van resultaten

Door welbepaalde parameters te wijzigen kan het effect van ingrepen in de waterhuishouding bepaald worden. Zo kan bijvoorbeeld het effect van het opstuwen of dempen van een beek of het kappen van een bos bestudeerd worden. Indien gewenst kan op het resultaat nog een gevoeligheidsanalyse doorgevoerd worden om zo de nauwkeurigheid van de resultaten kwantitatief vast te leggen. Hierbij wordt een vertaling gegeven van de onzekerheid die bestaat op de gecalibreerde parameters naar de nauwkeurigheid van het resultaat.

Een aantal bijzondere, niet-ontwikkelde potenties onder de huidige waterhuishouding worden door het model aangegeven. In de mineraalrijke valleien van de Merrebeek (Tussen Maas en Moor) en de Kleine Merrebeek (Hoge Aard) kunnen op de natste gronden verschillende types Dotterbloemhoiland ontwikkelen. Op iets schralere en minder natte, maar periodiek kwelgevoede plaatsen kan in principe Blauwgrasland ontwikkelen, op voorwaarde dat de bemesting sterk daalt én de soorten er kunnen geraken (Zwaenepoel et al. 2002). Onder andere het Glanshaverhoiland te Zevenbergen en de graslanden op de oostelijke valleiflank

van de Merrebeek (Tussen Maas en Moor) hebben de geschikte hydrologische eigenschappen voor Blauwgrasland. Verifiëring van deze ontwikkelingsmogelijkheden vergt weliswaar nader onderzoek, en het bereiken van bv. Blauwgrasland kan heel wat tijd vergen (zie verder). Potenties voor Kamgraslanden treffen we binnen het studiegebied aan in vochtige en zandige situaties.

Op de droogste gronden kunnen Glans- en Dwergghavergraslanden ontstaan. Glanshaverhoilanden domineren op de lemiger gronden. Afhankelijk van de zuurtegraad, stikstof- en basenrijkdom van de zandige bodems kunnen

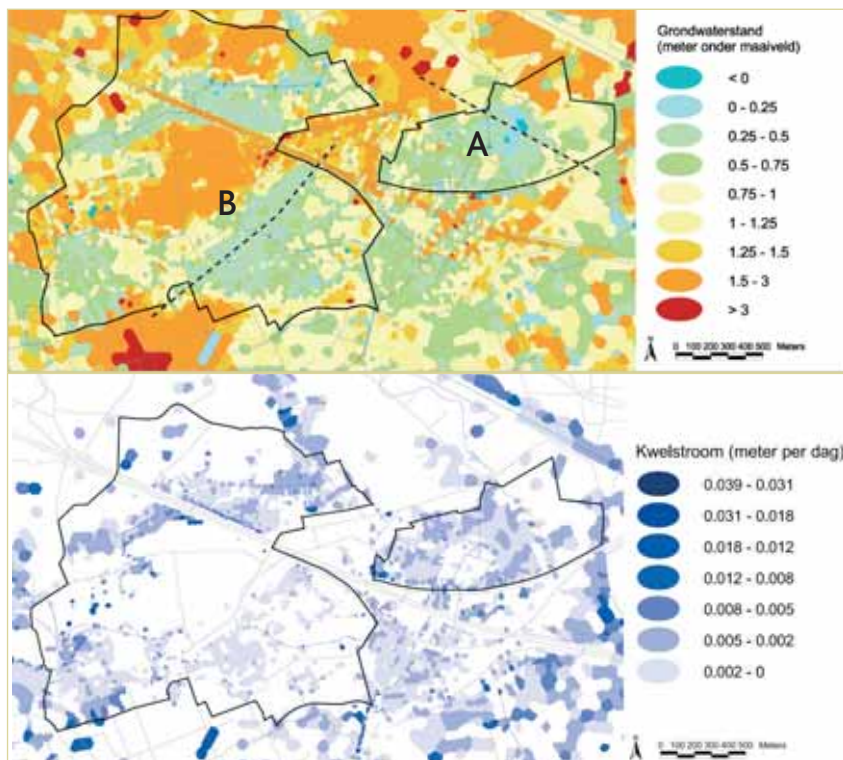


Fig. 7: Het grondwater te Ranst in een gemiddeld neerslagjaar. Boven: de berekende grondwaterstanden; onder: de berekende kwelstroom. In de bovenste afbeelding is de ligging van de profielen weergegeven van Fig. 8.

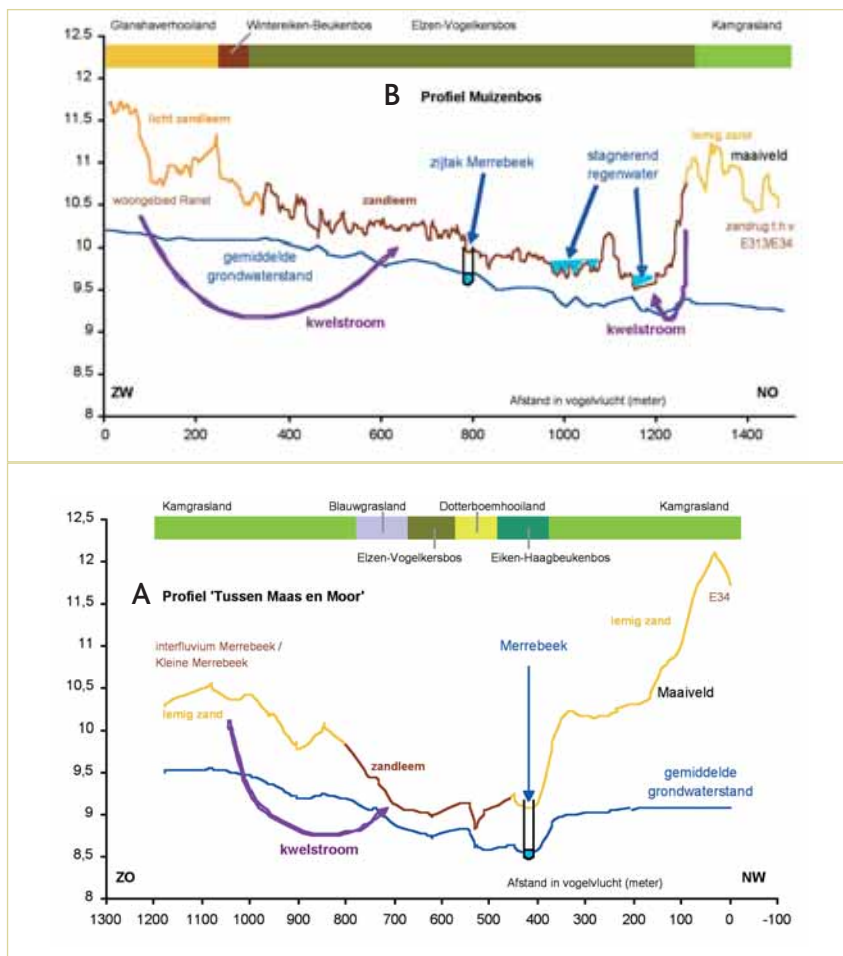


Fig. 8: Schematische doorsneden door het Muizenbos (boven) en de vallei van de Merrebeek in 'Tussen Maas en Moor' (onder). Bodemtype en potentiële vegetatie zijn weergegeven. De ligging van de doorsneden is te zien in Fig. 7.

zowel Dwerg havergrasland als Heischraal grasland ontwikkelen (Schaminée *et al.* 1996, Zwaenepoel *et al.* 2002).

Het dient vermeld dat de ontwikkeling van voorspelde potenties lang op zich kan laten wachten, met name in graslanden, als gevolg van het huidige agrarische gebruik. Aanvullende ingrepen ter verschraving kunnen dan ook nodig zijn (bv. plaggen). Het best wordt dit gebaseerd op specifiek onderzoek, zoals bijvoorbeeld de chemische analyse van de bodem van een perceel. De effectieve realiseerbaarheid van potenties (rekening houdend met lokale factoren; zie kader: 'duurlijnenbundels en vegetatievoorspelling'), van ontwikkelingstermijnen en van lokale beheermaatregelen dient veelal op perceelniveau te worden ingeschat. Dit viel echter buiten het doel van deze studie. Uit vergelijking van de actuele vegetatie met de voorspelde potenties voor het gebied zijn enkele knelpunten aan te halen. Zo komen heel wat dennen- en populierenbossen voor waar potenties zijn voor natuurlijke bossen zoals Wintereiken-Beuken- of Elzen-Vogelkersbossen (zichtbaar in de ondergroei). In het Muizenbos is het laatstvernoemde type zeer goed ontwikkeld. De meeste graslanden zijn nu in klassiek landbouwgebruik en hebben hierdoor een beperkte natuurwaarde. De fysisch gebaseerde potentievoorspellingen zijn er nochtans hoog bij de huidige waterhuishouding (Blauwgrasland, Dotterbloemhooiland, Glanshaverhooiland, Kamgrasland, Dwerg havergrasland). Of deze potenties in de praktijk op korte termijn gerealiseerd kunnen worden, is echter niet geweten (zie eerder).

Over het Elzen-Vogelkersbos

Door kennis van het grondwatersysteem is het mogelijk het voorkomen van Elzen-Vogelkersbos beter te begrijpen. In de deelgebieden Zevenbergen, 'Tussen Maas en Moor' en Hoge Aard is het Elzen-Vogelkersbos afhankelijk van kwelwater. Zonder dit kwelwater geraakt de mineralenrijkdom van het schelpensubstraat immers niet tot in de wortelzone van het bos. Door met een grondwatermodel te werken, leren we dat niet louter het schelpensubstraat, maar de combinatie 'schelpensubstraat + kwel' de factor is voor het voorkomen van dit bostype in de meeste valleistukken.

De resultaten voor het Muizenbos nuanceren de hier bestaande hypothese over het schelpensubstraat. In het noorden ontbreken zowel een oppervlakkige schelphoudende laag als kwel, zodat een zuurder en armer bostype voorkomt. Het beperkt of achterwege blijven van drainage zorgt er voor stagnatie van regenwater, wat de kwelinvloed onderdrukt. Het zuidelijke deel van het Muizenbos wordt beter gedraineerd en de basenrijke schelpenlaag zit dicht aan de oppervlakte, zodat de typische variant van het Elzen-Vogelkersbos er voorkomt.

Met Duraveg kan eenvoudig de fysisch gebaseerde potentie worden nagegaan onder een

Karteringseenheid (Fig. 3 boven)	Overeenkomstig syntaxon
Wintereiken - Beukenbos	Fago - Quercetum petraeae Tüxen 1955
Eiken - Haagbeukenbos	Stellario - Carpinetum Oberdorfer 1957
Elzen-Vogelkersbos - goed ontwikkeld	Pruno - Fraxinetum Oberdorfer 1953
Elzen-Vogelkersbos - zuur	Pruno - Fraxinetum Oberdorfer 1953 - zure groep
Elzen-Vogelkersbos - onvolledig ontwikkeld	Macrophorbio - Alnetum Lemée 1937
Verbossende ruigte	Macrophorbio - Alnetum Lemée 1937
Verruigde weide	RG Holcus lanatus - [Arrhenatheretalia]
Vochtige soort - enrijke weide	Lolio - Potentillion anserinae Tüxen 1947
Glanshaverhooiland	Arrhenatheretum elatoris Koch 1926
Voorspelde potentie (Fig. 3 onder)	
Elzen - Vogelkersbos	Pruno - Fraxinetum Oberdorfer 1953
Eiken - Haagbeukenbos	Stellario - Carpinetum Oberdorfer 1957
Wintereiken - Beukenbos	Fago - Quercetum petraeae Tüxen 1955
Dotterbloemhooiland	Calthion palustris Tüxen 1937
Blauwgrasland	Cirsio dissecti - Molinietum Sissing et De Vries ex Westhoff 1949
Kamgrasland	Lolio - Cynosuretum Braun - Blanquet et De Leeuw ex Tüxen 1937
Glanshaverhooiland	Arrhenatheretum elatoris Koch 1926
Dwerghavergrasland	Thero - Airion Tüxen 1951

Tabel 1: Betekenis van de gebruikte karteringseenheden en potenties. Nomenclatuur naar van der Werf (1991), Stortelder et al. (1999) en Durwaal et al. (2000) voor bostypes en naar Schaminée et al. (1996) en Zwaenepoel et al. (2002) voor graslandtypes.

	Broekbos (waterstand boven maaiveld)	Nat bos (waterstand tot aan maaiveld, droger in zomer)	Vochtig bos	Droog bos
Mineraalarm	Elzenberkenbroek		Berken - zomereikenbos	Wintereiken-beukenbos
Matig mineraalrijk	Elzenbroek	Elzen-eikenbos	Vochtig wintereiken - beukenbos	Wintereiken-beukenbos
Mineraalrijk	Elzenbroek	Elzen-vogelkersbos	Eiken - haagbeukenbos	

Tabel 2: Schematische relatie tussen bostypes en hun milieu te Ranst, gebaseerd op van der Werf (1991). Zie Tab. 1 voor duiding van de vegetatietypes.

gewijzigd beheer of landgebruik (niet weergegeven). Zo is berekend dat de locaties van potentieel Blauwgrasland goed overeenkomen met deze van potentieel (of huidig) Elzen-Vogelkersbos. Dit geeft aan dat men op heel wat locaties de twee richtingen verder kan onderzoeken om waardevolle natuur te ontwikkelen. De fysische vereisten voor beide vegetatietypes zijn immers al voldaan. Om de ontwikkelingsmogelijkheden verder na te gaan, moet voor elke lokale situatie (perceelniveau) worden nagegaan of het mogelijk is de chemische vereisten van bodem en grondwater, voor het ene of het andere type, te realiseren over een zekere termijn (zie eerdere bemerkings).

Knelpunten en optimale inrichting

Uit vergelijking van de actuele vegetatie met de voorspelde potenties voor het gebied werden al enkele knelpunten aangehaald (zie eerder). Uit de kennis van het grondwatersysteem was af te leiden dat een neerslaglens de kwel in het noorden van het Muizenbos onderdrukt. Omdat bovendien een ondiepe schelpenlaag ontbreekt, kan zich hier geen Elzen-Vogelkersbos ontwikkelen. Een te natte situatie kan dus net zo goed kwel aan maaiveld verhinderen als verdroging dat kan. Knelpunten als deze, en mogelijke oplossingen, kunnen slechts duidelijk wor-

den door met een grondwatermodel te werken. Het gaat immers om een fragiel evenwicht tussen kwel als gevolg van net genoeg drainage, en afwezigheid van kwel als gevolg van te weinig drainage (regenwaterstagnatie) of te veel drainage (kwel direct afvoeren naar beken).

Uit vergelijking van de berekende duurlijnen met de referentieduurlijnen blijkt dat voor de meest waardevol geachte vegetaties de wintergrondwaterstand zeker hoog genoeg is, maar dat de zomergrondwaterstand eerder laag is. Dit kan verholpen worden door maatregelen die 's zomers het kwelwater ophouden maar 's winters de drainage van regenwater niet beletten, zoals verondiepen van grachten of afvoer van regenwaterlenzen.

Om aan al deze knelpunten het hoofd te bieden is een scenario van optimale inrichting opgesteld. In het Zevenbergenbos en het Muizenbos worden enkele grachten verondiept. Hetzelfde is opgelegd voor de Merrebeek en de Schawijkbeek, die beiden een sterk ontwaterende invloed hebben op de gebieden Zevenbergen en 'Tussen Maas en Moor'. De te beperkte kwel in het noordelijke deel van het Muizenbos wordt bevorderd door dit stuk met ondiepe greppels te draineren. Twee schijnbaar tegenstrijdige maatregelen (minder of meer drainage) worden dus toegepast ten voordele van natuur.

Actueel komen in het gebied geen Blauwgraslanden voor. In de nabijgelegen Schijnvallei zijn wel relicten van Blauwgraslanden gekend, maar de afstand tot Ranst is mogelijks te groot voor de soorten om deze te kunnen overbruggen.

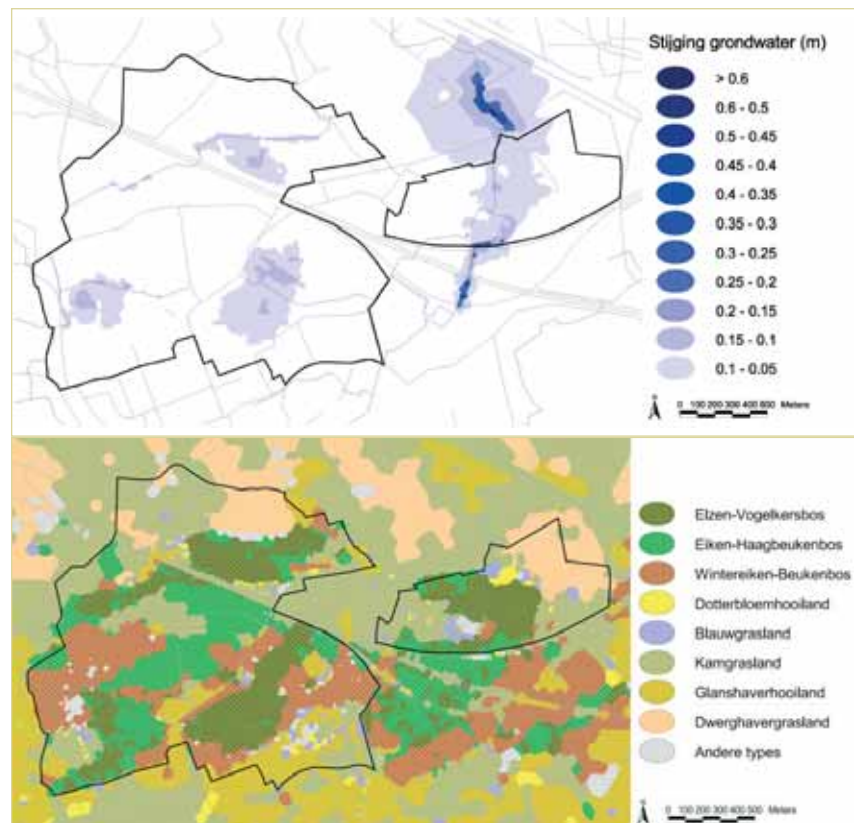


Fig. 9: Het Bos van Ranst in een gemiddeld neerslagjaar, na ecologisch optimale ingrepen. Boven: de berekende vernatting (jaargemiddelde); onder: de potentiële vegetatietypes.

Misschien kunnen enkele soorten nog kiemen uit zaadbanken.

De dennen- en populierenaanplanten zouden spontaan kunnen evolueren naar natuurlijke bostypen. Onderzoek in het Muizenbos toont aan dat bebossingen met populieren op landbouwgronden, die aansluiten bij goed ontwikkelde kernen van Elzen-Vogelkersbos, goede mogelijkheden hebben om op termijn van een eeuw te ontwikkelen tot soortenrijke bossen (De Keersmaeker *et al.* 2004). Het beheerplan van het Muizenbos kiest er dan ook voor het populierenbos spontaan te laten ontwikkelen tot een bos met inheemse boomsoorten zoals Gewone es en Zomereik. Graslanden en akkers worden verschaald. Om de versnippering tegen te gaan, zouden bossen meer aaneengesloten moeten kunnen ontwikkelen. In het scenario van optimale inrichting is gekozen voor bosuitbreiding, verschralling en de bovenstaande ingrepen in de waterhuishouding.

Vegetatievoorspelling na inrichting

De hydrologische ingrepen voor optimale ecologische inrichting werden geschematiseerd in het grondwatermodel. Op deze manier zijn nieuwe grondwaterstanden berekend. De modellering maakt het dus mogelijk de effecten te evalueren zonder de ingrepen reeds in praktijk te brengen. In vergelijking met de huidige situatie stijgt de gemiddelde grondwaterstand in een aantal zones. Onderaan de figuur zijn de potentievoorspellingen weergegeven van het Duraveg-model. Van het prioritair habitat Elzen-Vogelkersbos kan zo'n 9 ha extra ontwikkelen. Het zal door de toegenomen kwel ook beter ontwikkeld zijn in het noorden van het Muizenbos. Opnieuw moeten we beseffen dat bij de potentievoorspelling aangenomen wordt dat er ook andere dan fysische vereisten zijn (zoals chemie en aanwezige populaties).

Bij natuurbeheer in de depressies kan vaak de keuze gemaakt worden tussen ontwikkeling van Elzen-Vogelkersbos ofwel van Dotterbloemhooiland of zelfs Blauwgrasland. Gezien de bescherming als habitatrichtlijngebied legt dit scenario de nadruk op bosontwikkeling. Ook de keuze voor een hooilandbeheer kan op termijn ecologisch waardevolle resultaten opleveren. Dit geldt vooral op plaatsen waar typische hooilandsoorten nog (marginaal) aanwezig zijn, zoals in 'Tussen Maas en Moor'. Bij het opstellen van een beheerplan voor het gebied kan deze afweging verder onderbouwd worden.

Conclusie en nabeschuiving

Het grondwatermodel heeft toegelaten, mits een beperkte toegestane foutenmarge, het grondwatersysteem in Ranst te doorgronden. De kwelzones, neerslaglenzen en de grondwaterdynamiek zijn hierdoor ook te voorspellen in gewijzigde hydrologische situaties. Niet louter het schelpensubstraat, maar zowel het schelpensubstraat als de kwel zijn nodig voor het voorkomen van het Elzen-Vogelkersbos in de meeste valleistukken. Via vegetatiemodellering is aangegeven dat in verschillende graslanden de fysische voorwaarden vervuld zijn voor het ontwikkelen van ondermeer Dotterbloemhooiland of Blauwgrasland, en in diverse dennen- en populierenbossen voor meer natuurlijke bostypen.

De studie van het Bos van Ranst is slechts één voorbeeld dat aantoont hoe belangrijk het is om de hydrologische werking van het systeem te begrijpen wanneer men ingrepen overweegt. Op basis van grondwatermodellen zijn ook in andere gebieden ecohydrologische studies gebeurd. Om gebiedsdekkende uitspraken te kunnen doen, dient het ecosysteem met een grondwatermodel te worden gesimuleerd. Grondwater- en vegetatiemodellen zijn een hulpmiddel om inzicht te verkrijgen in gebiedseigen voorwaarden voor de ontwikkeling van bepaalde natuurtypes. Ook komen zo onverwachte knelpunten (bijvoorbeeld te natte situaties) en potenties (bijvoorbeeld Blauwgrasland) aan het licht. Het resultaat van een model mag echter niet als een wetmatigheid worden beschouwd. Onnauwkeurigheden zijn eigen aan elke nabootsing van de werkelijkheid, en zijn te wijten aan de begrensde detailgraad van invoergegevens en aan de veelheid aan factoren waar modellen moeilijk rekening mee kunnen houden. Idealiter dient deze onnauwkeurigheid met cijfers te worden uitgedrukt.

We pleiten voor een bewust stapsgewijze aanpak bij de inrichting van natuurgebieden en het maken van toekomstvisies. Deze bestaat erin eerst te evalueren wat de mogelijkheden en beperkingen zijn binnen de fysische systeemwerking. De bestaande natuurdoelstellingen moeten desnoods in die zin worden aangepast, anders zijn ze niet haalbaar op duurzame basis. Een vegetatiemodel als Duraveg is een nuttig instrument als hulpmiddel bij deze analyse: een potentiële vegetatie wordt voorspeld voor een

Vegetatiekartering versus potentievoorspelling

Om na te gaan in hoeverre voorspelde potenties overeenkomen met de gekarteerde situatie, is een eenvoudige analyse gemaakt van de overeenstemming tussen beide kaarten in figuur 3. Hier toe is een regelmatig puntenraster gebruikt met een interval van 25 meter. Per punt is geregistreerd welk vegetatietype er is gekarteerd en welke vegetatiepotentie met Duraveg is voorspeld. Daarbij zijn enkel punten gebruikt binnen het gekarteerde gebied, en dan nog alleen de punten waar de potentievoorspelling voor bostypen dan wel graslandtypen overeenkomt met de huidige aanwezigheid van bos en grasland (2062 van 2313 punten, 89%). Voor sommige graslanden werd immers de potentie voor bosontwikkeling nagegaan.

Het resultaat is sterk verschillend voor grasland en bos: voor graslanden is de overeenkomst 0%, voor bossen 58%. De 'mismatch' van de graslanden komt vooral doordat van de vaakst gekarteerde types geen overeenkomstig Duraveg-type bestaat (91% van de 481 graslandpunten). In Duraveg ontbreken immers vele onverzadigde plantengemeenschappen (zoals graslanden in landbouwgebruik); het is bij een fysisch gebaseerde inschatting van potenties ook niet de bedoeling om deze te gaan voorspellen. In bossen (Tabel 3) wordt een redelijke overeenkomst vastgesteld (58%). Hierbij is optimistisch terwerk gegaan met het gekarteerde 'Elzen-Vogelkersbos', dat zowel de associaties Vogelkers-Essenbos als Ruigte-Elzenbroek betreft (Tabel 1): voorspelde potentie voor het Duravegtype 'Elzen-Vogelkersbos' (omvat slechts de associatie Vogelkers-Essenbos) is als overeenstemmend beschouwd. Duraveg selecteert immers de associatie Vogelkers-Essenbos waar dit fysisch mogelijk is, en juist deze associatie omdat ze vroeg in de rangschikking van vegetatietypes voorkomt (maximale potentie). In 58% van de punten leunt de gekarteerde vegetatie dus aan bij de voorspelde potentie. Veel hogere overeenkomsten met de werkelijke situatie zal men in het algemeen niet kunnen verwachten, juist omdat het om potenties gaat. Tevens speelt de grofschaligheid van de vegetatiekaart mee in dit resultaat.

	Wintereiken- Beukenbos	Elzen - Vogelkersbos	Eiken - Haagbeukenbos
Wintereiken - Beukenbos	16.0%	2.4%	16.3%
Elzen - Vogelkersbos - onvolledig ontwikkeld / Verbossende ruigte	7.3%	7.5%	2.4%
Elzen - Vogelkersbos - goed ontwikkeld	5.1%	22.3%	2.3%
Elzen - Vogelkersbos - zuur	2.0%	5.3%	0.1%
Eiken - Haagbeukenbos	0.9%	2.7%	7.6%

Tabel 3: Verband (procent van aantal bospunten) tussen gekarteerde bostypes (links) en voorspelde bospotenties (boven). Overeenkomstige types zijn gemarkeerd.

bepaalde combinatie van duurlijn (grondwater-regime), bodemtype en landgebruik, dus uitgaande van fysische kenmerken van het ecosysteem. Vervolgens dient het aspect van water- en bodemkwaliteit onderzocht, en dient nagegaan of aan knelpunten kan worden tegemoet-

gekomen. Tenslotte dienen andere invloeden en bijkomende randvoorwaarden onderzocht, zoals aanwezigheid van populaties, zaadbanken, betreding, enz. Deze stapsgewijze aanpak biedt een grote meerwaarde om de biodiversiteit van een gebied te maximaliseren en duur-

zaam te beheren. Een omgekeerde redenering (vanuit gewenste soorten, zonder abiotische onderbouwing) loopt het risico om tot zinloze acties te leiden.

SUMMARY BOX:

STUCKENS JAN, VANDERHAEGHE FLORIS, CARRON TOM & DEHEEGHER KOEN 2005. Nature conservation and groundwater modelling. *Natuur.focus* 4 (4): 128-136.

Good insight in the hydrological system is essential in planning water and nature management. Understanding local hydrology requires a groundwater model. A major advantage of the modelling approach is the possibility of predicting scenarios of altered hydrological situations, such as damming a rivulet or draining a parcel. When used in combination with a vegetation model, a potential for specific vegetation types can be predicted, based on physical conditions of groundwater dynamics, soil type and land use. Feasibility of creating or restoring these potential vegetation types in real situations needs further investigation, however, especially for grasslands. Local chemical and plant population

biological assessments are needed to estimate terms and chances to attain these potentials. The modelling approach is demonstrated by means of a case-study at Ranst, in the north of Belgium. Certain areas at Ranst are characterised by *Pruno-Fraxinetum*, an alder forest type of the *Alno-Padion* alliance and priority habitat of the Habitat Directive. The groundwater model Triwaco and the vegetation model Duraveg were used. As a result, the functioning of the groundwater system was analysed. The local factors determining the development of *Pruno-Fraxinetum* are discussed. It was found that development of *Pruno-Fraxinetum* can be enhanced by slightly draining a specific site in order to allow groundwater discharge, and by reducing the drainage by several rivulets elsewhere. An optimal scenario is elaborated, also taking into account the development of other vegetation types.

DANK:

De auteurs wensen Guy Geudens, Bart Vercoetere, Luc De Keersmaeker en twee anonieme lectoren te danken voor het nalezen van eerdere versies. De studie gebeurde in opdracht van AMINAL afdeling Natuur.

AUTEURS:

Jan Stuckens en Floris Vanderhaeghe zijn ecohydroloog bij het studie bureau Haskoning. Zij beoordelen potenties voor natuurontwikkeling en geven beheeradviezen. Tom Carron, hydroloog bij Haskoning, verzorgt de modelleringen en interpreteert het grondwatersysteem. Koen Deheegher coördineerde de studie over het Bos van Ranst, als leidend ambtenaar bij AMINAL afdeling Natuur.

CONTACT:

Jan Stuckens, Floris Vanderhaeghe, Tom Carron: Haskoning Belgium, Hanswijkdries 80, 2800 Mechelen (j.stuckens@haskoning.be)
Koen Deheegher: AMINAL afdeling Natuur, Copernicuslaan 1 bus 7, 2018 Antwerpen (koen.deheegher@lin.vlaanderen.be)

Referenties

- Adriaens D., Verheyen K., De Keersmaeker L. & Hermy M. 2000. Het Kluizenaarsbestaan van *Ornithogalum pyrenaicum* (L.) in het Muizenbos te Ranst (prov. Antwerpen). *Dumortiera* 76: 11-17.
De Becker P., Jochems H. & Huybrechts W. 2004. Onderzoek naar de abiotische standplaatsvereisten van verschillende beekbegeleidende *Alno-Padion* & *Alnion incanae*-gemeenschappen. Rapport Instituut voor Natuurbehoud IN.O.2004.1, Brussel.
De Keersmaeker L., Martens L., Verheyen K., Hermy M. & Lust N. 2004. Impact of soil fertility and insolation on diversity of herbaceous woodland species colonizing afforestations in Muizen forest (Belgium). *Forest Ecology and Management* 188: 291-304.

- Durwael L., Roelandt B., De Keersmaeker L. & Lust N. 2000. Systematiek van natuurtypen voor Vlaanderen: 10. Bossen. Rapport Laboratorium voor Bosbouw, Universiteit Gent, Gent.
Everts F.H. & de Vries N.P.J. 1991. De vegetatieontwikkeling van beekdalsystemen; een landschap-ecologische studie van enkele Drentse beekdalen. Thesis Rijksuniv. Groningen, Historische Uitgeverij Groningen.
Ginzburg L.R. & Jensen C.X.J. 2004. Rules of thumb for judging ecological theories. *Trends in Ecology and Evolution* 19 (3): 121-126.
Grootjans A.P. 1985. Changes of groundwater regime in wet meadows. Thesis Rijksuniv. Groningen.
Haskoning Belgium 2003. Ecohydrogeologische studie van Habitatrichtlijngebied nr. 17 'Bos- en heidegebieden ten oosten van Antwerpen'. Deelgebied Bos van Ranst en de omgeving van het gebied 'Tussen Maas en Moor'. Rapport i.o.v. AMINAL afdeling Natuur Antwerpen, Mechelen.
Niemann E. 1963. Beziehungen zwischen Vegetation und Grundwasser. *Archiv der Naturschutz Landesforschungen* 3: 3-36.
Oreskes N., Shrader-Frechette K. & Belitz K. 1994. Verification, validation, and confirmation of numerical models in the earth sciences. *Science* 263: 641-646.
Schaminée J.H.J., Stortelder A.H.F. & Weeda E.J. 1996. De vegetatie van Nederland. Deel 3. Plantengemeenschappen van graslanden, zomen en droge heiden. Opulus Press, Uppsala/Leiden.
Solomatine D.P., Dibike Y.B. & Kukuric N. 1999. Automatic calibration of groundwater models using global optimization techniques. *Hydrological Sciences Journal* 44: 879-894.
Stortelder A.H.F., Schaminée J.H.J. & Hommel P.W.F.M. 1999. De vegetatie van Nederland. Deel 5. Plantengemeenschappen van ruigten, struwelen en bossen. Opulus Press, Uppsala/Leiden.
Sýkora K.V. 1983. The *Lolio-Potentillion anserinae* (Tüxen 1947) in the northern part of the Atlantic domain. Thesis Cath. Univ Nijmegen, Stichting Studententpers Nijmegen.
Tüxen R. 1954. Pflanzengesellschaften und Grundwasser-Ganglinien. *Angewandte Pflanzensoziologie* 8: 64-96.
van der Werf S. 1991. Natuurbeheer in Nederland, deel 5. Bosgemeenschappen. Pudoc, Wageningen.
Vercoetere B. & De Becker P. 2004. Beenbreek: een analyse van de ecologische eisen van deze heideplant. *Natuur.focus* 3 (4): 112-119.
Verheyen K., Adriaens D., Hermy M. & Deckers S. 2001. High-resolution continuous soil classification using morphological soil profile descriptions. *Geoderma* 101: 31-48.
Verheyen K. & Hermy M. 2001. An integrated analysis of the spatio-temporal colonization patterns of forest plant species in a mixed deciduous forest. *Journal of Vegetation Science* 12: 567-578.
Zaadoordijk W.J. 1999. Adapting a finite-element package for simulation of groundwater flow with variable density. In: De Breuck W. & Walschot L. (red.), Proceedings of the 15th Salt-Water Intrusion Meeting Ghent (Belgium), 25-29 May 1998. *Natuurwetenschappelijk Tijdschrift* 79 (1-4): 114-122.
Zaadoordijk W.J. 2003. Analytic expressions for output reliability: verifying automated calibration and confidence calculations of a groundwater flow simulator. *Water Resources Research* 39 (12): 1351.
Zaadoordijk W.J. & Strack O.D.L. 1993. Area sinks in the analytic element method for transient groundwater flow. *Water Resources Research* 29 (12): 4121-4130.
Zwaenepoel A., T'Jollyn F., Vandenbussche V., Hoffmann, M. 2002. Systematiek van natuurtypen voor het biotoop grasland. Rapport Westvlaamse Intercommunale / Universiteit Gent / Instituut voor Natuurbehoud, Brugge.