

University of Groningen

The water balance of forests under elevated atmospheric CO₂

Lankreijer, Henricus Johannes Maria

IMPORTANT NOTE: You are advised to consult the publisher's version (publisher's PDF) if you wish to cite from it. Please check the document version below.

Document Version

Publisher's PDF, also known as Version of record

Publication date:

1998

[Link to publication in University of Groningen/UMCG research database](#)

Citation for published version (APA):

Lankreijer, H. J. M. (1998). The water balance of forests under elevated atmospheric CO₂ s.n.

Copyright

Other than for strictly personal use, it is not permitted to download or to forward/distribute the text or part of it without the consent of the author(s) and/or copyright holder(s), unless the work is under an open content license (like Creative Commons).

Take-down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

Downloaded from the University of Groningen/UMCG research database (Pure): <http://www.rug.nl/research/portal>. For technical reasons the number of authors shown on this cover page is limited to 10 maximum.

**The water balance of forests under
elevated atmospheric CO₂**

RIJKSUNIVERSITEIT GRONINGEN

**The water balance of forests under
elevated atmospheric CO₂**

PROEFSCHRIFT

ter verkrijging van het doctoraat
in de Wiskunde en Natuurwetenschappen
aan de Rijksuniversiteit Groningen
op gezag van de
Rector Magnificus, dr. F. Van der Woude,
in het openbaar te verdedigen op
vrijdag 1 mei 1998
des namiddags te 1.15 uur

door

Henricus Johannes Maria Lankreijer

geboren op 27 mei 1964
te Zwolle

Promotores: Prof. dr. ir. P.J.C. Kuiper
Prof. dr. A.W.L. Veen †

Referent: Dr. W. Klaassen

Aan mijn ouders,

aan Ben

Cover photo: canopy reflection in water, ice and mosses
Norunda forest, Sweden
Photo adaptation in cooperation with Thomas Grelle

The study was conducted within the framework of the first stage of the Dutch National Research Program on Global Air Pollution and Climate Change (NRP I, 1990-1995) under project NOLK/015/90, supported by the Ministry of Housing, Physical Planning and Environment.

The research described was carried out at the :

*Department of Physical Geography
University of Groningen
Kerklaan 30
9751 NN Haren (Gn)
The Netherlands
Tel. +31 50 3636133*

*Present address:
H.J.M. Lankreijer
SLU
Department for Production Ecology
Box 7042
S 750 07 Uppsala
Sweden
Tel. +46 18 672519*

The water balance of forests under elevated atmospheric CO₂/ H.J.M. Lankreijer
Thesis Rijksuniversiteit Groningen - With references - With summary in Dutch
ISBN 90-367-0898-2

Contents

Voorwoord	vii
List of symbols, units and abbreviations	ix
Summary	xiii
Samenvatting	xvii
1. General introduction	
1.1 Climate and forest hydrology	1
1.2 Method of the study	4
2. Pilot study on Thetford Forest, U.K.	
2.1 Abstract	7
2.2 Introduction	8
2.3 Conceptual framework of forest water use	10
2.4 Method	12
2.5 Results	13
2.6 Conclusion	18
3. Stomatal conductance and photosynthesis as modulated by an changed atmospheric CO ₂ concentration	
3.1 Introduction	21
3.2 Stomatal conductance	23
3.3 The photosynthetic process	28
3.4 Effects of an increase of CO ₂ on tree functioning	29
3.5 Simulaton models of stomatal conductance	33
3.5.1 Regression models	33
3.5.2 Physiologically based models	36
3.6 Conclusion	40
4. Simulation of forest hydrology: model description	
4.1 Introduction	43
4.2 Simulation of the forest water balance	44
4.3 Simulation of soil water content	45
4.4 Rainfall interception model	46
4.5 Simulation of transpiration	49
4.5.1 The stomatal-photosynthesis model	50
4.5.2 Calculation of the canopy conductance	53
4.5.3 Derivation of CO ₂ assimilation parameters	57
4.6 Discussion	61
4.7 Conclusion	64

5. Simulation of forest hydrology: application of the FWB-model	
5.1 Introduction	65
5.2 Model validation	66
5.2.1 Data	66
5.2.2 Model initialisation	70
5.2.3 Simulation of rainfall interception	72
5.2.4 Discussion of rainfall interception	74
5.2.5 Simulation of transpiration	77
5.2.6 Discussion on simulation of transpiration	80
5.3 Sensitivity analysis	82
5.3.1 Results on sensitivity analysis	84
5.3.2 Discussion on sensitivity analysis	89
5.4 Conclusion	91
6. Effect of a climatic change on forest hydrology: description of a scenario study	
6.1 Introduction	93
6.2 Method	95
6.2.1 Meteorological data-set 'de Bilt', the Netherlands	95
6.2.2 Description of the meteorological scenarios	96
6.2.3 Change in vegetation parameters	99
6.3 Results and discussion	101
6.4 Conclusion	111
7. The effect of elevated atmospheric CO ₂ on forest hydrology: conclusions and recommendations	113
Appendix A. Default values Leuning-model, site-independent parameters	121
Appendix B. Normal climate and climate scenarios for 'de Bilt', the Netherlands	123
References	125
Curriculum Vitae	137

Voorwoord

Een lange weg is het geworden. Het eind was, uiteindelijk, langer dan het begin. Hoewel dit onderzoek theoretisch was en voornamelijk achter de computer gezeten werd uitgevoerd, is geen onderzoek mogelijk zonder de hulp van anderen. Hier in dit voorwoord wil ik ze bedanken voor hun hulp en ondersteuning in wat voor vorm dan ook.

In memoriam, Prof. Arthur Veen, mijn promotor. Hij was het die het idee oppakte en maakte tot een promotie onderzoek. Ik bedank hem voor zijn begeleiding en voor zijn zorg dat het onderzoek op de juiste koers bleef. Het is dan ook erg jammer dat hij het resultaat niet heeft mogen zien. Ik bedank hem niet alleen voor het begeleiden van mij maar ook voor het optreden als roerganger voor de gehele vakgroep Fysische Geografie en het boshydrologisch onderzoek vanuit Groningen.

Prof. Piet Kuiper wil ik bedanken voor het overnemen van de begeleiding in de laatste fase. Zijn actieve belangstelling en flexibiliteit hebben er mede voor gezorgd dat op het laatste moment het allemaal nog afgerond kon worden. Voor hem lag het onderwerp niet geheel in zijn onderzoeksgebied, maar toch wist hij er kordaat met goede raad er een juiste draai aan te geven.

Wim Klaassen, voor zijn geduld en doorzettingsvermogen. Zowel voor de theoretische achtergrond, als de praktische uitvoering gaf hij de basis. Hij fungeerde als klankbord en gaf regelmatig antwoord, zonder iets te hoeven zeggen. Hoeveel versies zijn er niet door zijn handen gegaan. Maar dankzij het rechtbuigen van mijn kromme redeneringen is het nu toch nog een echt verhaal geworden.

Dit onderzoek was een 'desk-top' studie; geen meting werd er door mij uitgevoerd. Het klimaat rond een bos is nu eenmaal niet makkelijk even te veranderen voor een testje. Dat gebeurde in de computer. Ik heb daarbij gebruik gemaakt van metingen en scenarios, uitgevoerd en beschikbaar gesteld door anderen. Dr. John Gash from the Institute of Hydrology in Wallingford is acknowledged for the use of the data of Les Landes, HAPEX-MOBILHY in France, and for the supply of the data of Thetford, England. Jag tackar Anders Lindroth, för ha givit mig möjligheter att använda data från Jädraås. Marja Hendriks van het Staring Centrum verschaftte mij de data van Ede, die in dit onderzoek het meest werden gebruikt. Niet alleen hiervoor wil ik haar bedanken, maar ook voor het beantwoorden van vragen, die in een tussensprint naar boven kwamen. De scenarios zijn ontwikkeld op het KNMI, maar via Bart Parmet van het RIZA in Lelystad ontving ik ze in een goed toepasbare vorm.

In de jaren dat ik in het laatste kamertje, 3 hoog achter in de gang huisde, waren de andere collega's daar, die op een of andere wijze bijdroegen aan dit verhaal. Nog voor het allemaal echt begon, was daar Han Dolman, die het idee vertaalde in een onderzoeksvoorstel. Met kamergenoot Ronald Hutjes en Bart Kruijt voerde ik de discussies over de inhoud, waarbij ik Bart met name wil bedanken voor zijn belangrijke bijdrage aan het uiteindelijke model. Jan Delvigne trad op als de engelse thesaurus en ik bedank hem voor de correcties die hij uitvoerde op de eerste versies van de tekst.

Henk de Groot, Jan van de Burg, Suus Bakker, Margit Gosen, Arjen de Vries, Peter van Breugel, Maarten van der Meulen bedank ik voor hun hulp en gezelligheid en Jan Willem van den Barg in het bijzonder voor zijn praktische computer hulp als die weer eens niet deed wat je wilde. Marjan Boertje hielp mij bij het schrijfwerk. Zij hoorde mijn problemen aan met WP terwijl ik

nog in Groningen zat en verzorgde de layout en afronding van de definitieve versie, nu ik in Uppsala zit. Marjan bedankt!!

Jag tackar Anders Lindroth också för att lita på mig, ge mig tillfället att jobba och att avsluta avhandling möjlighet and Jeremy Flowers-Ellis for going through the final chapter.

Op de lange weg naar het eind van dit verhaal, was plezier in het werk alleen niet meer voldoende. Het tekort werd aangevuld door de nodige ontspanning en de 'stok achter de deur'. Deze werden mee beleefd door vele mensen die ik ook wil bedanken, vooral omdat ze geïnteresseerd beleven naar hoe 'het' vorderde en of 'het' al klaar was. In het bijzonder Ben en Janine Moelliono voor de gezellige, motiverende en inspirerende avondjes, waarop Ben veel meer was dan hoogleraar op de universiteit. Zijn verhalen rond de tafel boeiden en verbreedde je kijk op zaken. Al in een vroeg stadium was hij het die voor de motivatie om te promoveren zorgde. Hoe vreemd het misschien ook klinkt, maar 'Tegenwind' blies mee in het verhaal samen met het balanceren op het water met de GKV en ik wil jullie allemaal bedanken voor de vele leuke sporturen. Daarnaast waren er Marion en Dethmer, die altijd klaar stonden met hulp, lekker eten en wijn en niet te vergeten hun unieke oranje kadettje. Verder Dirk, Mijnske, Frans en Marlies voor de leuke uurtjes waar dan ook. En natuurlijk Céleste, omdat ze er gewoon is.

Uppsala, februari 1998.

List of symbols, units and abbreviations

Abbreviations and acronyms

ABA	abscisic acid	
ATP	adenosinetriphosphate	
C ₃	assimilation with direct CO ₂ fixation in the Calvin cycle	
C ₄	assimilation of CO ₂ via C ₄ - acids	
CAM	Crassulacean acid metabolism	
CO ₂	carbon dioxide	
FWB	forest water balance	
GCM	General Circulation Model	
IPCC	Intergovernmental Panel for Climate Change	
JS	Jarvis-Stewart	
KNMI	Royal Netherlands Meteorological Institute	
LAI	leaf area index	
LAI _{MAX}	maximum leaf area index	
N	nitrogen	
NADPH	nicotinamide-adenine-dinucleotidephosphate	
NRP	National Dutch Research Program on Global Air Pollution and Climate Change	
O ₂	oxygen	
PAR	photosynthetically active radiation	molquanta m ⁻² s ⁻¹
PAR _α	absorbed photosynthetically active radiation	molquanta m ⁻² s ⁻¹
PGEN	photosynthesis general	
PBL	planetary boundary layer	
PM	Penman-Monteith	
RuBP	ribulose bi-phosphate	
Rubisco	ribulose bi-phosphate carboxylase	
WUE	water use efficiency	

Symbols

A	assimilation rate	mol m ⁻² s ⁻¹
A _c	carboxylation-limited rate of net photosynthesis	mol m ⁻² s ⁻¹
A _r	RuBP regeneration-limited rate of net photosynthesis	mol m ⁻² s ⁻¹
a _x	regression parameter, constant	
C _a	ambient CO ₂ concentration	mol m ⁻³
C _i	leaf internal CO ₂ concentration	mol m ⁻³
C _s	CO ₂ concentration at leaf surface	mol m ⁻³
c _p	specific heat of air	J kg ⁻¹ K ⁻¹

D	humidity deficit of the air	Pa
$D_{s,0}$	empirical constant in Leuning-model	Pa
d	zero plane displacement	m
E	evaporation rate	mm s ⁻¹
\bar{E}	average evaporation rate	mm s ⁻¹
E_a	activation energy	J mol ⁻¹
E_d	deactivation energy	J mol ⁻¹
E_M	maximum transpiration rate	mm s ⁻¹
E_t	transpiration	mm
E_T	evapotranspiration	mm
$G_{a,H}$	aerodynamic conductance for heat	m s ⁻¹
G_c	canopy conductance	m s ⁻¹
$G_{c,max}$	maximum canopy conductance	m s ⁻¹
G_s	surface conductance	m s ⁻¹
$G_{s,max}$	maximum surface conductance	m s ⁻¹
g_0	residual stomatal conductance	m s ⁻¹
g_s	stomatal conductance	m s ⁻¹
g_{sc}	stomatal conductance for CO ₂	m s ⁻¹
g_{sw}	stomatal conductance for water	m s ⁻¹
H	sensible heat flux	W m ⁻²
H_s	soil heat flux	W m ⁻²
h	relative humidity	-
h_c	canopy height	m
I	total interception	mm
j_{max}	PAR-saturated electron transport per mole of chlorophyll	mol mol ⁻¹ s ⁻¹
J	potential electron transport rate	mol m ⁻² s ⁻¹
J_{max}	PAR-saturated potential electron rate	mol m ⁻² s ⁻¹
k	extinction coefficient for light in canopy	-
k	von Karman's constant (=0.41)	-
K_c	Michaelis-Menten constant of Rubisco for carboxylation	mol m ⁻³
K_o	Michaelis-Menten constant of Rubisco for oxygenation	mol m ⁻³
k_c	Rubilose carboxylation turnover number	mol _(CO₂) mol ⁻¹ _(sites) S ⁻¹
k_o	Rubilose oxygenation turnover number	mol _(O₂) mol ⁻¹ _(sites) S ⁻¹
O_i	intercellular O ₂ concentration	mol m ⁻³
P_p	air pressure	Pa
P_a	standard atmospheric pressure	Pa
P_E	precipitation excess	mm
P	gross precipitation	mm
P'	amount of rainfall necessary to saturate the canopy	mm

p	free throughfall coefficient	-
Q	radiation	$W m^{-2}$
Q_{AC}	available energy	$W m^{-2}$
Q_c	solar radiation in canopy	$W m^{-2}$
Q_N	net radiation	$W m^{-2}$
Q_s	solar radiation	$W m^{-2}$
Q_L	long wave radiation	$W m^{-2}$
q	specific humidity of the air	$g kg^{-1}$
R	rainfall intensity	$mm s^{-1}$
\bar{R}	average rainfall intensity	$mm s^{-1}$
R_c	Rubisco catalytic site content in leaf	$mol m^{-2}$
R_d	dark respiration	$mol m^{-2}s^{-1}$
R	gas constant	$J K^{-1} mol^{-1}$
r_s	stomatal resistance	$s m^{-1}$
r_a	aerodynamic resistance	$s m^{-1}$
$r_{a,H}$	aerodynamic resistance for heat	$s m^{-1}$
$r_{a,M}$	aerodynamic resistance for momentum	$s m^{-1}$
S	storage capacity of the canopy	mm
s	slope of the saturated water vapour pressure with temperature	$Pa K^{-1}$
ΔS	entropy parameter j_{max}	$J K^{-1}mol^{-1}$
T	temperature	K or $^{\circ}C$
T_A	air temperature	K
T_H	maximum temperature JS function	$^{\circ}C$
T_L	leaf temperature	K
T_M	minimum temperature JS function	$^{\circ}C$
U	drainage	mm
u	wind speed	$m s^{-1}$
$V_{c,max}$	maximum catalytic capacity of Rubisco	$mol m^{-2}s^{-1}$
$V_{o,max}$	maximum rate of oxygenation by Rubisco	$mol m^{-2}s^{-1}$
z	measurement height	m
$z_{0,M}$	roughness length for momentum	m
$z_{0,H}$	roughness length for heat	m
$z_{0,V}$	roughness length for latent heat	m

Greek

α_{PAR}	absorption coefficient leaf radiation	-
Γ	CO ₂ compensation concentration	mol m ⁻³
Γ_*	CO ₂ compensation concentration in absence of mitochondrial respiration	mol m ⁻³
γ	psychrometric constant	Pa K ⁻¹
λ	latent heat of vaporization	J kg ⁻¹
θ	soil water content	mm
θ_{D}	soil water deficit	mm
θ_{FC}	field capacity of the soil	mm
θ_{max}	maximum soil water deficit	mm
ρ_{a}	density of dry air	kg m ⁻³
σ	leaf Rubisco content	kg m ⁻²

Summary

The water balance of forests under elevated atmospheric CO₂

Forests are important in the global carbon balance and in addition they influence the local and regional hydrology. A change in the concentration of atmospheric CO₂, as well as a possible climatic change, will directly and indirectly affect the water use of plants, including trees. The direct effect of a CO₂ increase will be most significant for photosynthesis and stomatal conductance. Changes in the atmosphere will affect forests more than other vegetation types, since due to their aerodynamic roughness forests are strongly coupled to the atmospheric conditions.

The aim of this study was to estimate the consequences of a climate change, in particular an increase of atmospheric CO₂ concentration, for the water balance of forests.

A one-dimensional model was developed in order to simulate the water balance. The model, which was derived from the model by Dolman *et al.* (1988), was divided into three main parts: transpiration through the leaves was simulated using the Penman-Monteith equation (Monteith, 1965), which contains the stomatal conductance. Interception and evaporation of rainfall by the canopy was modelled, according to the Gash-Rutter approach (Gash, 1979; Rutter *et al.*, 1971). And thirdly, the soil was considered as a simple bucket and the water fraction, exceeding the field capacity, was drained. Transpiration was calculated on a hourly basis, whereas interception and soil water content were calculated daily.

Transpiration of forests is strongly determined by the stomatal conductance of the tree leaves. Stomata are sensitive to changes in the CO₂ concentration, and therefore a model, which simulated the responses of stomata, was essential. The correlations between stomata, meteorological variables and plant physiological processes are evident, but the exact mechanistic process of stomatal functioning is still unknown. This situation has resulted in several possible empirical simulation models. In this study the model developed by Leuning (1990, 1995), was chosen. To incorporate the effect of soil moisture deficit on the stomatal conductance, the soil moisture function of Stewart (1988) was used in combination with the Leuning-model. Assimilation rate on a leaf scale was simulated by the biochemical model of Farquhar *et al.* (1980).

An estimation of the forest parameters in a changed climate was made in order to design a

scenario. Changes in the parameters were derived from studies to responses of trees in a changed climate. An excellent review is given by Ceulemans and Mousseau (1994). The reaction of trees will depend on species and nutrient environment, together with the ability of the tree to develop sinks for the extra carbon available by photosynthesis under elevated CO₂. The response of plants might be genetically determined. Changes in leaf morphology, stomatal density and stomatal opening are found as a response to elevated CO₂. A general trend of the effects of elevated CO₂ on plants, was an increase of growth and - with some exceptions - of the water use efficiency, but the increase in growth was limited, when no sinks for further growth were available. The increase in assimilation of plants under stress under elevated CO₂ is often found to be small compared to unstressed plants, e.g. when the stressed plants suffer from nutrient deficiency, but it was larger when the plant suffered from stresses as drought. With limited nutrients, which is the case for many forests on sandy soils, the increase of biomass was concentrated in the roots. On the long term photosynthesis often showed an acclimation to a lower level. Many tree species show a decrease in stomatal conductance at elevated CO₂, caused by smaller stomatal opening as well as lower stomatal density. In this study doubling of CO₂ resulted in a decrease in stomatal conductance of 31%. Based on Morison (1987), who compared the stomatal conductance of various species under ambient and double CO₂ concentrations, these changes were regarded as realistic.

The model was calibrated on a data-set of a deciduous forest (*Quercus rubra*), located near Ede in the Netherlands, and of a coniferous forest (*Pinus pinaster*) near Les Landes in France. The model had to be fitted on evapotranspiration and soil moisture content measurements, because assimilation data were not available. The simulated variation in the assimilation rate with the Farquhar model was judged to be realistic. The influence of the model parameters on interception and transpiration were analysed by a sensitivity analysis

To simulate the water balance over longer periods under changed climate conditions, a climate scenario study was conducted with a data-set, covering the years 1974-1978, which include dry and wet years. The meteorological variables were measured above-grass conditions and had to be transformed to above-forest conditions. The characteristics of Ede and Thetford forests were used to describe the forest models. The results were integrated with results of other groups within the National Research Program, by application of a scenario, as described by Klein Tank *et al.* (1995). In the model, the amount of precipitation markedly increased (with an annual average increase of 14%) as compared to climate scenarios, described by IPCC (1990). The sandy soils of Dutch forests show low nutrient availability. Therefore, in a first scenario a modest increase of 5% in leaf area index (LAI) of the canopy was applied and in a second scenario, a

higher increase of LAI was assumed, when nutrients were assumed to be less limiting. The onset of leaf growth and leaf fall were not changed. Also, the nitrogen content was not changed, in order to keep the approach simple.

Interception of rainfall was especially sensitive to changes in leaf area, duration of the storms, air humidity during the storms, temperature and to some extent to wind speed. In the scenario study, an increase in the air temperature of an average of 3 °C was applied, assuming a constant relative humidity. Under those conditions, the small increase in leaf area index raised the interception by a small, but almost neglectable, amount. Although precipitation highly increased, the effect on interception was low, mainly because rainfall intensity was changed and not the duration of the storm. The ratio of interception and total precipitation decreased, so a larger part of the gross precipitation reached the soil.

Using the physiologically based model for stomatal conductance, transpiration was sensitive to changes in temperature, air humidity and soil water availability, as well as to nitrogen availability and the photosynthetic capacity.

When the results of the water balance simulation using the actual, nowadays climate as input, were compared with the results, applying the changed climate, it was shown that the available soil water content determined the change in transpiration. Lower transpiration during winter and spring, due to decreasing stomatal conductance, diminished water shortage during summer and the total yearly transpiration might increase. However, when water was not limiting, transpiration would decrease with 10-20%.

The availability of nutrients, especially nitrogen, will determine the changes in the canopy structure and the increase in root density. Low availability of nitrogen will reduce photosynthesis and transpiration. However, the present air pollution in many areas, causes an extra input of nitrogen, and if other nutrients are sufficient, growth may increase markedly. An increase in transpiration, which is only due to an increase in leaf area is expected when the LAI is below 4. When the LAI is above 4 the transpiration will not show a marked increase in transpiration with increased LAI. Therefore, the change in forest transpiration depends on the sensitivity of the stomata to the CO₂ concentration, the change in photosynthesis and the composition of tree species. The stomata of coniferous tree species often show no response to increased CO₂. Therefore, coniferous forests may show an increase or unchanged transpiration, while deciduous forests may show a decrease in transpiration.

Taking the uncertainties of the applied scenarios and used model into consideration, the results should be used with care. The increase in precipitation, especially high during winter, will

almost completely drain to the groundwater, indicating that frequent flooding can be expected in winter when evapotranspiration is low and the soil is already water saturated. Summer droughts will decrease. The present policy to replace coniferous forests with deciduous forests to limit evapotranspiration, will further increase water discharge in forests exposed to a greenhouse climate.

Samenvatting

De waterbalans van bossen onder een verhoogde atmosferische CO₂ concentratie

De toename van de CO₂ concentratie in de atmosfeer heeft zowel een direct als een indirect effect op de waterbalans van bossen: direct via het effect van CO₂ op de huidmondjes (stomata) en de fotosynthese en indirect via de klimaatverandering, die mogelijk het gevolg is van de verhoogde concentratie van het 'broeikasgas'. Bossen zijn met hun hoge aerodynamische ruwheid sterk gekoppeld met de atmosfeer, waardoor de uitwisseling met de atmosfeer, en de beïnvloeding door de atmosfeer sterker is. Hierdoor kan het effect van stijgend CO₂ belangrijker zijn voor bossen, dan voor lagere vegetatietypen als grasland. Door deze sterke koppeling hebben bossen een belangrijke invloed op de regionale water huishouding.

Het doel van dit onderzoek was het inschatten van de gevolgen van het directe effect van CO₂ op de stomatale geleidbaarheid en van een klimaatverandering op het waterverbruik van bossen.

De waterbalans werd gesimuleerd op uurbasis door middel van een één-dimensionaal model. Transpiratie werd berekend voor de gehele kruin met de Penman-Monteith vergelijking (Monteith, 1965). Interceptie van neerslag door de boomkruin werd gesimuleerd volgens de Gash-Rutter methode (Gash, 1979; Rutter *et al.*, 1971) en de waterbalans van de bosbodem werd beschreven met een simpel bak-model, waarbij water boven veldcapaciteit als afvoer werd beschouwd.

Transpiratie is afhankelijk van de opening van de huidmondjes in het bladoppervlak. Hoewel de processen rond het functioneren van de stomata niet volledig bekend zijn, is de reactie van de stomata op veranderingen in CO₂-concentratie, temperatuur, luchtvochtigheid, licht en bodemvocht duidelijk. Om de directe effecten van een stijgende CO₂ concentratie beter te kunnen analyseren werd het stomatale geleidbaarheid model volgens Leuning (1990, 1995), in combinatie met het assimilatiemodel voor C₃-planten volgens Farquhar *et al.* (1980), toegepast in het bos hydrologisch model. Deze modellen gaven een betere fysiologische simulatie, dan het al toegepaste regressie model volgens Jarvis en Stewart (Stewart, 1988).

Mogelijke veranderingen in de vegetatie als gevolg van de hogere CO₂ en een klimaatverandering werden beschreven met behulp van een literatuurstudie. Een goed overzicht van mogelijke veranderingen werd gegeven door Ceulemans en Mousseau (1994). De reactie van bomen op

stijgende CO₂ verschilt per soort. Zij hangt onder meer af van het nutriëntenaanbod voor de bomen en van de mogelijkheid van de boomsoort om 'sinks' te vormen voor het gebruik van de extra gebonden koolstof voor verdere groei. Verschil in reactie per soort is mogelijk genetisch bepaald en uit zich in veranderde bladmorphologie, stomatale dichtheid en stomatale opening. In het algemeen neemt bij een toename van CO₂ de fotosynthese en de groei toe. Met een paar uitzonderingen zien we, eveneens bij de meeste boomsoorten, een meer efficiënt gebruik van water. De toename in assimilatie is meestal kleiner bij planten die een tekort aan nutriënten hebben, maar hoger bij planten die onder een stress, als droogte, lijden. Op de lange duur vertonen veel soorten een acclimatisatie aan verhoogd CO₂ met afname van de fotosynthese. Onder limiterend nutriëntenaanbod is de toename in biomassa geconcentreerd in de wortels.

Veel soorten laten een afname van de oppervlaktegeleidbaarheid (G_s) zien, doordat zowel de stomatale opening en het aantal stomata kunnen afnemen. In deze studie werd met een verdubbeling van de CO₂-concentratie een afname van G_s met 31 % toegepast. De waarde komt overeen met de gemiddelde waarde voor verschillende soorten, zoals gevonden door Morison (1987).

Het model werd gecalibreerd op meetgegevens van een loofbos met Amerikaanse Eik (*Quercus rubra*), gelegen vlak bij Ede in Nederland en op meetgegevens van een naaldbos met Zeeden (*Pinus pinaster*), gesitueerd bij Les Landes in Frankrijk. De calibratie werd uitgevoerd op de gemeten evapotranspiratie, interceptie en bodemvochtgehalten. De variatie in de assimilatie, gesimuleerd door het model van Farquhar *et al.* (1980), werd als realistisch beoordeeld. Op het model werd een gevoeligheidsanalyse toegepast, om de invloed van de verschillende constanten en variabelen in het model op het waterverbruik te bepalen.

Om een beeld te vormen van de uiteindelijke veranderingen in de waterbalans onder verhoogd CO₂, werd een scenario-studie uitgevoerd. Hierbij werd gekozen voor het KNMI scenario (Klein Tank *et al.*, 1995), mede om de resultaten van de verschillende projectstudies in het subthema Regionale Hydrologie van het NOP op elkaar af te stemmen. Het scenario liet een sterke toename zien van de neerslag, met gemiddeld 14 % op jaarbasis vergeleken met het huidige klimaat.

De scenariostudie werd toegepast op een meteorologische dataset van 5 jaar (1974-1978), welke periode zowel droge als regenrijke jaren bevatte. De opstandsgegevens van het bos bij Ede en een naaldbos bij Thetford in Engeland werden in de scenario-studie gebruikt.

Op zandgronden is het nutriënten aanbod in het algemeen laag. In de scenariostudie is daarom gekozen voor een beperkte toename in bladoppervlak (LAI) van 5 %. In een tweede scenario is wel een aanzienlijke toename van 20 % gesimuleerd in de LAI. Zowel de tijdstippen

van bladgroei en bladval, als het stikstofgehalte in het blad, zijn niet veranderd om de analyse eenvoudig te houden.

Interceptie van neerslag is gevoelig voor veranderingen in bladoppervlak, neerslag intensiteit, duur van de neerslag en, in mindere mate, voor temperatuur en luchtvochtigheid. De toename van de LAI leidde tot slechts een beperkte toename van de neerslag interceptie bij een constante relatieve luchtvochtigheid, samen met een temperatuurverandering van gemiddeld 3°C. De neerslag nam sterk toe, maar het effect op interceptie was slechts gering, mede doordat de neerslag intensiteit veranderde en niet de neerslag duur. De resultaten laten zien dat een groter aandeel van de neerslag de bodem bereikt.

Transpiratie door de stomata blijkt niet alleen gevoelig voor veranderingen in CO₂, temperatuur, luchtvochtigheid en de beschikbaarheid van bodemwater, maar is ook zeer gevoelig voor veranderingen in de beschikbaarheid van stikstof en de fotosynthese capaciteit van het blad.

De beschikbaarheid van bodemvocht bepaalt in grote mate de verandering in transpiratie, tov. de huidige situatie. Een lage transpiratie gedurende winter en voorjaar, door afname van de stomatale geleidbaarheid, zal leiden tot een afname van de zomerdroogte in bossen die over weinig water beschikken. De totale jaarlijkse transpiratie in droge bossen zal dan toenemen. Als water niet limiterend is, zien we een afname van de transpiratie van 10-20 %.

De beschikbaarheid van nutriënten, met name stikstof, bepaalt in sterke mate de verandering in groei in kruin (bladoppervlak) en wortels (water beschikbaarheid). Laag nutriënten aanbod zal fotosynthese en transpiratie doen afnemen. Echter de huidige luchtverontreiniging zorgt voor een verhoogd beschikbaarheid van stikstof. Mits andere nutriënten niet limiterend zijn, is een toename van de groei te verwachten, maar kan de afname in transpiratie door sluiting van de stomata een sterker effect zijn, dan de toename in transpiratie door groei (hogere LAI) en temperatuurstijging. Toename van transpiratie door toename bladoppervlak is alleen te verwachten, wanneer de huidige LAI lager is dan 4 (Kelliher, 1995). Bij een hogere LAI dan 4, neemt de oppervlaktegeleidbaarheid van de kruin niet meer toe met de LAI. De verandering in transpiratie wordt daardoor in sterke mate bepaald door de gevoeligheid van de stomata voor CO₂ en dus door de samenstelling van boomsoorten in het bos. Doordat naaldbomen in het algemeen geen of slechts een kleine afname van de stomatale geleidbaarheid vertonen, zullen deze bossen een toename of onveranderde transpiratie hebben, terwijl de transpiratie van loofbomen zal afnemen.

Gezien de grote mate van onzekerheid rond de reactie per soort op verhoogd CO₂, de onzekerheid van de toegepaste scenario's en het gebruikte model, zullen de resultaten voorzichtig gebruikt moeten worden. De verwachte toename in de neerslag, vooral gedurende de winter, zal

bijna volledig doorstromen naar het grondwater. Een toename van de kans op hoge waterstanden gedurende de winter moet daarom verwacht worden, met name als de bodem al verzadigd is met water. Het huidige beleid in Nederland om de waterbeschikbaarheid in de bodem te vergroten door het vervangen van naaldbossen met loofbossen zal de waterafvoer van bossen onder verhoogd CO₂ verder vergroten.