

Invloed van de bodemvochtsamenstelling op de bosgroei:

Een manipulatie-experiment te Kootwijk

Het bodemvocht is van belang als transport-medium van voedingsstoffen en water. Voor de voeding van de boom is het bodemvocht een intermediair tussen de vaste fase van de bodem en strooisel, en de wortels. De berging van voedingsstoffen in het bodemvocht is van weinig betekenis, met een eventuele uitzondering voor calcium en magnesium. Het bodemvocht, en vervolgens de boomwortel, wordt voorzien van voedingsstoffen door de volgende processen: verwerking van mineralen (K, Ca, Mg, P, spoor-elementen), mineralisatie van organische stof (N, P, S), desorptie van geabsorbeerde stoffen (P, kationen), atmosferische depositie (N, S, Ca, Mg) en grond- en kwelwater. De actuele opname door de boom wordt bepaald door de concurrentie tussen de mate van onttrekking en diverse afvoerprocessen als precipitatie, microbiële immobilisatie, absorptie, vervluchtiging en uitspoeling. Op arme zandgronden onder bos in Nederland wordt de bodemvochtsamenstelling sterk bepaald door de aanvoer van zure depositie en het bufferend vermogen van de grond. Het geïnfiltreerde ammonium wordt grotendeels opgenomen of

In het kader van het Additioneel Programma Verzuringsonderzoek werd in een Douglasbos te Kootwijk experimenteel de water- en nutriëntenvoorziening verbeterd. Het doel was de effecten van ongunstige bodemfactoren, zowel van natuurlijke oorsprong, als van zure atmosferische depositie afkomstig, op de groei en naaldsamenstelling te kwantificeren. Hiertoe werden fertigatie en zuivering van doorvalwater als middelen toegepast om de nutriëntenbeschikbaarheid via het bodemvocht te manipuleren. In onderstaand artikel wordt het verband tussen samenstelling van bodemvocht-oplossing en naaldsamenstelling belicht, alsmede de effecten hiervan op de boomgroei.

genitrificeerd tot nitraat, wat in beide gevallen leidt tot bodemverzuring. Deze verzuring wordt gebufferd door verwerking van aluminiumsilicaten en organisch gebonden Al. Het resultaat is een bodemoplossing met een pH kleiner dan 4, die gedomineerd wordt door nitraat, sulfaat, aluminium en chloride (afkomstig van zeezoutdepositie).

Natuurlijke tekorten aan basische kationen als K, Ca en Mg worden door de bodemverzuring benadrukt door de antagonistische werking van Al op Ca en Mg en van ammonium op K. Bovendien is fosfaat moeilijk beschikbaar door vastlegging aan de overmaat Al.

In hoeverre is de vitaliteitsachteruitgang van het bos te wijten aan de genoemde verslechterde bodemomstandigheden? Een bosproef waar de kwaliteit van het infiltrerende doorvalwater en/of de nutriëntenbeschikbaarheid worden verbeterd kan hier duidelijkheid over verschaffen. Het doorvalwater zou in de proef

gezuiverd kunnen worden van N- en S-bestanddelen tot een "preindustriële" samenstelling.

Dit zou in de bodem de dominantie van stikstofcomponenten en verzuring kunnen verminderen in het voordeel van de basische kationen en fosfaat en organische zuren.

Eliminatie van nutriëntentekorten zal de groei kunnen verhogen, maar of daarmee de stress door hoge concentraties zuur en aluminium wordt weggenomen is onbekend. In kasproeven bleek de boomgroei sterk gestimuleerd te worden door verhoging van de toedieningssnelheid van Ca, ongeacht de aanwezigheid van hoge concentraties vrij aluminium (Eldhuset et al., 1987).

In de bosproef te Kootwijk bestond de manipulatie zowel uit een zuivering van het doorvalwater als uit een complete bemesting bij gelijkblijvende atmosferische depositie.

Het doel van de proef was het effect op de boomgroei en naaldval te kwantificeren van drie behandelingen met drie bodemcondities:

behandeling	plot	bodemfactor
optimale watervoorziening	irrigatie	verdunding
optimale water- en nutriëntenvoorziening bij huidige depositie	fertigatie	voeding + verdunding
optimale water- en nutriëntenvoorziening bij lage depositie	fertigatie onder dak	N- en S-belasting + voeding + verdunding

Een optimale nutriëntenvoorziening houdt in dat de mineralen-toediening gelijke tred houdt met de vraag van de plant. Hierbij moet van de boomsoort bekend zijn wat de groei- en dus opnamemelheid van de plant is, én wat de optimale elementensamenstelling is. In Zweeds onderzoek zijn hiervoor criteria ontwikkeld (Ingestad, 1979). Indien een stabiele interne nutriëntenstatus en een bemesting zonder verliezen danwel overmaat is bereikt, kan de proef uitwijzen hoeveel voeding de boom nu werkelijk nodig heeft.

Opzet experiment

De proeven werden verricht in een Douglas opstand (1.2 ha) in de boswachterij Kootwijk. Als tweejarige zaailingen werd de Douglas in 1953 geplant. Het stamtal is 994 ha⁻¹ en er is geen ondergroei. De bodem is een holtpodzol (Typic Dystrochrept volgens Soil Taxonomy) op Pleistoceen dekzand. De bovengrond is zuur, arm aan basen en bevat te weinig P voor optimale groei (zie De Visser, 1993).

Vanaf 1989 werden gedurende vier jaar de volgende behandelingen uitgevoerd:

1- controle (1200 m²):

Dit was één van de twee meetlocaties van het ACIFORN onderzoek in het kader van het additioneel programma verzuring (APV, coördinator RIVM),

2- irrigatie (900 m²):

Toediening van gedemineraliseerd water, iedere twee dagen gedurende het groeiseizoen, maximaal 4 mm.dag⁻¹, in mindering gebracht door de gemeten dagdoorval van de dag ervoor, 3- fertigatie (900 m²):

Irrigatie als (2), maar met toevoeging van een complete voedingsoplossing, met een toedieningsnelheid volgens Ingestad (1988). De jaarlijkse nutriëntengift in de vorm van fosfaat- en nitraatzouten (Ingestad, 1979) was afgestemd op een bruto stikstofopname van 120 kg met verhoudingen gebaseerd op kasproeven, met de volgende doses:

N	P	K	Ca	Mg	Mn	Fe	B	Cu	Mo
34	36	60	5	7	0.52	0.9	0.26	0.04	0.008 kg.ha ⁻¹ .j ⁻¹

Ieder jaar zijn dezelfde doses toegediend, behalve voor N, met een gemiddelde over 4 jaar van 34 kg N ha⁻¹ j⁻¹, maar aflopend van 78, 39, 19 naar 0 kg N ha⁻¹ in 1989, 1990, 1991 en 1992 respectievelijk.

4- fertigatie onder dak (100 m²):

Optimale giften als (3) in de zomer, gedurende de rest van het jaar irrigatie van kunstmatig doorvalwater, dat niet de N- en S-bestanddelen maar wel de overige anorganische bestanddelen uit de depositie bevat.

Regenval- en doorvalwater, alsmede bodemvocht op meerdere

diepten werd frequent gemonsterd en op alle anorganische componenten geanalyseerd (zie De Visser, 1993).

Stamdiameters op borsthoogte en boomhoogte werden elke winter in alle behandelingen gemeten. Strooiselval werd elke 4 weken gemonsterd uit 1 m² opvangbakken. In november elk jaar werden takmonsters genomen van het licht- en schaduwniveau van 10 bomen per plot en het elementgehalte bepaald.

Resultaten

Bodemvochtsamenstelling

Algemeen

De pH in het bodemvocht is laag en heeft soms de waarde 3.0 bovenin het profiel. De bodemvochtsamenstelling wordt gedomineerd door vrij aluminium en sterk wisselende concentraties chloride, nitraat en sulfaat (Tabel 1). De zuurproductie wordt vooral door de depositie van ammonium en diens nitrificatie danwel door

ammoniumopname en zuuruitscheiding van wortels veroorzaakt. In Kootwijk bestaat de stikstofdepositie zoals gemeten in de doorval, voor 75 % uit ammonium en voor 25 % uit nitraat, terwijl op 20 cm diepte (Tabel 1) vrijwel alle ammonium reeds is opgenomen danwel genitrificeerd.

In de behandelingsperiode zijn in de controleplot Al, Ca en NO₃ in concentratie gedaald, evenals de ratio NH₄/K (Tabel 1). De effecten van de watergift in de irrigatie-behandeling op de bodemoplossing zijn als volgt:

Tabel 1. Gemiddelde bodemvochtconcentraties (fluxgewogen) en molratios (tijdgewogen) op 20 cm diepte te Kootwijk, voor en tijdens het experiment. Bron: De Visser, 1993.

	Control '87-'89	Control	Irr '91-'92	Fert	Roof
	mmolc.m ³				
Al	1380	994	1314	1182	669
Ca	177	106	166	135	71
Cl	565	611	343	301	109
pH	3.56	3.49	3.62	3.53	3.69
K	12	62	3	60	32
Mg	191	147	110	139	67
Na	428	464	302	266	98
NH ₄	121	141	25	44	14
NO ₃	1117	773	1204	1207	810
H ₂ PO ₄	2	3	1	11	39
SO ₄	860	784	456	413	130
NH ₄ /K	13.57	6.36	4.99	0.93	1.60
NH ₄ /Mg	0.66	0.75	0.20	0.46	0.14
Ca/Al	0.21	0.33	0.20	0.18	0.30

- 1) verhoging van de aluminium-, calcium- en nitraatconcentraties;
- 2) verlaagde kalium-, magnesium-, chloride- en sulfaatconcentraties door verdunning;
- 3) verlaagde ammoniumconcentraties;

4) verlaagde ratio's van NH₄/K, NH₄/Mg en Ca/Al. De veranderingen in concentraties van NO₃ en NH₄ duiden op een verhoogde nitrificatie. Budgetberekeningen (De Visser 1993) tonen aan dat zowel mineralisatie als nitrificatie zijn verhoogd door de watertoeënningen. De hogere Al-concentratie en de lagere Ca/Al-ratio zijn waarschijnlijk het resultaat van een verhoogde zuurbuffering door de toegenomen N-omzettingen. De verschillen in de bodemvochtsamenstelling tussen irrigatie met of zonder voeding zijn vooral:

- 1) de verhoging van K-, Mg-, en fosfaatconcentraties als gevolg van hun toediening;
- 2) de verhouding NH₄/K is sterk verlaagd door fertigatie (Tabel 1), als gevolg van een toename van K;
- 3) de verhouding NH₄/Mg is verhoogd door voeding, daar de

NH₄-concentraties door fertigatie iets meer verhoogd zijn dan de Mg-concentraties.

De gemiddelde NH₄/K ratio benadert in de irrigatieplot de kritische bovenwaarde 5 (Roelofs, 1988) en is door de fertigatie in goede zin veranderd. De molaire Ca/Al ratios op 20 cm diepte zijn door de fertigatiegift niet veranderd.

Fertigatie onder dak verschilt in bodemvochtsamenstelling van bovengenoemde fertigatie door:

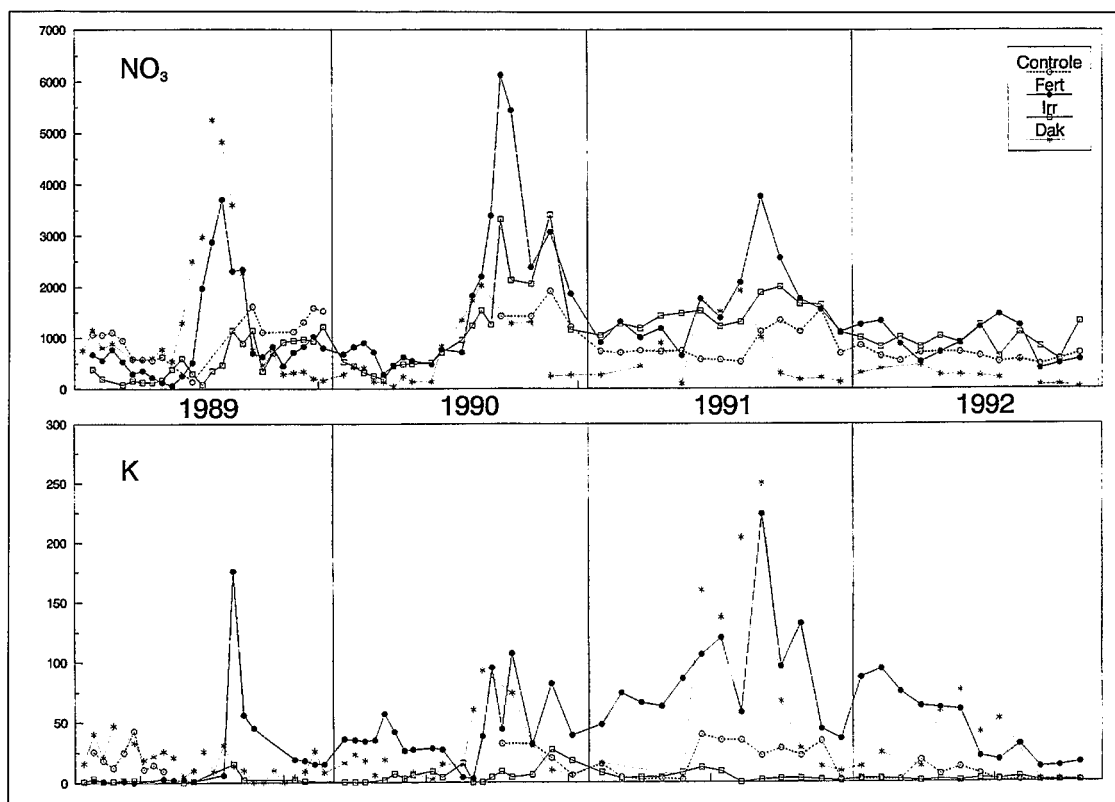
- 1) een algehele verdunning, met uitzondering van fosfaat;
- 2) een hogere Ca/Al-ratio en een hogere pH;
- 3) lagere K-concentraties en met gevolg ook een hogere NH₄/K-ratio.

De wegvanging van een groot deel van de stikstof en de sulfaat uit doorvalwater geeft een duidelijke verlaging van deze componenten in de bodemoplossing. De verhoogde pH en verlaagde Al-concentraties zijn het gevolg van een verminderde aanvoer van ammonium, waardoor nitrificatie en de resulterende zuurproductie verlagen. Uit budgetberekeningen blijkt dat de verlaagde Al-concentraties een resultaat

zijn van verminderde Al-mobilisatie ten opzichte van de overige behandelingen, en niet zozeer volgt uit verdunning.

Tijdsverloop

De elementen N, K en P kennen een korte verblijftijd in de bodemoplossing rond de lysimetercups: van één dag tot ruim een week. De seizoensfluctuaties worden bepaald door verschil in aan- en afvoer en biologische processen als mineralisatie en wortelopname. Nitraatconcentraties zijn elk najaar in de onbehandelde plot licht verhoogd (Fig. 1a) als gevolg van verminderde wortelopname bij voortgezette mineralisatie en nitrificatie. In de irrigatieplot zijn deze nitraatpieken iets hoger dan in de controle. Door de jaarlijks verminderde gift van ammoniumnitraat (zie paragraaf "opzet") zijn de nitraatconcentraties in de meeste zomers vrij hoog, met een duidelijk neerwaartse trend. Vooral onder dak verminderen nitraat en kalium in de winter door de irrigatie met gezuiverd doorvalwater. De kaliumgiften hebben de duidelijkste weerslag op de bodemvochtsamenstelling (Fig. 1b), binnen één tot twee weken namelijk bereikt de toegediende kalium de 20 cm diepte. De gegeven K wordt de eerste twee behandelingsjaren nog volledig opgenomen, hierna neemt kalium toe in de bovengrond, maar van uitspoeling op 90 cm is nauwelijks sprake. Een verhoging van het toegediende fosfaat is na minimaal 6 weken pas in het bodemvocht op 20 cm diepte te zien (Fig. 1c). De verhoogde concentraties blijven echter gedurende de hele proef enkele orden van grootte lager dan die in het toegediende water. In één van de twee lysimeteropstellingen onder dak (Dak 1 in figuur 1d) was al na 1 jaar behandeling een duidelijke verlaging van de nitraat-, ammonium- en



Al-concentraties geobserveerd en een dito stijging van de Ca/Al-ratio. De tweede opstelling (dak 2) reageert pas na 3 jaar op soortgelijke wijze. De pH is in 4 jaar tijd op 20 cm diepte overal langzaam gedaald, echter onder dak iets toegenomen. De aanvoer van verzurende componenten is onder dak gereduceerd, alleen de kleine voedingsdosis ammonium werkt potentieel verzurend.

De bomen ontvangen echter gelijke hoeveelheden nitraat en ammonium, zodat bij een complete opname of vastlegging van N geen netto verzuring optreedt.

De sterke daling van de Al-concentraties (Fig. 1d) in lysimeteropstelling 1, wordt ingezet na het eerste groeiseizoen, op het moment dat van fertigatie wordt overgeschakeld op toediening van gezuiverd doorvalwater.

Elementgehalten in de naalden

In de Douglas zijn tekorten van P, K en Ca geconstateerd (Evers et al., 1991). De nutriëntenstatus varieert in tijd en plaats, zoals blijkt uit de concentraties in alle velden voor, en het onbehandelde veld na de proef (Tabel 2). Alle elementgehalten in de onbehandelde plot zijn hoger in 1992 dan in 1988, met uitzondering van Ca. De geïrrigeerde bomen laten een verlaging zien van N en K-gehalte ten opzichte van de controle. Dit verdunningseffect wordt door fertigatie weer teniet gedaan. De gehalten aan K en P zijn zelfs duidelijk hoger dan bij irrigatie en controle. Het effect van Ca- en Mg-toediening is niet aantoonbaar.

Een soortgelijke verlaging doet zich voor in de dakplot voor N en Mg. De verhoudingen P/N en K/N zijn door fertigatie verhoogd

■ **Figuur 1.** Bodemvochtconcentraties (mmolc.m^{-3}) op 20 cm diepte in de vier behandelingen. a: NOW3, b: K, c: H_2PO_4 , d: Al.

tot optimale waarden, i.e. hoger dan 10 en 50 respectievelijk (Van den Burg, 1988) (Fig. 2). Deze ratio's zijn in de gefertigeerde bomen met en zonder dak vrijwel gelijk. Voor alle vermelde elementen geldt, dat fertigatie met dak lagere gehalten laat zien dan de fertigatie zonder dak. Dit lijkt in overeenstemming met de verdunningen in het bodemvocht.

Uit verder onderzoek (De Visser, 1993) blijkt, dat in de loop van de proef dezelfde verbeteringen waargenomen zijn met betrekking tot K en P in de oudere naalden bij fertigatie. In de naaldval zijn P- en K-gehalten in de fertigatieplot toegenomen met 20 respectievelijk 32%. De gehalten

Tabel 2. Elementgehalten (g.kg-1) in halfjaars naalden voor en na het experiment. Bron: De Visser, 1993.

Veld	N	P	K	Ca	Mg
	1988				
Controle	17.5	1.3	5.5	1.7	1.0
Irrigatie	18.7	1.5	6.5	2.3	1.2
fertigatie-dak	19.2	1.5	7.5	1.9	1.5
fertigatie+dak	19.5	1.5	6.5	1.6	1.4
	1992				
controle	19.0	1.4	6.9	1.4	1.3
irrigatie	16.2	1.5	5.9	1.8	1.3
fertigatie-dak	19.1	2.1	9.8	1.9	1.4
fertigatie+dak	17.0	1.9	8.2	1.5	1.1

van toegediende elementen in de gevallen naalden in de gefertigeerde dakplot worden echter niet verhoogd, en ook N is niet verlaagd door vermindering van N aanvoer.

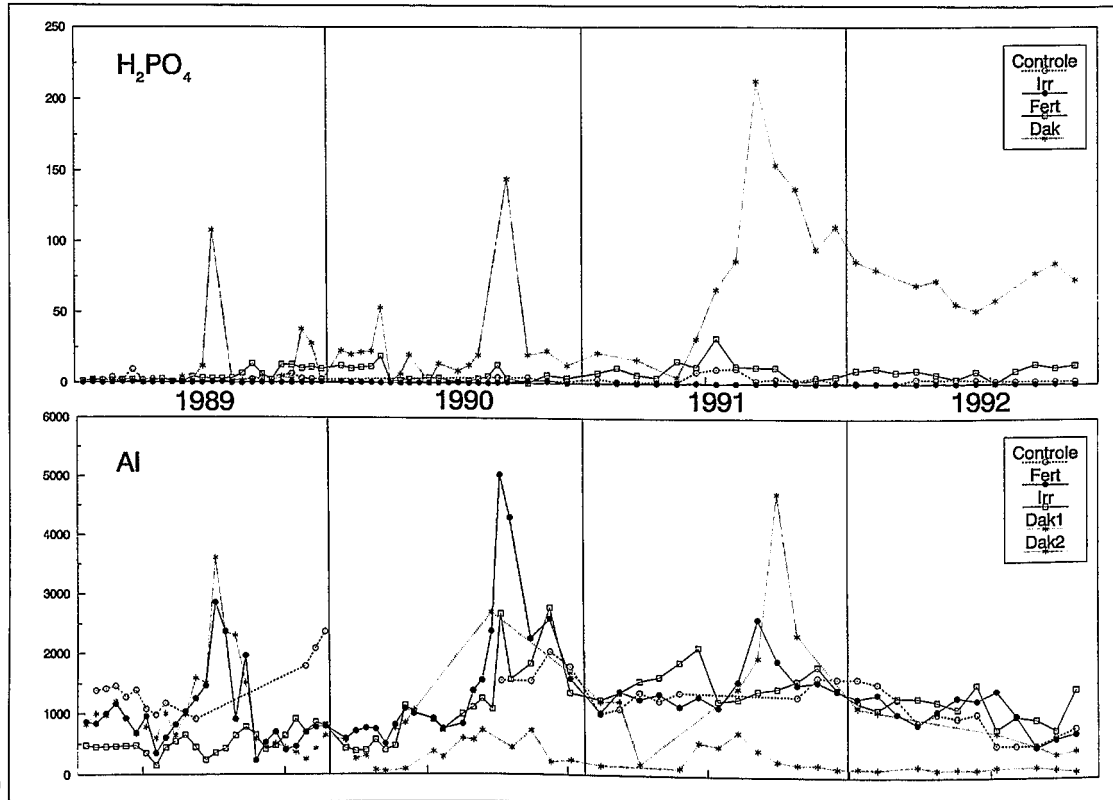
Boomgroei

De groei van de opstand is in te delen in boniteitsklasse III, met

een totale jaarlijkse bijgroei van ruim 20 m³. De diktegroei is gemiddeld 6 mm. J⁻¹ de hoogtegroei varieert jaarlijks sterk (0.2 tot 0.9 m). Het effect van de behandelingen op de dikte- en hoogtegroei in de totale behandelingsperiode is significant (Tabel 3), maar in de afzonderlijke jaren is de respons niet eenduidig. Na een

eerste groeistimulans laten de gefertigeerde bomen in 1990 een verminderde en in 1991 een gelijke groei zien ten opzichte van de controle. De groei van de gefertigeerde bomen onder dak fluctueert op dezelfde wijze, maar bij aanvang en gedurende de proef is de diktegroei steeds groter dan in de controle. Met een gelijke watergift als bij fertigatie, laten de geïrrigeerde bomen wel steeds een hogere groei zien als gevolg van de behandeling. Het totale verschil in grondvlakbijgroei met de controle is voor irrigatie 40%, voor fertigatie 35% en onder dak 33%, rekening houdend met de verschillen voorafgaande aan de proef. De hoogtegroei is verdubbeld door irrigatie, de toevoeging van voedingsstof-

■ Fig 1c en 1d: Bodemvocht concentraties (mmolc.m⁻³) op 20 cm. diepte in de twee behandelingen c: H₂PO₄, d: Al.



Tabel 3. Jaarlijkse groei van de behandelde bomen. Behandelingjaren 1989 t/m 1992 dbh = diameter op 1.30 m; G = grondvlak; H = gemiddelde hoogte. Een significant verschil ($P < 0.05$) tussen waarden per rij wordt aangeduid met een verschil in letter. Bron: De Visser, 1993.

Groei		Controle	Irrigatie	Fertigatie -dak	+dak
δdbh	mm	5.0c	6.1b	6.5ab	8.4a
δG	m ² .ha ⁻¹	1.7c	2.5b	2.4b	3.0a
[in 1988:		1.9	1.8	2.0	2.4]
δH	m	0.4	0.8	0.6	0.7
δVolume	m ³ .ha ⁻¹	21.6	25.8	29.1	38.8
δWortels	t.ha ⁻¹	4.5	3.6	2.7b	5.6

fen blijkt dit effect niet verder te versterken. De groei van fijne wortels gedurende de periode april 1989 tot oktober 1990 laat grote verschillen zien tussen enerzijds de controle- en dakplot met hoge wortelproductie, en anderzijds de lage waarden in irrigatie- en fertigatieplot.

De grootte en het moment van naaldval wordt sterk beïnvloed door irrigatie. In de droge zomers van 1989 en 1991 is een verminderde naaldval waargenomen gedurende 1 à 2 maanden (De Visser, 1992) als gevolg van de watergiften, en tevens een totale jaarlijkse vermindering van de naaldval.

Voor de gehele onderzoeksperiode blijkt de naaldval alleen in de irrigatieplot verlaagd. In 1992 is geen verschil in totaal naaldoppervlak (LAI) gevonden tussen de behandelingen.

Discussie en conclusies

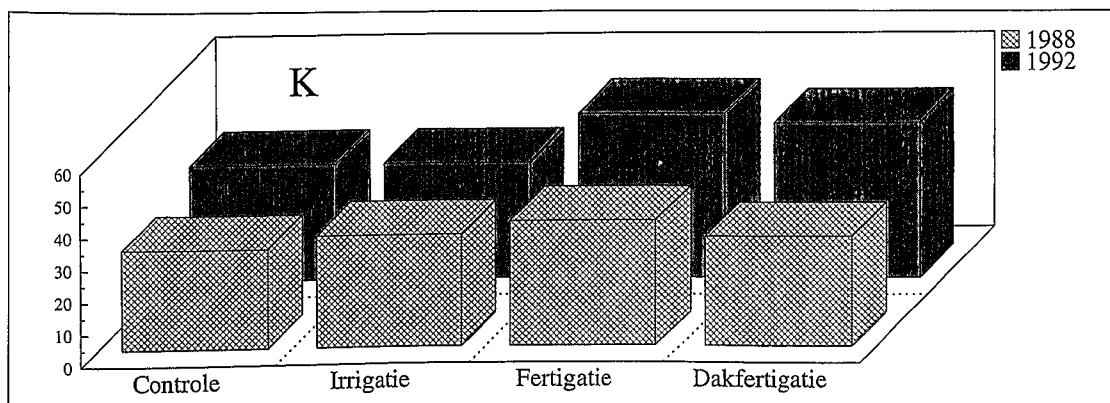
De groei van de Douglasspar in dit experiment werd in de afgelopen zomer gelimiteerd door watern tekort. Dit blijkt ook uit de toename in groei die door de irrigatie teweeg gebracht werd (Tabel 3). Tussen de irrigatie- en fertigatiebehandeling bestaan geen verschillen in groei, hoewel de naalden van de bomen in de irrigatieplot P- en K-tekort vertoonden. Mogelijk wordt de groei gelimiteerd door de slechte Ca-voorziening, welke niet werd verbeterd door de lage doses Ca in de fertigatie.

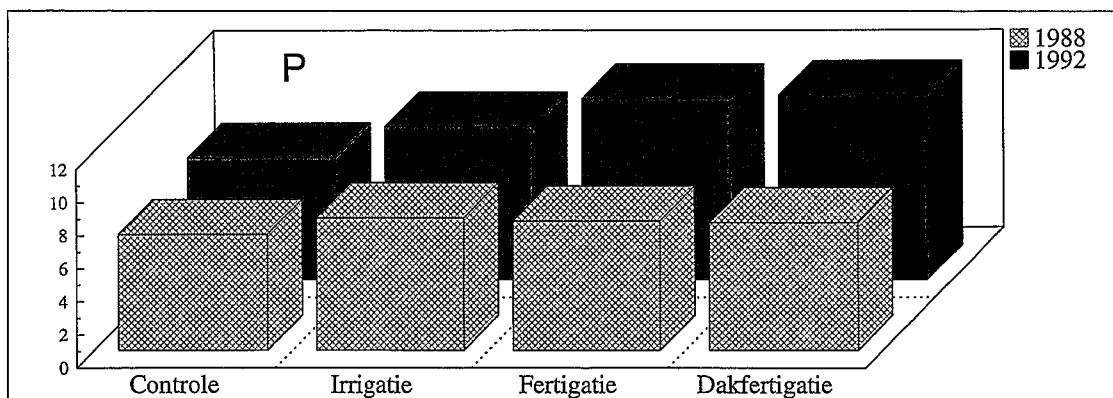
Het verband tussen de gemani-puleerde bodemoplossing en de verandering in naaldelementgehalten is duidelijk voor kalium en fosfaat: een verdunning of concentrering uit zich snel. De gevolgen van de nitraatconcentraties op de stikstofgehalten in de naal-

den zijn niet direct zichtbaar. Op 20 cm diepte zijn nm. de gemiddelde nitraatconcentraties gelijk tussen irrigatie en fertigatieplot, maar de naalden bevatten meer N bij fertigatie.

Dit is juist, omdat zowel de concentraties als de neerwaartse fluxen van nitraat hoger zijn als een "chloro-correctie" wordt toegepast: hogere Cl-concentraties worden als maat beschouwd voor verdroging en indikking van het bodemvocht. De hogere stikstofluxen bij fertigatie zijn deels het resultaat van de tot 1991 gegeven kleine gift, en deels van gestimuleerde mineralisatie. Als de bodemvochtindikking ook bij de Ca-concentratie wordt verdisconteerd, blijkt dat de Ca-concentraties in bodem en naalden in de irrigatieplot al voor de proef hoger waren dan in andere delen van de opstand.

Fertigatie zonder dak kan de bodemverzuring niet verminderen, die het gevolg is van atmosferische depositie. De zgn. "optimal nutrition" (Ingestad, 1988) wordt namelijk in kleine hoeveelheden toegediend om meteen te worden opgenomen, zodat de bodem verder eigenlijk geen chemische rol zou mogen spelen. Uit de veldmetingen blijkt dat de nutriënten met de hoogste toedieningen, toch ophopen in de bodemoplossing. Tevens lijkt er uitwisseling plaats te vinden van





■ **Figuur 2:** K/N en P/N ratio's (%) voor en na het experiment.

basische kationen met protonen en aluminium van het uitwisselcomplex, zodat de fertigatie de pH verlaagt. Deze verzuring vindt plaats als de begeleidende anionen van de voedingszouten geen basische werking hebben zoals bicarbonaat, zodat kalizouten in het bodemvocht de pH verlagen (zie ook Tamm, 1991). Deze zoutshock is tijdelijk van aard en het resultaat is uiteindelijk een rijker bezet uitwisselcomplex. Fertigatie onder dak wordt ook beïnvloed door de hoge gehalten aan uitwisselbaar zuur en

aluminium aan de bodem. De verminderde externe aanvoer van verzurende componenten verlaagt snel de concentraties van nitraat en sulfaat; toch kan de opgebouwde capaciteit aan zuur in de bodem alleen verdwijnen door uitwisseling met basische kationen en desorptie met water van een lage zoutsterkte. Deze "ontzuring" vindt reeds plaats onder het dak, zoals blijkt uit de pH-stijging en vermindering van Al-concentratie en de ratio Al/Ca. Als referentie voor een gezond bos zonder luchtverontreiniging wordt in EEG-verband een opstand van fijnspar in zuidwest Ierland gebruikt. In Tabel 4 staan

een aantal opstands- en bodemgegevens van drie bosonderzoeklocaties met een vergelijkbare bodem, en evenals het Kootwijk-experiment behorend tot dit overkoepelend EEG-onderzoek, genaamd "EXMAN" (Beier en Rasmussen, 1993). In het Ierse Ballyhooly is een goede groei en een optimale naaldsamenstelling te zien, er zijn geen hoge stikstof, danwel aluminiumconcentraties in het bodemvocht. Het bos te Solling heeft echter een door Mg-tekort gereduceerde groei en er is een sterke bodemverzuring. Het oudere bos in Höglwald groeit nog uitstekend, ondanks de sterke bodemverzuring en de hoge nitraatconcentraties. Uit deze cijfers blijkt, dat lage concentraties van voedingsstoffen, zoals in Ballyhooly, niet zondermeer iets zeggen over groei en vitaliteit. Er moet vooral ook aandacht worden geschonken aan parameters van zuurstress, als pH en Ca/Al, en aan de flux i.p.v. de concentratie van een voedingsstof.

In Kootwijk is er een relatie gevonden tussen bodemvochtconcentraties van K, P en Ca in de wortelzone en naaldgehalten. Vooral voor kalium is een stijging waarneembaar van irrigatie < controle < fertigatie met dak < fertigatie zonder dak. Veelal zijn de concentraties bij fertigatie la-

Tabel 4. Bodemvochtconcentraties (mmol.m⁻³) op 20 cm diepte, gemiddelde van 1989 van 1990, van drie EXMAN-onderzoeklocaties, leeftijd (j), grondvlakbijgroei δG (m².j⁻¹) en Nederlandse boniteit van fijnspar en elemententekort in halfjaars-naalden. Bron: Beier en Rasmussen, 1993.

	Ballyhooly Ierland	Solling Duitsland	Höglwald Duitsland
SO ₄	166	747	1356
NO ₃	91	680	2030
NH ₄	11	21	22
K	15	25	27
Mg	139	87	505
Ca	68	196	268
Al	190	1042	2214
Ca/Al	0.54	0.28	0.18
pH	4.17	3.51	4.00
leeftijd	52	58	84
δG	2.0	1.0	0.9
Ned. boniteit	II	V	>I
tekorten:	geen	Mg	K

ger met dak dan zonder, hoewel dezelfde nutriëntendoses zijn gegeven. Dit zou verklaard kunnen worden door de hogere groei en dito opname onder dak.

De relaties van K en P zijn terug te voeren op de vooraf al waargenomen voedingstekorten. Ook bij fertigatie worden deze elementen in de wortelzone volledig opgenomen en gaan niet verloren naar het grondwater. Dit is mede te danken aan de kleine doses, afgestemd op de groei. De gift van Ca is te laag geweest, gezien de Ca-gehalten kleiner dan 0.2%. De ruimtelijke variatie in bodemsamenstelling blijkt meer invloed op bodemvocht en naaldgehalte te hebben voor Ca en Mg (zie irrigatieplot), dan de verschillen door fertigatie.

De relatie tussen meststoffengift en verhoogde naaldgehalten is algemeen bekend (zie o.a. Arnold, 1993) en kan ook luxe consumptie inhouden. Het verband tussen naaldgehalte en bovengrondse groei is in dit Douglasbos minder eenduidig. De gefertigete bomen zonder dak hebben de hoogste concentraties macronutriënten, maar de relatieve grondvlak-groei toename is het minst van de drie behandelingen: tijdens het experiment gemiddeld 22% t.o.v. het jaar 1988, terwijl irrigatie en fertigatie onder dak met resp. 34% en 40% toenamen. Volgens Ingestad (1988) zou de fertigatie een verbeterde

elementenbalans bewerkstelligen, met een hogere groei, een dichtere kroon en een effectiever gebruik van de N depositie. Voor het gebrek aan groeirespons door fertigatie zijn minstens twee verklaringen mogelijk: a) de groei in deze opstand werd alleen beperkt door watertekort, en niet door het waargenomen elemententekort van K en P; b) er is nog een zeker Ca-tekort aanwezig, mede veroorzaakt door de nog altijd vrij zure bodem.

De buitengewoon hoge groei van de Douglas bij de gecombineerde behandeling irrigatie+fertigatie-depositie geeft aan dat de groei door meerdere factoren is geremd. Dit resultaat is tevens een argument, om te pleiten voor lagere emissies van N- en S-standdelen in het milieu, ten behoeve van een vermindering van de verzuring.

Referenties

- Arnold, G., 1993. Soil acidification and imbalanced nutrient availability in Scots pine forest soils in the Netherlands: causes, extent and control. Proefschrift Landbouwniversiteit Wageningen, 139 p.
- Beier, C. and Rasmussen, L. (eds.), 1993. EXMAN- Experimental Manipulation of forest Ecosystems in Europe. Ecosystem Research Report 5. EEG, Brussel (in druk).
- De Visser, P.H.B., 1992. Effects of irrigation, fertigation and cleaned throughfall water on the temporal variations in needle loss. In: Rasmussen, L., Brydges, T. and Mathy, P. (eds.), Experimental Manipulations of Biota and Biogeochemical Cycling in Ecosystems. Ecosystem Research Report 4. Brussel.
- De Visser, P.H.B., 1993. Effect of irrigation and balanced nutrition on nutrient cycling in a Douglas fir stand. In: Proceedings of the CEC/IUFRO Symposium on Nutrient Uptake and Cycling in Forest Ecosystems, June 7-10, 1993, Halmstad, Sweden. Ecosystem Research Report, CEC, Brussel (in druk).
- Eldhuset, T., Göransson, A. and Ingestad, T., 1987. Aluminium toxicity in forest tree seedlings. In: Hutchinson, T.C. and Meema, K.M. (eds.): Effect of atmospheric pollutants on forest wetlands and agricultural ecosystems. Springer Verlag, Berlin: 401-409.
- Evers, P., Jans, W.W.P. en Steingröver, 1991. Impact of air pollution on ecophysiological relations in two Douglas fir stands in the Netherlands. Rapport nr. 637, Inst. voor Bos- en Natuuronderzoek, Wageningen.
- Ingestad, T., 1979. Mineral nutrient requirements of Pinus sylvestris and Picea abies seedlings. Physiologia Plantarum 45: 373-380.
- Ingestad, T., 1988. A fertilization model based on the concepts of nutrient flux density and nutrient productivity. Scan. J. For. Res. 3: 157-173.
- Tamm, C.O., 1991. Nitrogen in Terrestrial Ecosystems. Ecol. Studies 91. Springer Verlag, Berlin.
- Van den Burg, J. 1988. Voorlopige criteria voor de beoordeling van de minerale voedingstoestand van naaldboomsoorten op basis van de naadsamenstelling in het najaar. Rapport nr. 522, Inst. voor Bos- en Natuuronderzoek, Wageningen, 20 p.