25 Jahre Großlysimeteranlage St. Arnold

von Manfred Schroeder

Staatliches Amt für Wasser- und Abfallwirtschaft Münster

Mai 1992

INHALT

Seite

1. Einleitung 1

2. Die quantitativen Meßergebnisse 3
- 2.1 Die meteorologischen Messungen 3
  - 2.1.1 Die Lufttemperatur 3
  - 2.1.2 Die relative Luftfeuchte 3
  - 2.1.3 Die Sonnenscheindauer 3
  - 2.1.4 Die Globalstrahlung 5
  - 2.1.5 Die Windgeschwindigkeit 6
  - 2.1.6 Die potentielle Verdunstung nach Penman 6
  - 2.1.7 Der Niederschlag 6
- 2.2 Die lysimetrischen Messungen 7
  - 2.2.1 Der Sickerwasserablauf 7
  - 2.2.2 Die Gesamtverdunstung 9
  - 2.2.3 Die Interzeptionsverdunstung 11
  - 2.2.4 Die Zuwachsmessungen 13
- 2.3 Die Simulationsberechnung des Bodenwasserhaushalts 16

3. Die qualitativen Meßergebnisse 22

4. Zusammenfassung 28

5. Literatur 29

Liste der Tabellen 31

Liste der Abbildungen 32

Verwendete Symbole 33

1. Einleitung

Lysimeter sind Meßvorrichtungen, die vor allem zur Klärung von Fragen des Bodenwasserhaushalts im weitesten Sinn und des Stoffhaushalts eingesetzt werden.

Ihr Hauptbestandteil ist stets ein mit Boden gefüllter, mehr oder weniger großer Behälter, der einen Kleinstausschnitt aus der Landschaft isoliert und so Messungen der verschiedenen Prozesse des Wasser- und Stoffhaushalts möglich macht. Vorrangig werden untersucht die Grundwasserneubildung, die Verdunstung, der Stoffeintrag in den Boden und der Stoffeintrag ins Grundwasser. Je nach Lysimetertyp, Aufstellungsweise und zusätzlichen Einrichtungen sind aber auch weitere Größen erfaßbar. (6)

Die Großlysimeteranlage St. Arnold bei Rheine (s. Abb. 1) ist speziell für die Untersuchung des Wasserhaushalts von Waldbeständen gebaut worden (2). Das Land Nordrhein-Westfalen hat dazu die Mittel zur Verfügung gestellt. Einen kleinen Anteil hat die Bundesrepublik Deutschland getragen. Zu einem späteren Zeitpunkt sind auch Stoffhaushaltsfragen (Stichwort "Saurer Niederschlag") aufgegriffen worden. Planung und Bau der Anlage wurden vom damaligen Wasserwirtschaftsamt, dem heutigen StAWA Münster, in den Jahren 1962 bis 64 ausgeführt. 1965 wurden die Messungen begonnen, so daß seit dem Abflußjahr 1966 kontinuierliche Meßreihen vorliegen (1).

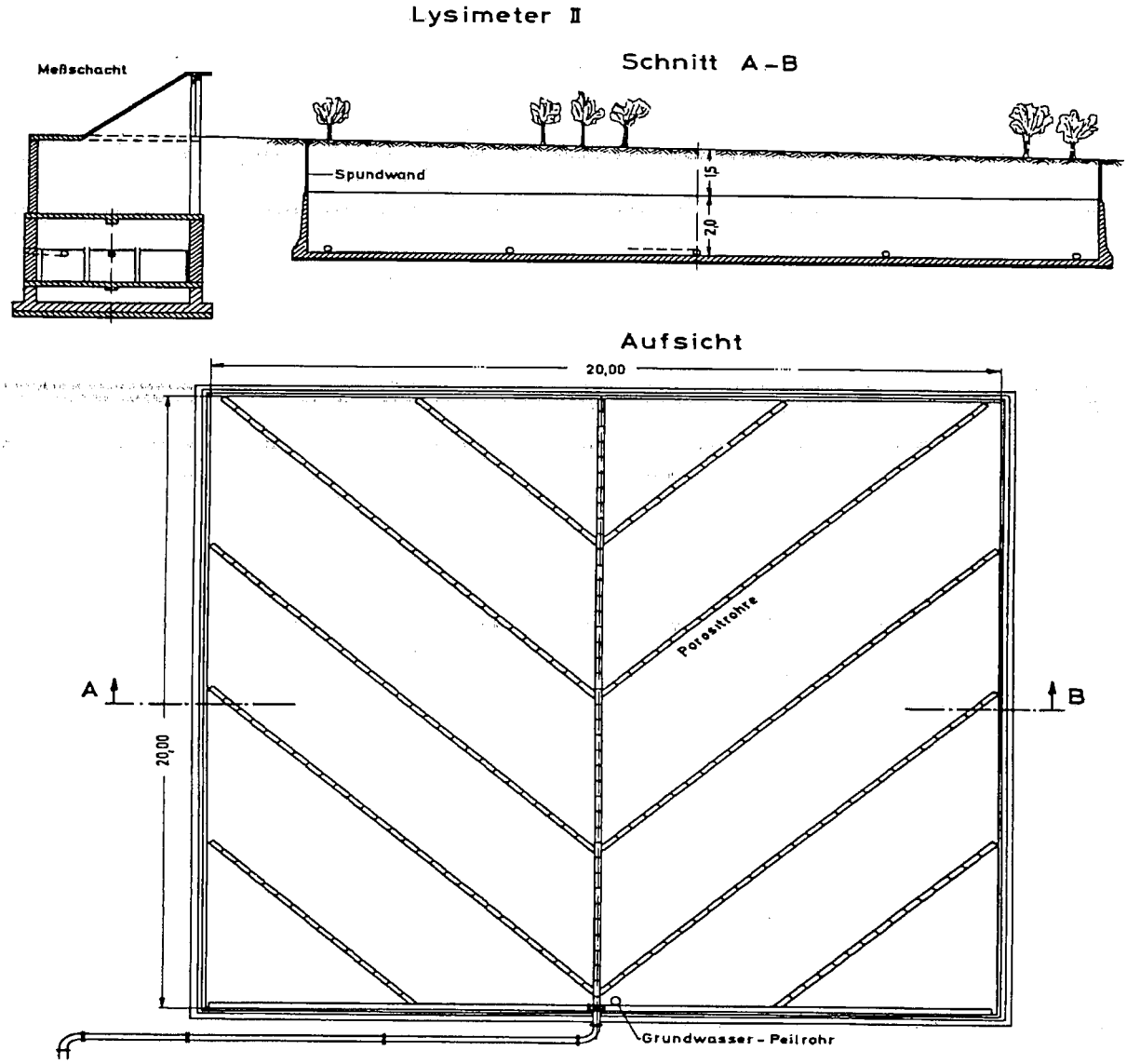

Abb. 1: Meßkeller und eines der drei Auffangbecken der Großlysimeteranlage St. Arnold

Die Großlysimeteranlage St. Arnold liegt zwischen Emsdetten und Neuenkirchen (s. Abb. 2) im Münsterländischen Kiessandzug, einem bedeutenden Grundwasservorkommen in Westfalen (16). Hier entnehmen u.a. die Stadtwerke Rheine Grundwasser, die dankenswerter Weise das Grundstück für die Anlage zur Verfügung gestellt haben.

Das Meßprogramm umfaßt neben den lysimetrischen Messungen in engerem Sinne ein umfangreiches meteorologisches Programm. Neben diesen vorwiegend quantitativen Messungen lief mehrere Jahre ein qualitatives Meßprogramm, das eine Reihe von Wasserinhaltsstoffen im Freiland- und Bestandsniederschlag, im Bodenwasser und im Sickerwasserablauf erfaßte.

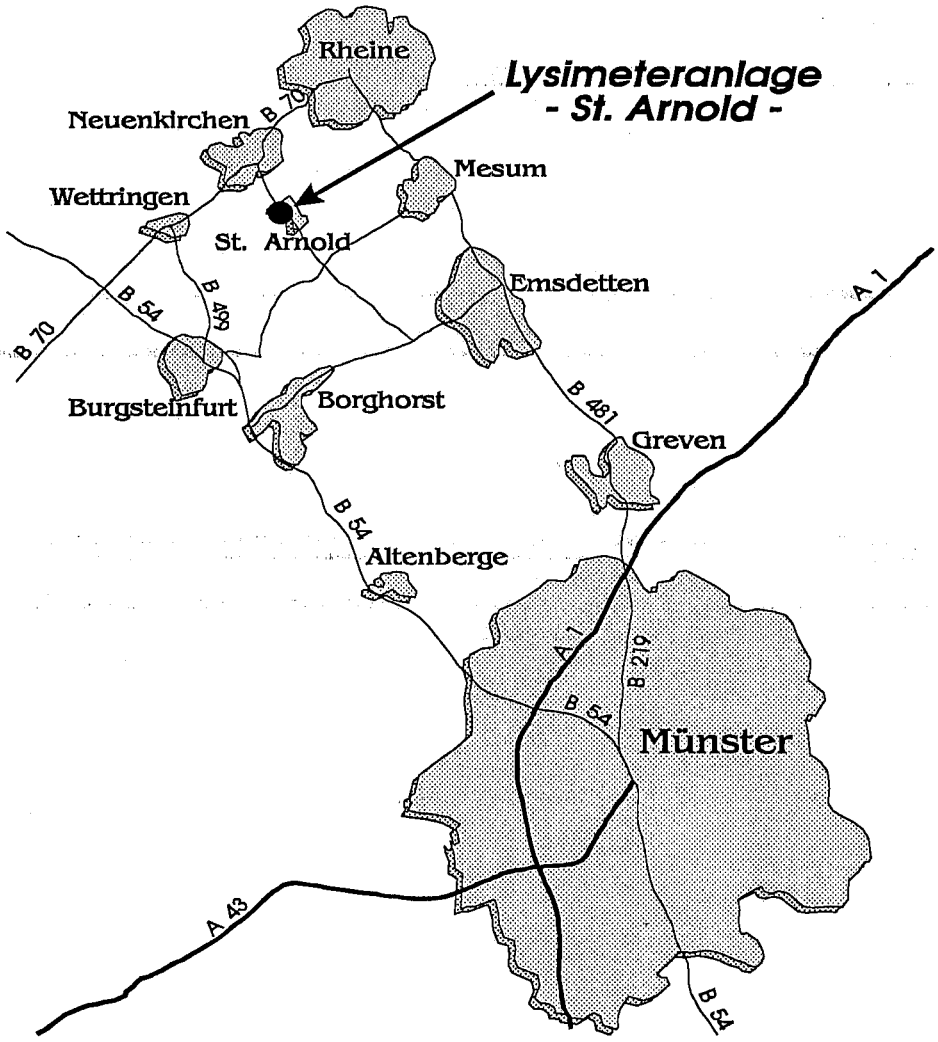

Abb. 2: Lageplan der Großlysimeteranlage St. Arnold

2. Die quantitativen Meßergebnisse

2.1 Die meteorologischen Messungen

Eine ganze Reihe meteorologischer Messungen wird in einem ausgedehnten Wettergarten vor Ort durchgeführt. Diese Notwendigkeit ergab sich aus der Tatsache, daß sich keine Wetterstation des Deutschen Wetterdienstes in ausreichender Nähe befindet. Die Messungen dienen vor allen der Charakterisierung des Wettergeschehens und zur Berechnung der potentiellen Verdunstung, einer wesentlichen Basisgröße für viele Wasserhaushaltsuntersuchungen (18).

2.1.1 Die Lufttemperatur

Die Temperatur der Luft wird in einer Wetterhütte in 2 m Höhe mit einem Thermographen und zwei geeichten Extremthermometern gemessen.

Morgens um 7^{30} Uhr werden das Minimum und das Maximum der letzten 24 Stunden unmittelbar mit den Extremthermometern festgestellt. Das Tagesmittel wird aus der Temperaturganglinie des Thermographen ermittelt, ggf. nach ihrer Korrektur an Hand der Extremwerte.

Die Tageswerte werden zu Monats- und Jahreswerten zusammengefaßt. Sie sind in Tab. 1 und Tab. 2 zusammengestellt.

Die 25jährige mittlere Lufttemperatur liegt bei 9,0°C, das Mittel der täglichen Maxima bei 13,3°C und das der täglichen Minima bei 4,5°C.

Der Monatsgang dieser Werte im 25jährigen Mittel ist aus Tabelle 2 ersichtlich.

Im Winterhalbjahr liegt die Lufttemperatur im Mittel bei 3,8°C, im Sommer bei 14,2°C. Der kälteste Monat ist mit 1,3°C der Januar. Die höchsten Monatswerte erscheinen mit 17,2°C im Juli und August.

2.1.2 Die relative Luftfeuchte

Die relative Luftfeuchte wird wie die Lufttemperatur in einer Wetterhütte in 2 m Höhe registrierend gemessen. Das Schreibgerät wird in unregelmäßigen Abständen mit Hilfe eines Aspirationspsychrometers nach Aßmann geeicht. Aus der Ganglinie werden das Tagesmittel und der 14^{00} Uhr-Wert eines jeden Tages entnommen. Die Werte werden zu Monats- und Jahreswerten zusammengefaßt. Die Jahresmittel sind in Tabelle 1 und Tabelle 2 zusammengestellt. Aus Tabelle 2 ist ferner der Gang der Monatswerte im 25jährigen Mittel ersichtlich. Im Winter haben wir in St. Arnold im Mittel 83 %, im Sommer 77 % relative Luftfeuchte. Das Mittel über 25 Jahre beträgt 80 %. Der lufttrockenste Monat ist mit 71 % im Mittel der Mai, der luftfeuchteste mit 88 % der Dezember.

2.1.3 Die Sonnenscheindauer

Die Sonnenscheindauer wird mit dem Sonnenscheinschreiber nach Campbell-Stokes gemessen.

Das Gerät besteht aus einer als Brennglas fungierenden Glaskugel, die auf einem untergelegten Pappstreifen einen Brennstrich erzeugt, wenn die Sonne scheint. Es werden die Sonnenscheinstunden täglich festgestellt und zu Monats- und Jahreswerten zusammengefaßt (siehe Tabelle 1 und 2).

Die jährlichen Sonnenscheinstunden liegen im 25jährigen Mittel bei 1248 h/a. 1981 war das Jahr mit dem wenigsten (939 h), 1989 das Jahr mit dem meisten Sonnenschein (1508 h). Der sonnenärmste Monat ist mit nur 18 h der Dezember, der sonnenreichste mit 183 h der Mai. Danach geht also die Sonnenscheindauer mehr mit der relativen Luftfeuchte, weniger mit der Lufttemperatur, parallel.

Abfluß-jahr	N_1 mm	N_0 mm	T_M °C	T_{max} °C	T_{min} °C	RF %	SD h	STR J/cm²/min	Wind 3 m m/s	Wind 9 m m/s	E_0 mm
1966	1098	1169	9,1	12,7	5,0	84	1137	0,66	1,49	2,34	565
1967	922	954	9,3	13,5	5,4	87	1265	0,67	1,56	2,47	561
1968	976	1006	8,7	12,9	4,8	84	1150	0,68	1,35	2,19	549
1969	625	669	8,9	12,8	4,4	83	1293	0,70	1,25	1,98	569
1970	875	894	8,4	12,0	3,7	84	1198	0,69	1,22	2,06	557
1971	581	604	7,7	13,4	4,3	82	1412	0,73	1,10	1,85	553
1972	656	670	6,8	12,6	4,0	84	1176	0,68	1,08	1,90	490
1973	620	634	8,9	13,2	4,6	81	1347	0,67	0,99	1,89	574
1974	730	746	8,9	12,9	4,2	81	1318	0,65	1,11	2,09	557
1975	719	760	10,2	14,2	5,5	78	1443	0,62	1,12	2,04	614
1976	511	552	9,5	13,8	4,5	77	1463	0,64	1,03	1,84	629
1977	661	668	8,8	12,8	4,9	83	1081	0,59	0,92	1,78	521
1978	718	725	8,6	12,9	4,9	83	987	0,57	0,94	1,85	517
1979	700	719	8,3	12,2	3,9	82	985	0,55	0,84	1,75	521
1980	755	766	9,6	13,6	4,6	81	1025	0,53	0,75	1,68	531
1981	874	895	9,6	13,6	4,9	81	939	0,54	0,84	1,75	535
1982	691	706	9,1	13,9	4,5	76	1440	0,62	0,74	1,56	598
1983	719	729	10,0	14,5	5,3	78	1298	0,55	0,78	1,78	587
1984	943	947	9,0	13,1	4,4	80	1127	0,51	0,67	1,59	517
1985	616	616	8,4	12,6	3,4	77	1179	0,56	0,55	1,48	545
1986	796	792	8,3	12,6	2,6	76	1331	0,59	0,54	1,58	562
1987	886	887	8,3	12,3	3,1	77	1214	0,59	0,62	1,53	524
1988	864	883	10,4	13,7	5,1	77	1171	0,54	0,58	1,51	560
1989	630	628	10,6	14,9	5,6	74	1508	0,58	0,49	1,36	599
1990	778	771	10,5	14,8	5,2	72	1480	0,58	0,50	1,39	584
Mittel	758	776	9,0	13,3	4,5	80	1238	0,61	0,92	1,81	557

Tab 1 : Jahreswerte der wichtigsten meteorologischen Meßgrößen

Monat	N_1 mm	N_0 mm	T_M °C	T_{max} °C	T_{min} °C	RF %	SD h	STR J/cm²/min
11	70,8	71,8	4,9	8,1	1,7	87	37	0,21
12	75,1	77,5	2,7	5,0	-0,1	88	18	0,13
1	68,1	70,7	1,3	3,7	-1,7	87	25	0,17
2	48,0	50,5	1,6	4,9	-1,9	83	52	0,33
3	62,3	64,0	4,4	8,5	0,5	80	91	0,54
4	45,6	47,0	7,7	12,6	2,4	73	129	0,84
5	62,7	63,9	12,7	18,0	6,7	71	183	1,05
6	74,4	75,0	15,4	20,5	9,8	74	165	1,09
7	68,0	69,7	17,2	22,2	11,4	76	170	1,05
8	61,5	62,2	17,2	22,6	11,2	76	175	0,92
9	63,3	64,2	13,4	18,7	8,4	82	115	0,63
10	57,7	58,5	9,6	14,0	5,4	86	77	0,38
Winter	370	382	3,8	7,1	0,1	83	353	0,37
Sommer	388	394	14,2	19,3	8,8	77	886	2,85
Jahr	758	776	9,0	13,3	4,5	80	1238	0,61

Tab. 2: 25jährige Monatsmittel bzw. -summen der Wetterdaten für den Zeitraum 1966-1990

2.1.4 Die Globalstrahlung

Die Globalstrahlung umfaßt den kurzwelligen Teil der Himmelsstrahlung, der entweder direkt von der Sonne einfällt oder diffus über Wolken usw. die Erdoberfläche erreicht.

Die Globalstrahlung wird mit dem analog schreibenden Gerät nach Robitzsch gemessen. Die Tagesmittel- und -extemwerte werden aus den Schreibstreifen entnommen und zu Monats- und Jahreswerten zusammengefaßt. Die Einheit ist Joule pro Quadratzentimeter und Minute (J/cm²/min).

Die Jahreswerte sind in Tabelle 1, die mittleren Monatswerte in Tabelle 2 zusammengestellt.

Im Mittel der 25 Meßjahre ergibt sich eine Globalstrahlung von 0,61 J/cm²/min. Das Minimum liegt im Mittel bei 0,13 J/cm²/min und zwar im Dezember. Das mittlere Maximum haben wir im Juni mit 1,09 J/cm²/min.

2.1.5 Die Windgeschwindigkeit

Der Windweg wird mit drei Kontaktanemometern an einem Mast in 3, 6 und 9 m Höhe gemessen. Die Meßwerte werden sowohl analog registriert als auch mit einem Zählwerk laufend addiert und angezeigt. Die Tageswerte werden durch tägliches Ablesen der Zählwerke um 7^{30} Uhr ermittelt, die 14-Uhr-Werte aus den Schreibstreifen entnommen. Alle Werte werden in m/s angegeben. Die Jahreswerte aus 3 und 9 m Höhe sind in Tab. 1 zusammengestellt. Im 25jährigen Mittel haben wir in 3 m eine mittlere Windgeschwindigkeit von 0,92 m/s. Die Jahreswerte weisen einen deutlich abnehmenden Trend auf, der von Werten um 1,50 m/s in den ersten Jahren bis zu Werten um 0,50 m/s in den letzten Jahren reicht.

Diese Abnahme der Windgeschwindigkeit im Laufe der Zeit ist mit dem Aufwachsen des Waldes in Zusammenhang zu bringen.

Weiterhin ist aus den Meßwerten zu entnehmen, daß mit zunehmender Meßhöhe auch die Windgeschwindigkeit wächst und zwar hier im 25jährigen Mittel von 0,92 m/s in 3 m Höhe auf 2,01 m/s in 9 m Höhe.

2.1.6 Die potentielle Verdunstung nach Penman

Die bisher genannten meteorologischen Meßgrößen Lufttemperatur, relative Luftfeuchte, Sonnenscheindauer, Globalstrahlung und Windgeschwindigkeit werden auf Tageswertbasis verwendet, um die potentielle Verdunstung nach Penman (17) zu berechnen. Dieser Wert gibt an, wieviel Wasser von einer kurz gehaltenen Grasfläche bei optimaler Wasserversorgung verdunstet. Er charakterisiert so den Verdunstungsanspruch der Luft und ist Basis für die Berechnung der aktuellen Transpiration. Einzelheiten zur Berechnungsformel, die einen Strahlungs- und einen Ventilationsterm beinhaltet, und zum zweckmäßigen Rechenweg finden sich in (17).

Die Jahreswerte sind in Tabelle 1 aufgelistet. Das 25jährige Mittel beträgt 557 mm/a. Der kleinste Wert trat 1983 mit 490 mm/a, der höchste 1976 mit 629 mm/a auf. 1976 war gleichzeitig das Jahr mit den geringsten Niederschlägen.

2.1.7 Der Niederschlag

Den Niederschlägen wird in St. Arnold besondere Aufmerksamkeit geschenkt. Sie liefern letztlich alles Wasser, das zu bewirtschaften unsere Aufgabe ist. Seinen Weg gilt es zu verfolgen und die Mengen- (und sonstigen) Veränderungen aufzuspüren.

Die Messung des Niederschlags erfolgt daher auf mehrfache und verschiedene Weise:

1. mit einem Regenmesser nach Hellmann in 1 m Höhe einmal auf der Freifläche in der Nähe des Schreibers und zum anderen an einem stark geschützten Standort am Rande des Weymouthskiefernbestandes.

2. mit einem Regenmesser in 0,40 über Flur in Zusammenhang mit den Messungen am Landverdunstungs-Kessel "Class A".

3. Mit einem Regenschreiber in Bodengleiche, der in einer Meßgrube steht. Sein Sinn ist zweifach: Erstens liefert er Informationen zum zeitlichen Verlauf der Niederschläge. Zum zweiten ist mit seiner Hilfe der windbedingte Meßfehler quantifizierbar.

4. Mit zwei Hellmann'schen Regenmessern über den Kronen der beiden Waldbestände.

Hier sollen nur die Ergebnisse des unter 3 genannten Regenschreibers (No) und die des danebenstehenden Regenmessers (N_1) aufgeführt werden (siehe Tabelle 1 und 2)

Danach werden in Erdbodengleiche knapp 3 % mehr Niederschlag als in 1 m Höhe gemessen. Dieser Unterschied geht auf die verfälschende Wirkung des Windes zurück. Da der in Erdbodengleiche gemessene Niederschlag No also dem wirklichen näherkommt, wird er als Bezugsgröße für alle folgenden Betrachtungen verwendet. Sein 25jähriges

Mittel liegt bei 776 mm/a. Das trockenste Jahr war 1976 mit 552 mm, das nasseste 1966 mit 1169 mm. Die Schwankungsbreite ist bemerkenswert groß, die der mittleren Monatssummen dagegen nur schwach ausgeprägt. Ein Minimum läßt sich im April (Tabelle 2) mit 47 mm ausmachen. Der Februarwert mit 50,5 mm liegt aber nur wenig darüber. Der im Mittel nasseste Monat ist der Dezember mit 77,5 mm. Aber auch der Sommer weist ein zweites Maximum mit 75,0 mm im Juni auf. Anders als bei den andren aufgeführten meteorologischen Meßgrößen weist also der Niederschlag keinen deutlichen jahreszeitabhängigen Gang auf.

Die Schwankungen von Jahr zu Jahr sind beträchlich. Auch um letzteres zu verdeutlichen sind die Jahreswerte von No der 25jährigen Beobachtungsreihe in Abb. 3 dargestellt. Diese Ganglinie läßt folgende charakteristischen Merkmale erkennen: Die erste Pentade ist gekennzeichnet durch in der Mehrzahl überdurchschnittlich nasse Jahre mit teilweise sehr großen Schwankungen von Jahr zu Jahr. Die Jahre 71 bis 80 zeigen dagegen niedrigere Werte meist unter dem Mittel. Die Schwankungen dieser Dekade sind klein. In der letzten Dekade der Beobachtungszeit sind dagegen die Schwankungen wieder deutlich größer. Die Höchstwerte erreichen jedoch nicht die Spitzenwerte der Anfangsjahre, so daß diese Zeit als nur wenig überdurchschnittlich anzusetzen ist.

2.2 Die lysimetrischen Messungen

Lysimetrische Messungen im eigentlichen Sinne sind die Messungen der Sickerwasserabläufe aus den Lysimetergefäßen. Hier soll der Begriff etwas weiter gefaßt werden und auch die Messungen unmittelbar auf den Lysimeteroberflächen, also an den Pflanzenbeständen, umfassen. Das sind die Messungen der Interzeptionsverdunstung und des Zuwachses der Waldbestände.

2.2.1 Der Sickerwasserablauf

An der Großlysimeteranlage St. Arnold wird der Sickerwasserablauf aus drei Becken gemessen, die die Abmessungen 20 m mal 20 m mal 3,5 m haben. Sie bestehen aus Beton und weisen an ihrem Grunde ein Dränsystem aus Porositröhren auf. Diese wiederum sind mit Filterkies überdeckt. In die Becken wurde der vorher abgeschobene Boden möglichst schichtgetreu wieder eingefüllt und mit Grünland (Lysimeter 1), mit Laubwald (Lysimeter 2) und mit Weymouthskiefernwald (Lysimeter 3) bepflanzt. Der Laubholzbestand, der anfangs zwölf verschiedene Holzarten beinhaltete, wurde im Jahre 1970 zu einem Eichen-Buchenwald vereinheitlicht.

Das von den Dränsystemen aufgenommene Wasser wird in einen Meßkeller geleitet, wo es -nach Auffangbecken getrennt- gesammelt und gemessen wird. Danach sickert es über einen Versickerungsschacht dem Grundwasser zu, das hier in ca. 5 m Tiefe ansteht.

Die Sickerwassermengenbestimmung erfolgt mit Hilfe von drei Kesseln, die jeweils 400 l fassen. Sind sie gefüllt, werden sie mit einem speziellen Hebermechanismus entleert. Die Wasserstände in den Kesseln werden analog registriert, so daß Summenkurven der Sickerwasserabläufe zur Verfügung stehen. Aus ihnen werden mit Hilfe der ADV Tageswerte gebildet, die wiederum zu Monats- und Jahreswerten zusammengefaßt werden (siehe Tabelle 3).

Die Jahreswerte der 25 Beobachtungsjahre aus den drei Pflanzenbeständen sind zusammen mit denen des Niederschlags in Abbildung 3 dargestellt.

Abflussjahr	No	S1	S2	S3	No-S1	No-S2	No-S3	S1-S2	S1-S3
66	1169	658	661	670	511	508	499	-3	-12
67	954	486	461	468	468	493	486	25	18
68	1006	597	543	486	409	463	520	54	111
69	669	364	359	310	305	310	359	5	54
70	894	378	396	272	516	498	622	-18	106
Summe 66-70	**4692**	**2483**	**2420**	**2206**	**2209**	**2272**	**2486**	**63**	**277**
Mittelwert	**938,4**	**496,6**	**484,0**	**441,2**	**441,8**	**454,4**	**487,2**	**12,6**	**55,4**
71	604	362	355	222	242	249	382	7	140
72	670	238	240	74	432	430	596	-2	164
73	634	334	303	165	300	331	469	31	169
74	746	331	336	199	415	410	547	-5	132
75	760	521	468	299	239	292	461	53	222
Summe 71-75	**3414**	**1786**	**1702**	**959**	**1628**	**1712**	**2455**	**84**	**827**
Mittelwert	**682,8**	**357,2**	**340,4**	**191,8**	**325,6**	**342,4**	**491,0**	**16,8**	**165,4**
76	552	264	245	116	288	307	436	19	148
77	668	313	277	123	355	391	545	36	190
78	725	328	249	115	397	476	610	79	213
79	719	419	313	147	300	406	572	106	272
80	766	408	274	137	358	492	629	134	271
Summe 76-80	**3430**	**1732**	**1358**	**638**	**1698**	**2072**	**2792**	**374**	**1094**
Mittelwert	**686,0**	**346,4**	**271,6**	**127,6**	**339,6**	**414,4**	**558,4**	**74,8**	**218,8**
81	895	454	337	226	441	558	669	117	228
82	706	390	292	174	316	414	532	98	216
83	729	462	368	174	267	361	555	94	288
84	947	550	406	250	397	541	697	144	300
85	616	342	272	171	274	344	445	70	171
Summe 81-85	**3893**	**2198**	**1675**	**995**	**1695**	**2218**	**2898**	**523**	**1203**
Mittelwert	**778,6**	**439,6**	**335,0**	**199,0**	**339,0**	**443,6**	**579,6**	**104,6**	**240,6**
86	792	427	249	138	365	543	654	178	289
87	887	522	313	250	365	574	637	209	272
88	883	563	347	235	320	536	648	216	328
89	628	363	216	155	265	412	473	147	208
90	771	339	137	90	432	634	681	202	249
Summe 86-90	**3961**	**2214**	**1262**	**868**	**1747**	**2699**	**3093**	**952**	**1346**
Mittelwert	**792,2**	**442,8**	**252,4**	**173,6**	**349,4**	**539,8**	**618,6**	**190,4**	**269,2**
ges. Summe	**19390**	**10413**	**8417**	**5666**	**8977**	**10973**	**13724**	**1996**	**4747**
ges. Mittelwert	**775,6**	**416,5**	**336,7**	**226,6**	**359,1**	**438,9**	**549,0**	**79,8**	**189,9**

Tab. 3: Jahreswerte von Niederschlag (No) und Sickerwasserablauf (S) und ihrer Differenzen untereinander

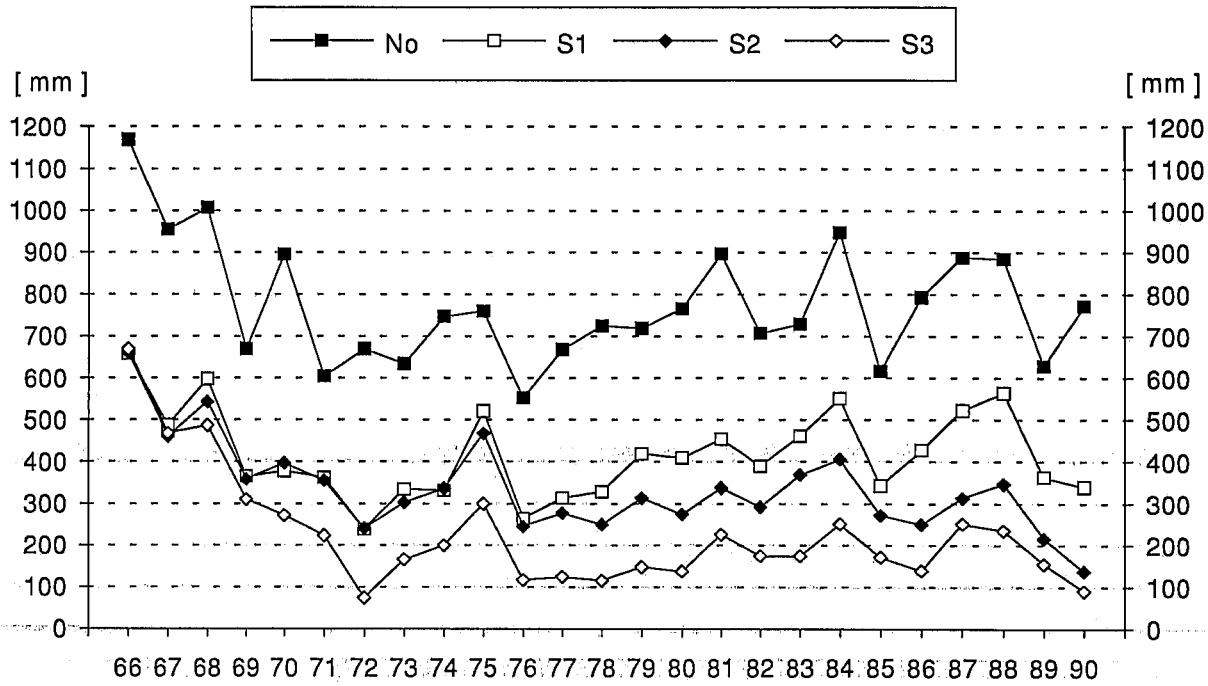

Abb. 3: Jahreswerte der Meßergebnisse von Niederschlag (No) und Sickerwasserablauf (S)

Daraus ist folgendes zu erkennen:
Der Gang des Sickerwasser aus den drei Bekken zeigt eine gewisse Parallelität zum Niederschlag, die beim Gras noch recht deutlich, bei den Waldbeständen weniger klar zu erkennen ist.

Vergleicht man den Sickerwasserablauf der drei Becken untereinander, fällt auf, daß in den ersten 10 Jahren sich Gras und Laubwald sehr ähnlich verhalten, während die Weymouthskiefern schon vom dritten Jahr ab laufend weniger Sickerwasser als die beiden anderen Bestände liefern. In den Jahren 1976 bis 85 liegen die Eichen-Buchen bezügliches ihres Sickerwasseraufkommen dann zwischen Grünland und Weymouthskiefern, jedoch klar zum Grünlandniveau hin tendierend. Das ändert sich in der letzten Pentade, wo sich die Ganglinie der Eichen-Buchen-Versickerung immer mehr der der Weymouthskiefern annähert. Man darf gespannt sein, ob die beiden Linien in späteren Jahren zusammenlaufen oder sich gar kreuzen werden.

Dies Verhalten im Wald hat ganz offensichtlich seine Ursache in der speziellen Entwicklung der Pflanzenbestände.

Während das Grünland im wesentlichen als Vegetationsart mit über die Jahre konstanten hydrologischen Eigenschaften anzusehen ist, ändern sich bei aufwachsendem Wald z.B. oberirdische Pflanzenmasse und Wurzeltiefe laufend von Jahr zu Jahr; bei Eichen-Buchen im Vergleich zu Grünland zunächst offenbar kaum, dann doch deutlich und schließlich verstärkt. Bei den Weymouthskiefern ist diese Entwicklung dagegen schon in den ersten beiden Dekaden rasant, danach abgeschwächt und schließlich in der letzten Dekade kaum noch erkennbar.

2.2.2 Die Gesamtverdunstung

Eine nicht wägbare Großlysimeteranlage wie die in St. Arnold liefert Werte zur aktuellen Gesamtverdunstung nur für das vieljährige Mittel. Für Aussagen zur kürzerfristigen Verdunstung fehlt die Bodenfeuchteänderung. Andererseits ist bei aufwachsendem Wald mit inkonstantem Verhalten zu rechnen, so daß vieljährige Mittel mehr verschleiern als erhellen. Deshalb soll als erste Näherung an die aktuelle Gesamtverdunstung die jährliche Differenz aus Niederschlag und Sickerwasserablauf angesehen werden. Sie wird in Tabelle 3 aufgeführt und ist in Abb. 4 für alle drei Lysimeter dargestellt.

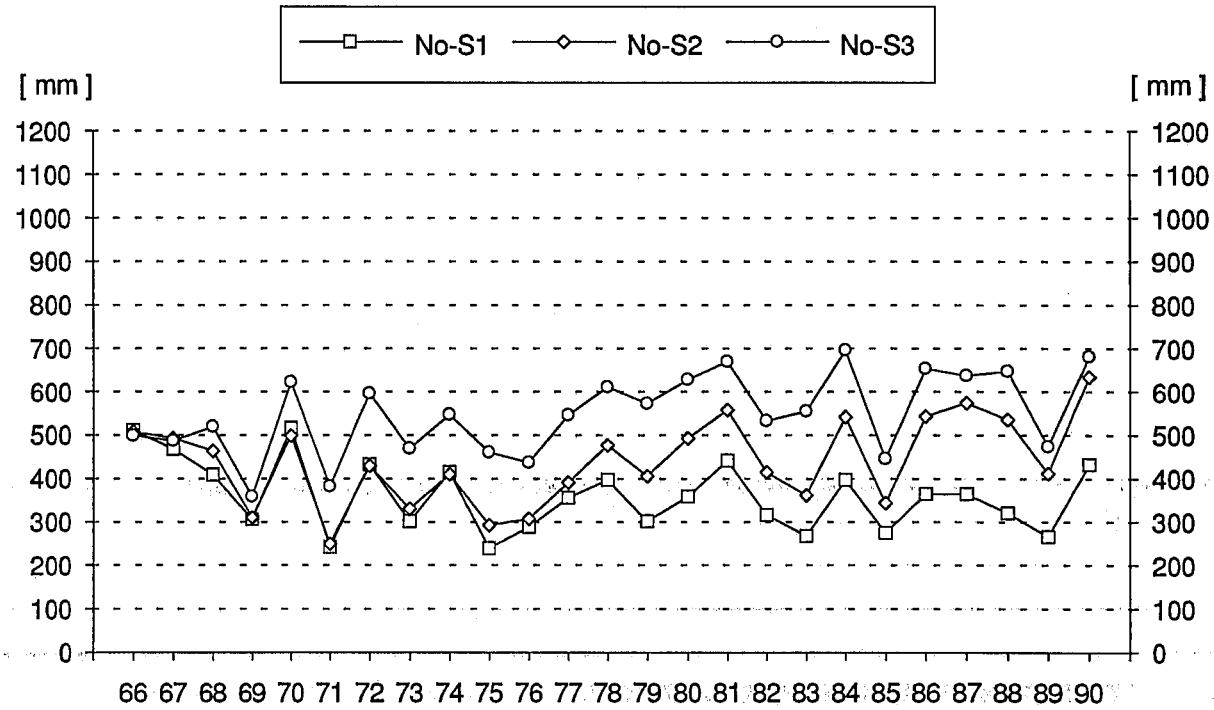

Abb. 4: Differenzen aus Niederschlag (No) und Sickerwasser (S)

Für *Grünland* ergibt sich ein Mittelwert über alle Jahre von rund 360 mm/a, ein Wert der für den leichten Heidepodsol durchaus der Erwartung entspricht. Auffällig sind die deutlich höheren Werte der ersten Dekade, die mit sehr hohen Niederschlagswerten zusammenfallen. Entweder ist in diesen Jahren auf Grund des reichlichen Wasserdargebots tatsächlich mehr verdunstet, oder aber es sind unbekannte Anteile des Regens unbemerkt *überland* von der Fläche abgeflossen. Überlandabfluß wurde nur einmal bei einem sommerlichen Starkniederschlag während der Bauphase beobachtet; sobald Bewuchs auf den Flächen war, nicht mehr. Deshalb werden die hohen Verdunstungswerte in der ersten Pentade für realistisch gehalten.

Bei den *Eichen-Buchen* verläuft die zeitliche Entwicklung der Verdunstung in der ersten Dekade ähnlich wie beim Grünland. Das Niveau ist nur unwesentlich höher. Danach jedoch ist eine deutliche Steigerung zu beobachten, die den Unterschied zum Grünland immer größer werden läßt. Erst in der letzten Pentade scheint eine gewisse Konstanz erreicht zu sein. Der letzte Wert der Gesamtreihe allerdings, der höchste überhaupt, gibt Anlaß zu der Vermutung, daß die Entwicklung doch noch nicht abgeschlossen ist.

Die *Weymouthskiefern* zeigen durchgängig das höchste Verdunstungsniveau im Vergleich zu den anderen Vegetationsarten. Hier steigen die Werte in der ersten Hälfte der Berichtszeit deutlich an, während sie in der zweiten Hälfte weitgehend trendfrei sind und dann im Mittel bei 600 mm/a liegen, allerdings mit erheblichen Schwankungen um diesen Mittelwert. Auch bei den Weymouthskiefern tritt 1990 ein sehr hoher Verdunstungswert auf. Es ist hier jedoch nicht der höchste der Gesamtreihe wie bei den Eichen-Buchen, sondern nur der zweithöchste; möglicherweise ist das ein Indiz dafür, daß die Kiefernverdunstung in der Zukunft tatsächlich keinen steigenden Trend mehr aufweisen wird, was aus den Pentadenmitteln (Tabelle 3) keineswegs klar ersichtlich ist.

Von Interesse und beträchtlicher Aussagekraft ist weiterhin die Differenz der Sickerwasserabläufe aus den verschiedenen Vegetationsarten untereinander. So charakterisiert die Differenz S_1 - S_2 die Mehrverdunstung (oder Minderneubildung) der Eichen-Buchen gegenüber dem Grünland. Die Entwicklung dieser Werte über die 25jährige Versuchszeit hin ist in Abb. 5 dargestellt. Sie macht deutlich wie, dem zögerlichen Aufwuchs dieser Waldart entsprechend, die Laubwaldverdunstung erst in der dritten Pentade gegenüber der Grün-

landverdunstung deutlich zunimmt und in der vierten einen ziemlich konstanten Wert um 100 mm/a annimmt. Dieser Wert ist seinerzeit in (13) zur Festlegung der Verdunstung von Laubwald maßgeblich herangezogen worden und muß möglicherweise aufgrund der jüngeren Entwicklung (1986-1990) erhöht werden, wenn sich herausstellt, daß der Verdunstungssprung auf 540 mm/a tatsächlich bestandestypisch ist und nicht auf die speziellen Witterungsverhältnisse in dieser Pentade zurückgeht. Das werden die Meßergebnisse der nächsten Jahre klären.

Die Differenzen S_1 - S_3 (Abb. 5) geben entsprechend die Mehrverdunstungswerte der Weymouthskiefern im Vergleich zu Grünland wieder. Sie sind vom dritten Jahr ab durchgängig größer als die der Eichen-Buchen und wachsen laufend bis 1979 zügig an. Danach stellt sich ein in etwa konstantes Niveau von 256 mm/a ein, von dem man annehmen kann, daß es sich in Zukunft halten wird.

Die in (13) angesetzten 220 mm/a für die mittlere Nadelwaldmehrverdunstung sind also eher etwas zu knapp als zu hoch angesetzt. Zum jetzigen Zeitpunkt ergibt sich aber noch nicht die Notwendigkeit einer Korrektur. Es bleibt die Zukunftsentwicklung abzuwarten.

2.2.3 Die Interzeptionsverdunstung

Bei großwüchsiger Vegetation stellt die Interzeptionsverdunstung einen wesentlichen Teil der Gesamtverdunstung (Evpotranspiration) dar. Sie wird in der Weise gemessen, daß man neben dem Freilandniederschlag den Bestandsniederschlag ermittelt. Letzterer setzt sich aus dem durchtropfenden und dem stammablaufenden Niederschlag zusammen.

Die Differenz aus Freilandniederschlag und Bestandsniederschlag ergibt die Interzeptionsverdunstung.

Der durchtropfende Niederschlag auf den Flächen 2 und 3 wird mit Hilfe von Durchtropfwannen aufgefangen und in Sammeltonnen geleitet, die mit Schreibpegeln ausgerüstet sind.

Zur Stammablaufmessung sind jeweils 10 Stämme mit Manschetten versehen worden, die das stammablaufende Wasser auffangen. Es wird in eine gemeinsame Sammeltonne geleitet, wo wieder der Wasserstand mit einem Schreibpegel analog registriert wird.

Diese Meßweise erlaubt ereignisweise Auswertungen (9), (10), (12).

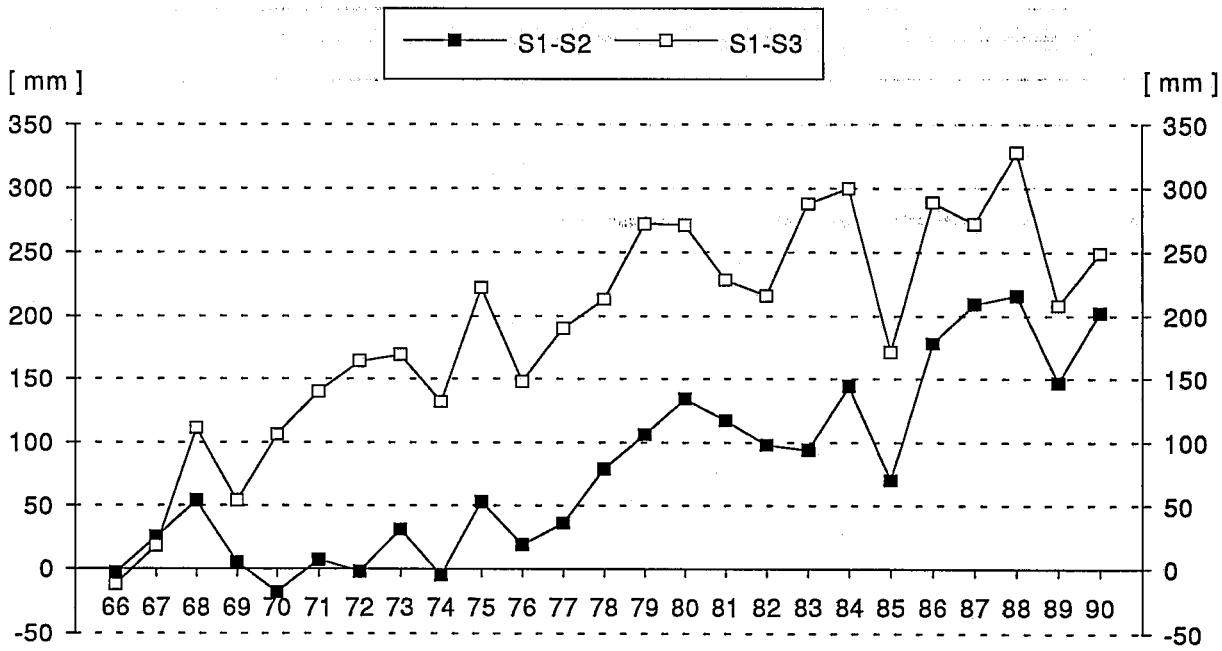

Abb. 5: Differenzen der Sickerwasserabläufe der drei Vegetationsarten untereinander

Die Messungen zur Interzeption wurden im Mai 1976 in Angriff genommen und zwar mit dem Aufstellen der Durchtropfwannen in den beiden Waldbeständen. Ein Jahr später wurden die Meßeinrichtungen für den Stammablauf in den Weymouthskiefern installiert. Wegen ihres sehr zögerlichen Aufwuchses konnte in den Eichen-Buchen damit erst im Mai 1982 begonnen werden. Da zunächst nur in der warmen Jahreszeit gemessen werden konnte, liegen erst ab 1984 ganzjährige Meßreihen vor. Die Werte dieser kompletten Meßjahre sind in Tab. 4 zusammengestellt. Die Ergebnisse der davorliegenden Meßzeit sind in (9) zu finden.

Im Mittel der sieben vollständigen Meßjahre fallen 789 mm Niederschlag im Freiland. 674 mm davon erreichen in den Eichen-Buchen 515 mm in den Weymouthskiefern den Waldboden (Bestandsniederschlag). Der Anteil des Stammablaufs daran ist gering: Bei den Eichen-Buchen sind es 42 bei den Weymouthskiefern 56 mm. Die sich daraus ergebenden Interzeptionsverdunstungen liegen bei den Eichen-Buchen im Mittel bei 115 mm; bei den Weymouthskiefern dagegen mit 275 mm deutlich höher. Das ist offensichtlich eine Folge der hier sehr viel größeren oberirdischen Pflanzenmasse, die bei jedem Niederschlagsereignis benetzt wird und danach wieder abtrocknet.

Abfluß-jahr	Freiland-niederschlag	Durchtropfender Niederschlag		Stammablauf		Interzeption		Bestands-niederschlag	
		Eichen-Buchen	Weymouths-kiefern	Eichen-Buchen	Weymouths-kiefern	Eichen-Buchen	Weymouths-kiefern	Eichen-Buchen	Weymouths-kiefern
1984	947	790	594	72	64	85	289	862	658
1985	616	487	310	25	33	104	273	512	342
1986	792	640	412	40	52	112	328	680	464
1987	887	681	530	56	72	149	285	738	602
1988	883	695	480	39	69	150	334	734	550
1989	628	501	376	23	42	104	210	524	418
1990	771	634	507	37	61	100	203	671	568
Gesamt	5524	4428	3209	292	393	804	1922	4721	3602
Mittel	789	633	458	42	56	115	275	674	515

Tab 4: Jahreswerte der Interzeptionsmeßergebnisse

2.2.4 Die Zuwachsmessungen

Zur Charakterisierung der Entwicklung der Waldbestände und zur Bestimmung der Zuwächse werden folgende Messungen, intensiviert mit Beginn der Interzeptionsmessungen, durchgeführt:

Nach Ende eines jeden Abflußjahres wird die *Anzahl der lebenden Stämme* auf den Beobachtungsflächen 2 und 3 festgestellt. Änderungen zu Vorjahr gehen bei den Weymouthskiefern (Fläche 3) meist auf Hiebmaßnahmen im voraufgegangen Winter zurück. Die festgestellte Zahl der Stämme hat also während der Vegetationszeit auf der Fläche gestanden.

Bei den Eichen-Buchen (Fläche 2) wurden keine Durchforstungen vorgenommen. Die Reduktion der Stammzahlen ist die Folge natürlichen Absterbens schwacher Bäume, die durch vitalere Nachbarn unterdrückt wurden. Auszunehmen sind die Veränderungen im Zusammenhang mit der Bestandsvereinheitlichung in den Jahren 1970 bis 1978, wo alle Nicht-Eichen und -Buchen durch Eichen und Buchen ersetzt wurden oder Nachpflanzungen nötig waren. (Siehe Abb. 6 u. 7).

Zum selben Zeitpunkt nämlich nach Ende eines jeden Abflußjahres werden die *Baumhöhen* gemessen. Das geschah anfangs bis zu Höhen von 6 m mit einer Meßlatte, danach mit einem Winkelmeßgerät.

Schließlich werden noch die *Brusthöhendurchmesser* aller Stämme mit Pi-geteilten Meßbändern (19), die größtenteils fest installiert sind, festgestellt.

Die Meßergebnisse der Baumhöhen und der Stammzahlen im Bestandsmittel sind in den Abbildungen 6 bis 8 dargestellt und in Tabelle 5 aufgelistet.

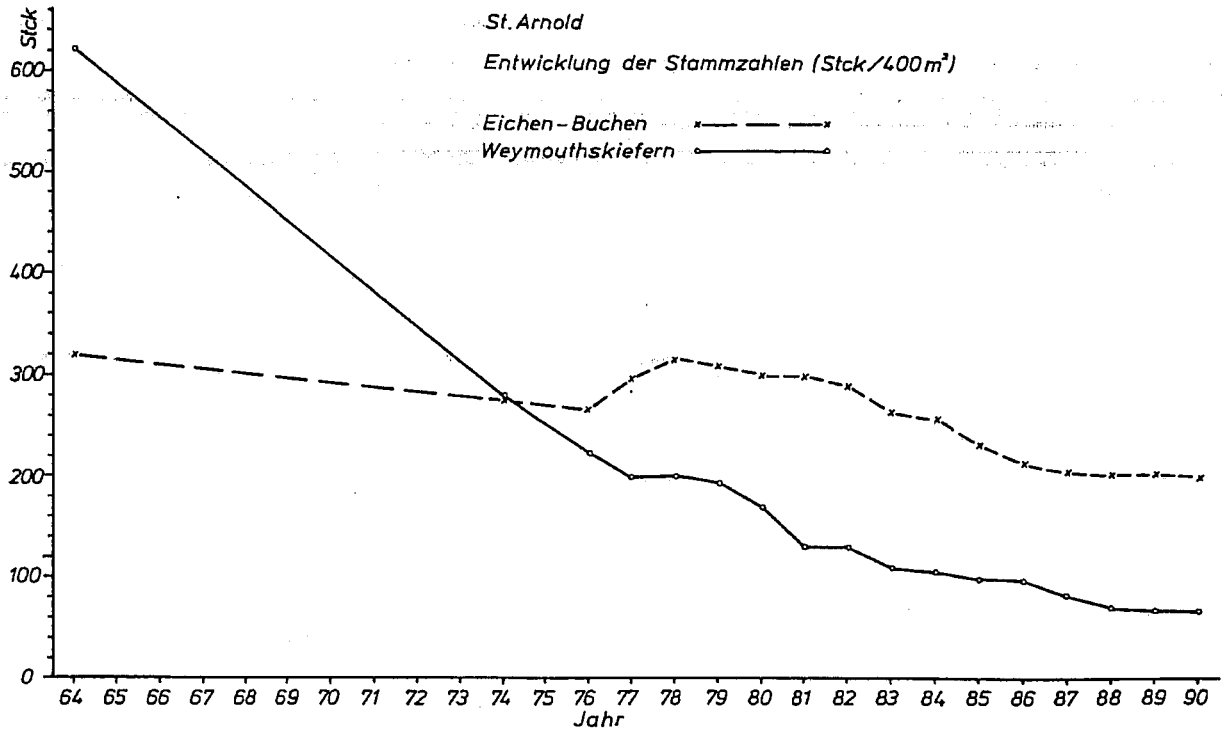

Abb. 6: Entwicklung der Stammzahlen auf Fläche 2 (Eichen-Buchen) und auf Fläche 3 (Weymouthskiefern)

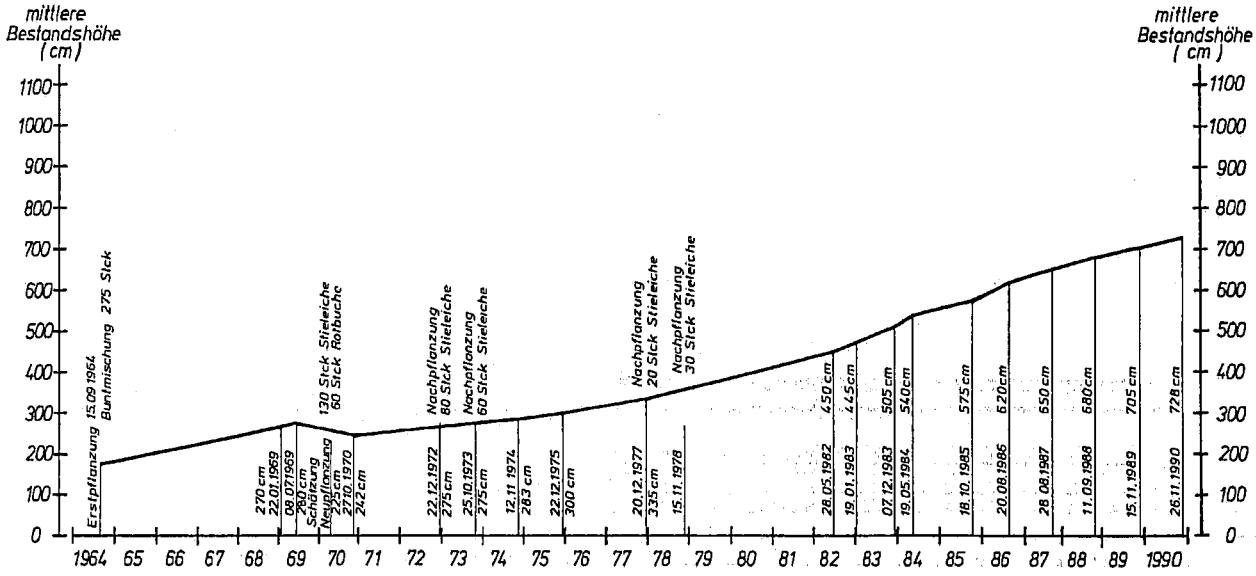

Abb. 7: Entwicklung der Baumhöhen auf Fläche 2 (Eichen-Buchen)

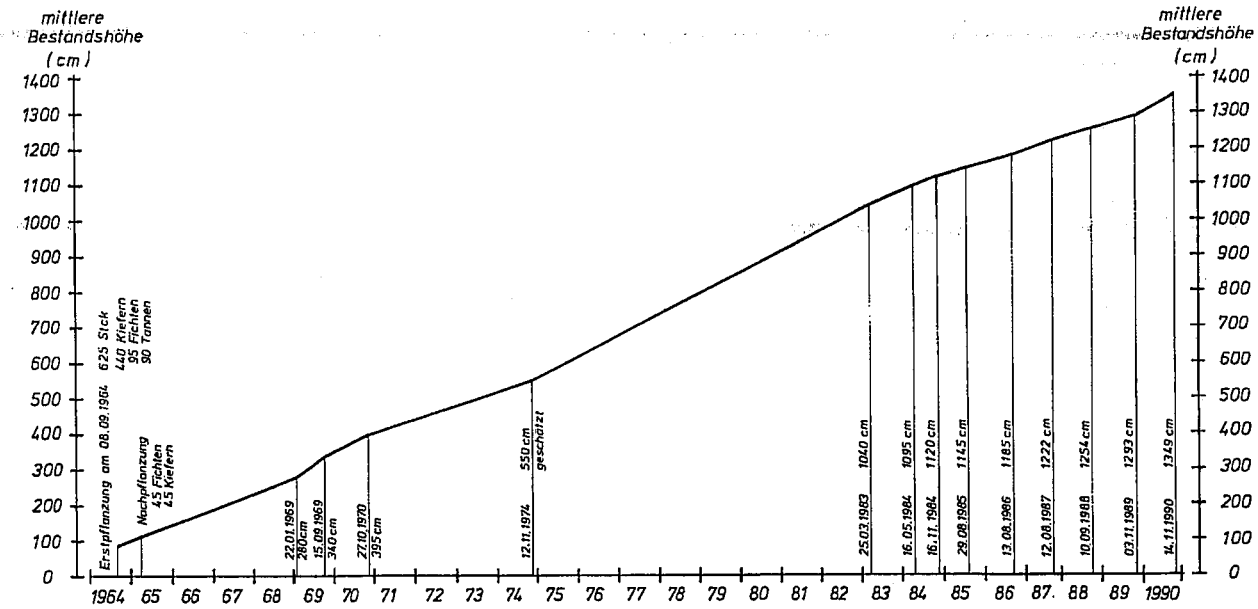

Abb. 8: Entwicklung der Baumhöhen auf Fläche 3 (Weymouthskiefern)

	Eichen - Buchen						Weymouthskiefern					
Jahr	Stamm-zahl	Änderung	mittl. Baumhöhe	Änderung	mittl. Durchmesser	Änderung	Stamm-zahl	Änderung	mittl. Baumhöhe	Änderung	mittl. Durchmesser	Änderung
Herbst	Stück	Stück	m	m	cm	cm	Stück	Stück	m	m	cm	cm
1974	(275)		2,83				(280)		5,50			
1975			3,00									
1976	266	(-9)					223	(-57)			8,23	
1977	286	+20	3,35	Σ + 1,67 Φ + 0,24			199	-24			9,02	+0,79
1978	316	+30					199	0		Σ + 4,90 Φ + 0,61	9,48	+0,46
1979	310	-6					194	-5			9,85	+0,37
1980	300	-10					170	-24			10,57	+0,72
1981	299	-1	4,50				132	-38			11,80	+1,32
1982	290	-9	4,75	+0,25			131	-1	10,40		12,26	+0,46
1983	265	-25	5,05	+0,30			110	-21	(10,95)	(+0,55)	12,80	+0,54
1984	257	-8	5,40	+0,35	5,15	(+0,27)	108	-2	(11,20)	(+0,25)	13,16	+0,36
1985	232	-25	5,75	+0,35	5,41	+0,26	99	-9	11,45	+0,25	13,74	+0,58
1986	214	-18	6,20	+0,45	5,64	+0,23	98	-1	11,85	+0,40	14,20	+0,46
1987	206	-8	6,50	+0,30	5,95	+0,31	85	-13	12,22	+0,37	15,40	+1,20
1988	204	-2	6,80	+0,30	6,17	+0,22	73	-12	12,54	+0,32	16,08	+0,68
1989	204	0	7,05	+0,25	6,30	+0,13	69	-4	12,93	+0,39	16,55	+0,47
1990	201	-3	7,28	+0,23	6,50	+0,20	67	-2	13,49	+0,56	16,84	+0,29

Tab. 5: Entwicklung der beiden Waldbestände in St. Arnold ab 1974

2.3 Die Simulationsberechnung des Bodenwasserhaushaltes

Auf der Basis der Kontimitätsgleichung und des Darcy-Gesetzes wurde ein numerisches Rechenmodell entwickelt, das er ermöglicht, die Wasserflüsse im ungesättigten Bodenbereich rechnerisch nachzubilden.

In dies Rechenmodell fließen unmittelbar die gemessenen meteorologischen Meßgrößen auf Tageswertbasis ein: Der Niederschlag nach Korrektur des systematischen Meßfehlers als

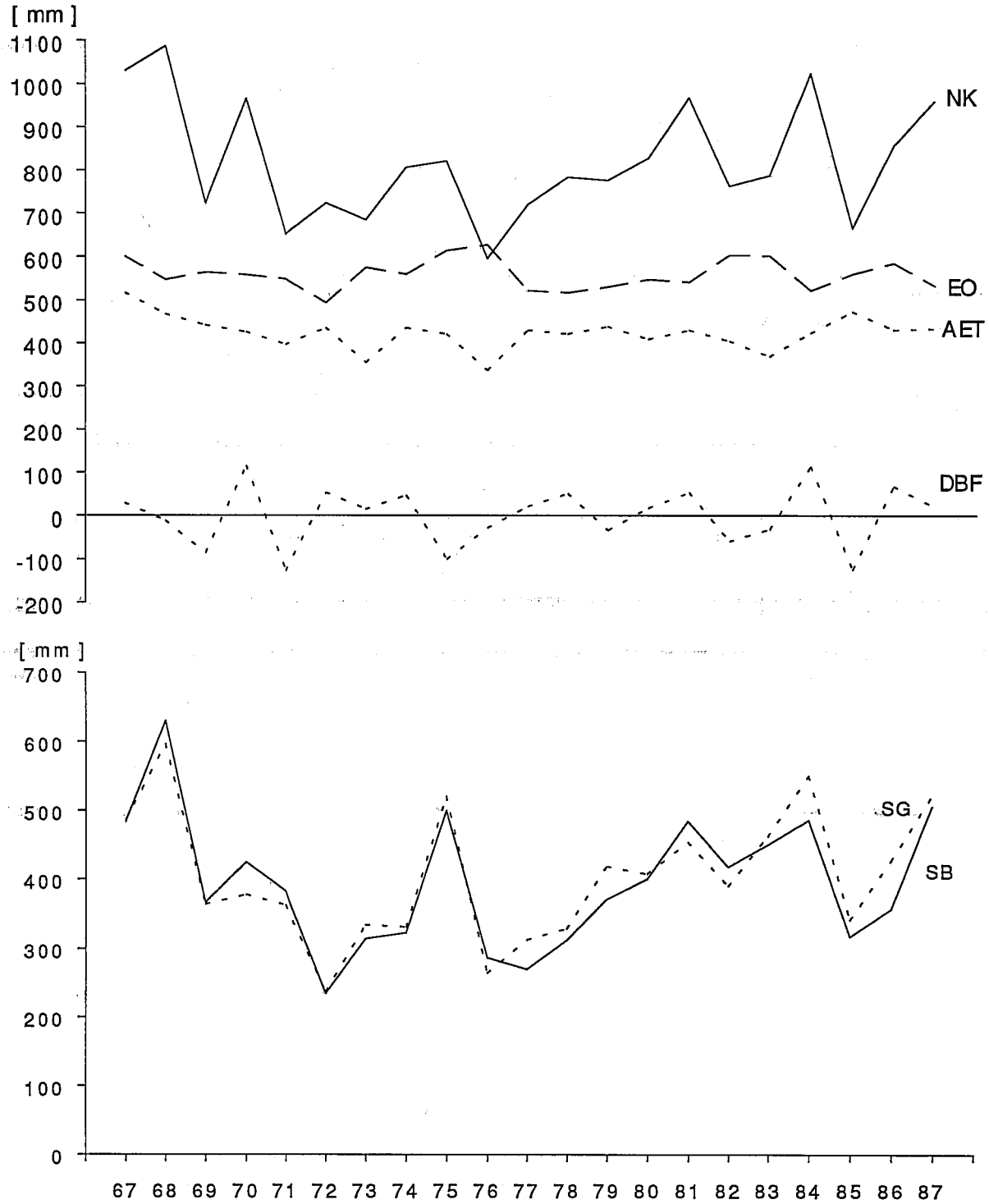

Abb. 9: Lysimeter 1 (Grünland). Jährliche Simulationsergebnisse des numerischen Modells

Wasserinput-Größe, die übrigen Meßwerte in Form der potentiellen Verdunstung nach Penman als Grundlage für die Berechnung der aktuellen Transpiration, ferner auch die gemessenen Interzeptionsverdunstungswerte, um die in den Waldbeständen der Freilandniederschlag gemindert werden muß, um hier auf aktuelle Input-Wassermengen zu kommen.

Der gemessene Sickerwasserablauf dient als Richtwert in der Eichphase und als Referenzwert in den Prognosejahren.

Einzelheiten zur angewandten Modelltechnik finden sich in (11) und (12).

Die Jahreswerte der Simulationsergebnisse sind in den Abbildungen 9 bis 11 dargestellt.

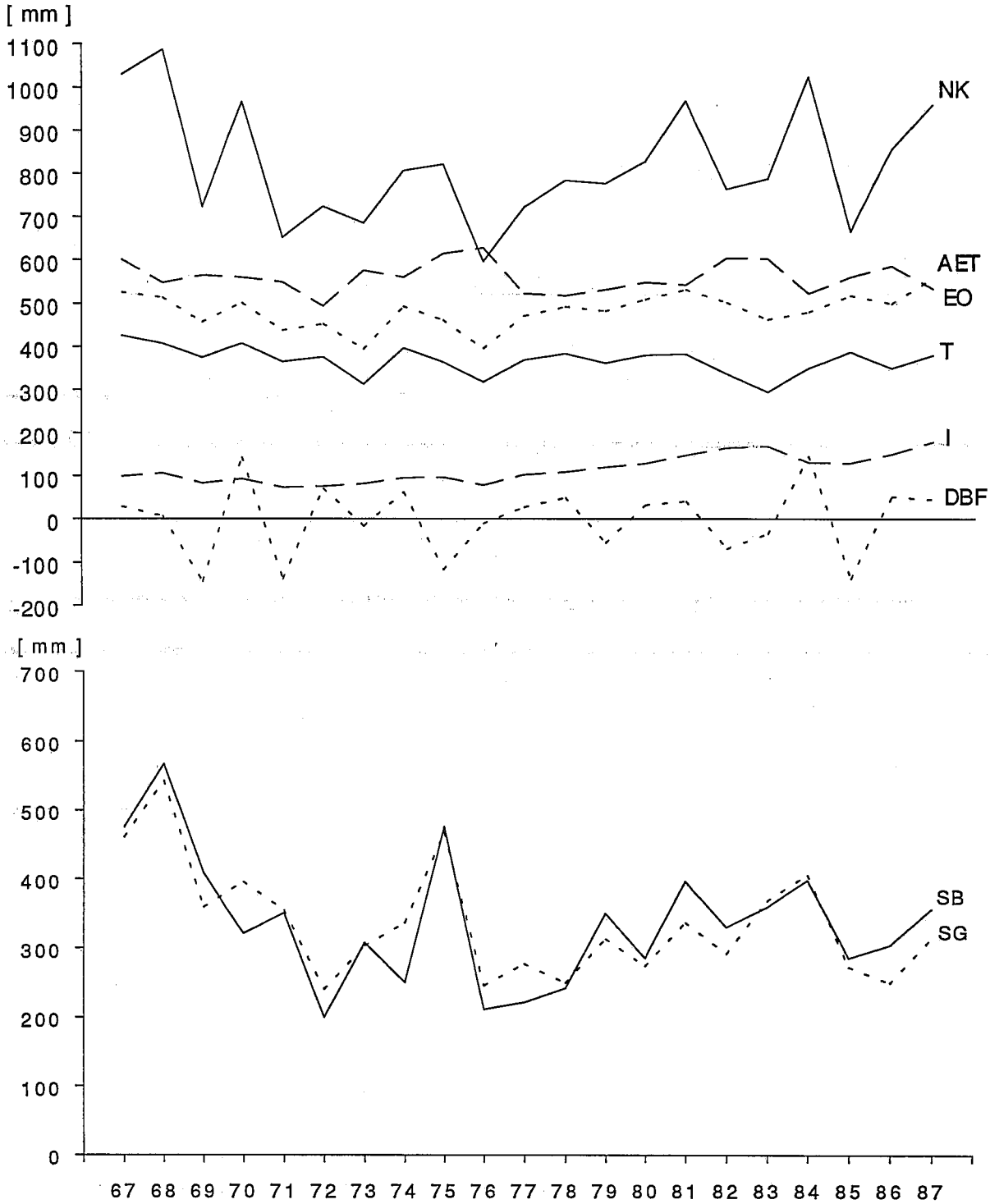

Abb. 10: Lysimeter 2 (Eichen-Buchen). Jährliche Simulationsergebnisse des numerischen Modells

Daraus und aus den in (11) dargestellten Modell-Ergebnissen auf Tageswertbasis geht hervor, daß es mit dem Modell gelingt, die verschiedenen Prozesse des Wasserhaushalts von bewachsenen Standorten recht gut nachzubilden.

Damit liegt ein sehr hilfreiches Instrument vor für die Lösung von vielerlei Aufgaben mit Bezug zum Bodenwasserhaushalt.

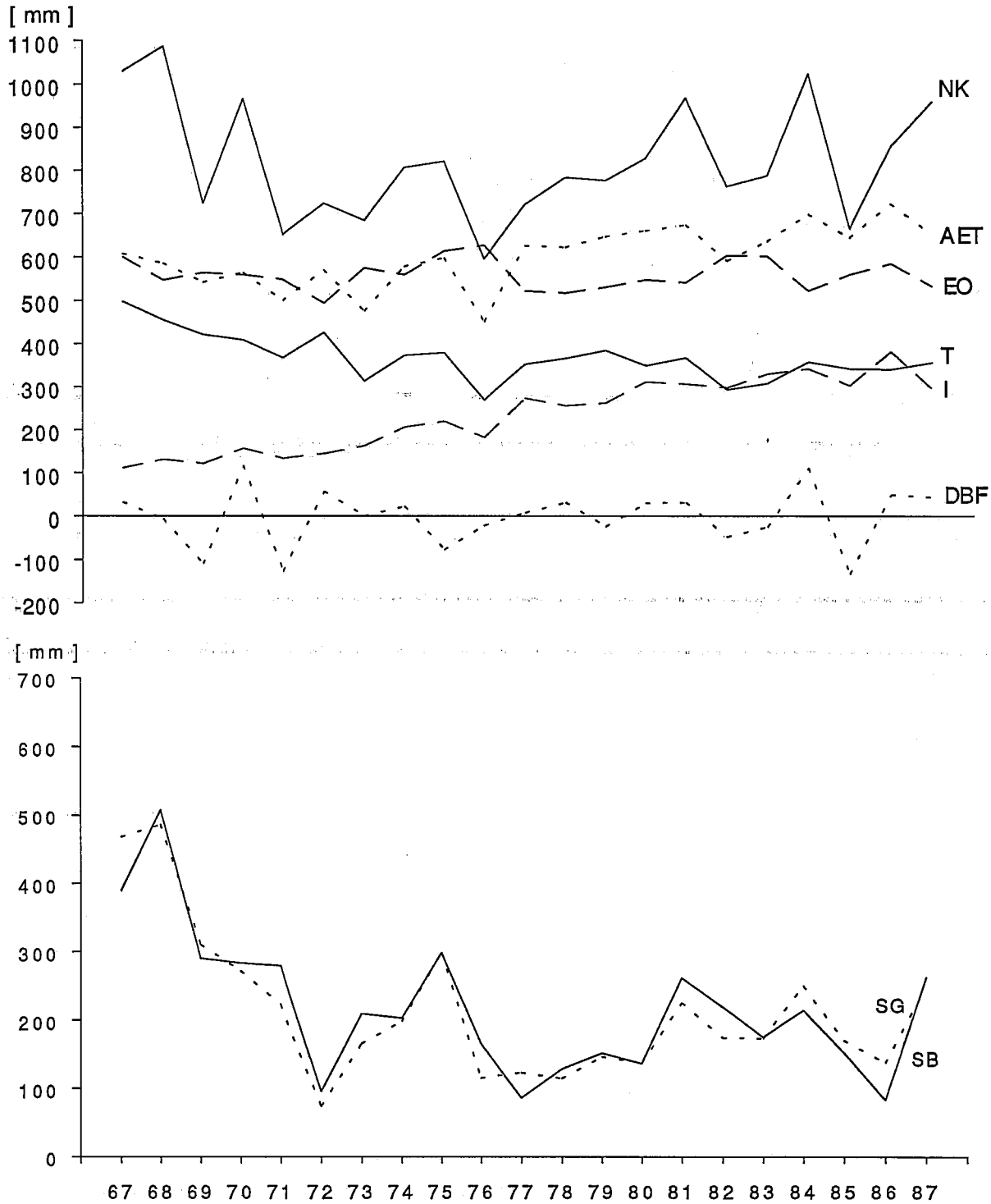

Abb. 11: Lysimeter 3 (Weymouthkiefern). Jährliche Simulationsergebnisse des numerischen Modells

A.-Jahr	N_K	E_o	AET	S_b	S_g	R	DBF
1966	1262,9	586,0	507,0	394,5	657,8	0,304	+360,6
1967	1029,9	600,5	516,1	483,7	485,8	0,938	+ 29,3
1968	1086,8	546,7	467,2	630,4	596,6	0,883	- 11,6
1969	722,9	564,6	441,3	366,5	363,8	0,623	- 85,6
1970	965,0	558,9	424,8	424,4	377,8	0,764	+115,0
1971	651,8	548,6	395,5	382,5	362,1	0,929	-126,9
1972	723,2	493,1	434,8	234,5	237,6	0,528	+ 53,1
1973	684,8	574,7	354,8	313,8	334,5	0,860	+ 15,5
1974	805,7	558,9	435,3	322,7	331,1	0,963	+ 46,9
1975	820,8	614,3	420,3	499,6	520,7	0,965	- 99,8
1976	596,0	627,0	335,9	286,4	264,2	0,973	- 27,0
1977	720,9	521,5	428,5	270,0	312,7	0,897	+ 21,6
1978	783,4	516,9	420,7	311,6	328,5	0,844	+ 50,4
1979	776,0	529,7	437,4	370,6	418,6	0,609	- 32,8
1980	826,8	546,5	408,4	400,1	407,7	0,913	+ 17,6
1981	967,0	540,8	429,1	484,1	453,5	0,902	+ 53,1
1982	762,2	603,0	403,2	417,8	390,4	0,918	- 59,5
1983	787,2	601,2	367,7	449,8	461,9	0,902	- 31,1
1984	1022,8	521,4	422,8	485,9	550,4	0,828	+113,4
1985	664,8	559,0	471,5	317,0	341,8	0,787	-124,5
1986	855,1	585,1	429,7	356,8	427,2	0,873	+ 67,9
1987	957,8	532,3	432,1	505,7	521,6	0,949	+ 19,6
1968-1987	16181,0	11144,2	8361,0	7830,2	8002,7	16,910	- 24,7
∅	809,1	557,2	418,1	391,5	400,1	0,846	- 1,2

Tab. 6: Lysimeter 1 (Grünland).
Jährliche Simulationsergebnisse des numerischen Modells

A.-Jahr	N_K	E_O	AET	T	I	S_b	S_g	R	DBF
1966	1262,9	586,0	541,6	445,1	96,6	378,7	661,4	0,305	+ 341,8
1967	1029,9	600,5	525,1	425,6	99,6	474,9	460,7	0,916	+ 29,1
1968	1086,8	546,7	512,6	406,6	106,0	567,3	542,7	0,899	+ 6,1
1969	722,9	564,6	457,3	373,7	83,6	409,0	359,3	0,680	- 144,1
1970	965,0	558,9	500,6	407,2	93,4	321,1	395,9	0,901	+ 142,5
1971	651,8	548,6	437,9	364,3	73,5	350,6	354,5	0,921	- 137,6
1972	723,2	493,1	451,9	375,2	76,7	199,7	240,4	0,865	+ 70,7
1973	684,8	574,7	393,6	311,9	81,7	307,3	303,4	0,912	- 16,9
1974	805,7	558,9	491,7	396,2	95,5	250,2	336,3	0,812	+ 62,9
1975	820,8	614,3	461,1	363,9	97,1	476,4	467,6	0,956	- 117,5
1976	596,0	627,0	394,6	316,4	78,2	211,4	245,3	0,824	- 10,7
1977	720,9	521,5	470,8	367,6	103,2	221,5	277,4	0,768	+ 27,8
1978	783,4	516,9	491,1	382,2	108,9	241,9	249,1	0,913	+ 49,6
1979	776,0	529,7	481,0	361,4	119,7	349,5	313,2	0,725	- 55,3
1980	826,8	546,5	508,02	379,5	128,6	285,8	274,3	0,872	+ 32,1
1981	967,0	540,8	529,5	381,1	148,4	396,3	336,6	0,908	+ 40,4
1982	762,2	603,0	500,5	335,7	164,8	329,5	291,7	0,928	- 68,6
1983	787,2	601,2	461,7	293,5	168,2	359,1	368,3	0,888	- 34,4
1984	1022,8	521,4	479,1	348,5	130,6	397,8	405,8	0,904	+ 145,1
1985	664,8	559,0	516,2	386,1	130,1	285,4	272,3	0,748	- 137,5
1986	855,1	585,1	498,5	348,6	149,9	303,6	249,2	0,948	+ 52,3
1987	957,8	532,3	556,9	378,4	178,6	356,2	313,4	0,916	+ 43,9
1968-1987	1618,1	11144,2	9594,8	7278,0	2316,7	6619,6	6626,7	17,288	- 49,2
∅	809,1	557,2	479,7	363,9	115,8	331,0	331,3	0,864	- 2,5

Tab. 7: Lysimeter 2 (Eichen-Buchen).
Jährliche Simulationsergebnisse des numerischen Modells

A.-Jahr	N_K	E_o	AET	T	I	S_b	S_g	R	DBF
1966	1262,9	586,0	605,1	500,2	104,9	306,0	670,1	0,104	+351,1
1967	1029,9	600,5	607,5	496,6	110,9	388,8	467,9	0,959	+ 32,8
1968	1086,8	546,7	585,7	454,7	131,1	507,2	485,9	0,934	- 6,8
1969	722,9	564,6	541,9	420,7	121,2	290,4	310,3	0,440	- 110,1
1970	965,0	558,9	564,6	408,8	155,9	283,4	271,7	0,864	+ 116,2
1971	651,8	548,6	499,4	366,7	132,8	279,3	221,9	0,802	- 127,7
1972	723,2	493,1	569,6	425,0	144,6	95,7	73,8	0,458	+ 57,1
1973	684,8	574,7	474,9	312,9	162,0	209,0	165,5	0,576	+ 0,2
1974	805,7	558,9	578,9	372,9	206,0	203,3	198,7	0,940	+ 22,7
1975	820,8	614,3	598,2	379,1	219,1	298,8	299,1	0,907	- 77,0
1976	596,0	627,0	451,3	269,7	181,7	165,6	115,9	0,907	- 21,6
1977	720,9	521,5	625,7	351,9	273,2	86,5	123,1	0,737	+ 8,5
1978	783,4	516,9	622,4	365,9	256,5	129,2	114,8	0,620	+ 31,1
1979	776,0	529,7	646,1	384,2	261,9	152,2	146,6	0,769	- 23,1
1980	826,8	546,5	659,7	348,8	310,9	136,9	137,2	0,807	+ 29,5
1981	967,0	540,8	673,0	366,6	306,4	262,1	225,8	0,744	+ 31,2
1982	762,2	603,0	590,2	293,1	297,1	219,4	174,1	0,881	- 48,1
1983	787,2	601,2	636,4	306,8	329,6	174,8	173,6	0,848	- 24,8
1984	1022,8	521,4	697,9	357,0	340,9	214,3	249,8	0,731	+ 109,9
1985	664,8	559,0	644,7	341,7	303,1	152,4	170,6	0,773	- 133,0
1986	855,1	585,1	722,0	340,6	381,5	83,0	138,3	0,361	+ 49,4
1987	957,8	532,3	651,3	355,8	295,5	262,8	250,2	0,783	+ 43,0
1968-1987	16181,1	11144,2	12033,4	7222,9	4811,0	4206,3	4046,9	14,882	- 73,4
∅	809,1	557,2	601,7	361,1	240,6	210,3	202,3	0,744	- 3,7

Tab. 8: Lysimeter 3 (Weymouthskiefern).
Jährliche Simulationsergebnisse des numerischen Modells

3. Die qualitativen Meßergebnisse

Mit Untersuchungen der Wasserqualität wurde in einem ersten Vorhaben bereits 1970 begonnen. Es erstreckte sich auf die Analyse der Sickerwasserabläufe aus den drei Becken. Die untersuchten Wasserinhaltsstoffe waren Ca, K, Mg, NO_3, NO_2 und NH_4.

Die Ergebnisse wurden in (4) und (18) ausführlich besprochen. Für die Summe der gelösten mineralischen Stickstoffverbindungen sind sie in Tab. 9 jahrweise zusammengestellt.

Daraus geht hervor, daß die Stickstoffausträge in St. Arnold in weiten Bereichen von Jahr zu Jahr schwanken, daß aus der gedüngten Grünlandfläche weit mehr Stickstoff ausgetragen wird als aus den ungedüngten Waldflächen und, daß sich beim Kiefernwald eine deutliche Zunahme des Austrags abzeichnet, die nur so zu deuten ist, daß der Kiefernwald die Grenzen seiner Aufnahmekapazität für Stickstoff erreicht hat.

Abfluß-jahr	Lysimeter 1 Ges N		Lysimeter 2 Ges N		Lysimeter 3 Ges N	
	mg/l	g/m²	mg/l	g/m²	mg/l	g/m²
1971	7,7	2,78	0,48	0,17	0,54	0,12
1972	12,7	3,02	0,75	0,18	0,93	0,07
1973	20,5	6,79	1,16	0,35	1,3	0,19
1974	25,2	8,30	0,85	0,29	1,5	0,30
1975	20,7	10,79	0,9	0,43	1,5	0,45
1976	14,8	3,93	1,5	0,37	1,4	0,16
1977	45,3	14,15	3,8	1,05	3,4	0,41
1978	21,7	7,09	2,6	0,65	2,9	0,33
1979	13,1	5,48	2,7	0,85	2,2	0,32
1980	7,6	3,08	(1,2)	(0,30)	3,8	0,50
1981	6,2	2,82	1,42	0,48	3,94	0,89
1982	10,8	4,26	0,90	0,26	4,28	0,74
1983	27,5	12,91	0,28	0,10	4,60	0,80
1984	24,7	13,52	0,31	0,13	5,88	1,47
1971-1973	13,54	4,20	0,78	0,23	0,88	0,13
1982-1984	21,0	10,13	0,50	0,16	4,92	1,00

Tab. 9: Jahreswerte der Konzentrationen (mg/l) und Frachten (g/m²) an Gesamtstickstoff (NO_2, NO_3, NH_4) im Sickerwasserablauf der 3 Lysimeter

Die Gründe wurden in den Stoffeinträgen durch "sauren Niederschlag" vermutet. Deshalb wurde das Programm auf diese Fragestellung umgestellt: Freilandniederschlag, durchtropfender Niederschlag, Stammablauf wurden als neue Beprobungspunkte eingeführt, um so die Stoffeinträge zu erfassen.

Gleichzeitig wurde die Parameterliste auf folgende wichtige Substanzen ausgedehnt: Sulfat, Phosphat, Blei, Cadmium und Zink.

Die Ergebnisse dieses Meßprogrammes (s. 18) sind für die Jahre 1982 bis 1984 in den Tabellen 10 bis 12 zusammengestellt.

1982	Eintrag			Austrag		Differenz	
	Fr.Niederschlag	Düngung		Sickerwasser			
	g/m²/a	g/m²/a	%	g/m²/a	%	g/m²/a	%
Wassermenge mm	705,8			392	56		
pH-Wert bzw. H-Ionen	0,03			0,0018	6	0,0282	94
Ammonium-N	0,854			0,023	2,7	0,831	97
Nitrat-N	0,673	21,64	3215	4,234	629	18,079	2686
Sulfat	4,884	39,10	800	23,80	487	20,184	413
Phosphat-P	0,191	5,60	2932	0,007	3,7	5,784	3028
Calzium	1,366	2,57	188	12,653	926	- 8,717	- 638
Magnesium	0,264	1,28	485	1,142	432	0,402	152
Kalium	1,029	15,08	1466	7,205	700	8,904	865

1983	Eintrag			Austrag		Differenz	
	Fr.Niederschlag	Düngung		Sickerwasser			
	g/m²/a	g/m²/a	%	g/m²/a	%	g/m²/a	%
Wassermenge mm	728,9	k		463	64		
pH-Wert bzw. H-Ionen	0,021	e		0,018	86	0,003	14
Ammonium-N	1,779	i		0,007	0,4	1,772	99
Nitrat-N	0,827	n		12,928	1563	- 12,101	- 1463
Sulfat	4,913	e		23,414	476	- 18,501	- 376
Phosphat-P	0,206			0,004	1,9	0,202	98
Calzium	2,073	D		20,447	986	- 18,374	- 886
Magnesium	0,239	ü		1,776	743	- 1,537	- 643
Kalium	0,710	n		12,420	1749	- 11,710	- 1649
Blei	0,009	g		0,0021	23	0,0069	77
Cadmium	0,0005	u		0,0018	360	- 0,0013	- 260
Zink	0,136	n		0,091	67	0,045	33
		g					

1984	Eintrag			Austrag		Differenz	
	Fr.Niederschlag	Düngung		Sickerwasser			
	g/m²/a	g/m²/a	%	g/m²/a	%	g/m²/a	%
Wassermenge mm	947,50			548,03	58		
pH-Wert bzw. H-Ionen	0,0471			0,0056	12	0,0415	88
Ammonium-N	1,0452*			0,0066	0,6	1,0386	99
Nitrat-N	0,6896			13,5109*	1959	- 12,8213	- 1859
Sulfat	4,5051*	0,89	20	29,9151	664	- 24,5200	- 544
Phosphat-P	0,0408*	2,98	7304	0,0038*	9	3,017	7395
Calzium	1,0432	48,13	4614	22,8463	2190	+ 26,3269	+ 2524
Magnesium	0,1620	0,4425	273	1,7465	1078	- 1,1420	- 705
Kalium	0,1998	8,51	4259	11,3826*	5697	- 2,6728	- 1338
Blei	0,0145	0,00253	17	0,0013*	9	0,01573	108
Cadmium	0,00025	0,000034	14	0,00010	42	0,000184	+ 74
Zink	0,0397	0,00229	6	0,0559	141	- 0,01391	- 35
Aluminium		0,295					

* = bereinigter Wert

Tab. 10: Bilanz der Stofffrachten - Grünland

1982	Eintrag			Austrag		Differenz	
	Fr.Niederschlag	Bestands-N.		Sickerwasser			
	g/m²/a	g/m²/a	%	g/m²/a	%	g/m²/a	%
Wassermenge mm	705,8	560,3	79	291	41		
pH-Wert bzw. H-Ionen	0,03	0,023	77	0,00002	0,07	0,02298	77
Ammonium-N	0,854	1,478	173	0,0047	0,6	1,4733	172
Nitrat-N	0,637	0,586	92	0,259	41	0,327	51
Sulfat	4,884	8,626	177	14,22	291	- 5,594	- 114
Phosphat-P	0,191	0,186	97	0,0033	1,7	0,1827	95
Calzium	1,365	3,179	233	2,400	176	0,779	57
Magnesium	0,264	0,487	184	0,407	154	0,080	30
Kalium	1,029	3,475	338	1,955	190	1,520	148

1983	Eintrag			Austrag		Differenz	
	Fr.Niederschlag	Bestands-N.		Sickerwasser			
	g/m²/a	g/m²/a	%	g/m²/a	%	g/m²/a	%
Wassermenge mm	728,9	589,4	81	368	50		
pH-Wert bzw. H-Ionen	0,021	0,053	252	0,000036	0,2	0,05296	252
Ammonium-N	1,779	2,004	113	0,0078	0,4	1,9962	112
Nitrat-N	0,827	1,044	126	0,098	12	0,946	114
Sulfat	4,913	10,302	210	16,970	345	- 6,668	- 135
Phosphat-P	0,206	0,183	88	0,005	2	0,178	86
Calzium	2,073	2,411	116	12,771	616	- 10,360	- 500
Magnesium	0,239	0,511	214	0,477	200	0,034	14
Kalium	0,710	2,492	351	2,579	363	- 0,087	- 12
Blei	0,0090	0,0105	117	0,00044	5	0,0101	112
Cadmium	0,0005	0,00036	72	0,00007	14	0,00029	56
Zink	0,136	0,054	40	0,019	14	0,035	26

1984	Eintrag			Austrag		Differenz	
	Fr.Niederschlag	Bestands-N.		Sickerwasser			
	g/m²/a	g/m²/a	%	g/m²/a	%	g/m²/a	%
Wassermenge mm	947,5	861,8	85	404,86	43		
pH-Wert bzw. H-Ionen	0,0471	0,0686	146	0,00005	0,1	0,06855	146
Ammonium-N	1,0452*	1,8005	172	0,0041	0,4	1,7964	172
Nitrat-N	0,6896	0,6392	93	0,1217	18	0,5175	75
Sulfat	4,5051*	11,0699*	246	19,1852	426	- 8,1153	- 180
Phosphat-P	0,0408*	0,1585*	388	0,0031*	8	0,1554	381
Calzium	1,0432	1,9533	187	12,5623	1204	- 10,6090	- 1017
Magnesium	0,1620	0,4402	272	0,5021	309	- 0,0619	- 38
Kalium	0,1998	1,6572	829	2,7235*	1363	- 1,0663	- 534
Blei	0,0145	0,0108	74	0,0011*	8	0,0097	67
Cadmium	0,00025	0,00028	117	0,00014*	58	0,00014	56
Zink	0,0397	0,0464	117	0,0108*	27	0,0356	90

* = bereinigter Wert

Tab. 11: Bilanz der Stofffrachten - Eichen-Buchen

1982	Eintrag			Austrag		Differenz	
	Fr.Niederschlag	Bestands-N.		Sickerwasser			
	g/m²/a	g/m²/a	%	g/m²/a	%	g/m²/a	%
Wassermenge mm	705,8	452,7	64	175	25		
pH-Wert bzw. H-Ionen	0,03	0,012	40	0,000004	0,01	0,011996	40
Ammonium-N	0,854	0,5361	628	0,0052	0,6	0,53558	627
Nitrat-N	0,673	1,677	249	0,747	111	0,930	138
Sulfat	4,884	23,066	472	10,70	219	12,366	253
Phosphat-P	0,191	0,233	122	0,0018	0,9	0,2312	121
Calzium	1,366	3,172	232	3,370	247	- 0,198	- 14,5
Magnesium	0,264	0,918	348	0,410	155	0,508	192
Kalium	1,029	3,273	318	1,474	143	1,799	175

1983	Eintrag			Austrag		Differenz	
	Fr.Niederschlag	Bestands-N.		Sickerwasser			
	g/m²/a	g/m²/a	%	g/m²/a	%	g/m²/a	%
Wassermenge mm	728,9	469,5	64	175	24		
pH-Wert bzw. H-Ionen	0,021	0,0176	83	0,000003	0,01	0,017597	83
Ammonium-N	1,779	4,961	279	0,0018	0,1	4,9592	278
Nitrat-N	0,827	1,285	155	0,804	97	0,481	58
Sulfat	4,913	19,865	404	12.321	251	7,321	149
Phosphat-P	0,206	0,270	131	0,0012	0,6	0,2688	130
Calzium	2,073	2,441	118	8,278	399	- 5,837	- 281
Magnesium	0,239	0,599	251	0,521	218	0,078	32
Kalium	0,710	3,036	428	1,844	260	1,192	168
Blei	0,0090	0,0101	112	0,0003	3	0,0098	109
Cadmium	0,0005	0,0004	80	0,00009	18	0,00031	62
Zink	0,136	0,0601	44	0,0084	6,2	0,0517	38

1984	Eintrag			Austrag		Differenz	
	Fr.Niederschlag	Bestands-N.		Sickerwasser			
	g/m²/a	g/m²/a	%	g/m²/a	%	g/m²/a	%
Wassermenge mm	947,5	658,4	69	249,91	26		
pH-Wert bzw. H-Ionen	0,0471	0,0274	58	0,00001	0,1	0,02739	58
Ammonium-N	1,0452*	3,8214	366	0,0025	0,2	3,8189	365
Nitrat-N	0,6896	1,2668	184	1,4668	213	- 0,200	- 29
Sulfat	4,5051*	16,4849	366	18,4747	410	- 1,9898	- 44
Phosphat-P	0,0408*	0,1816	445	0,0015*	4	0,1801	441
Calzium	1,0432	2,1644*	207	12,4347	1192	- 10,2703	- 984
Magnesium	0,1620	0,5592*	345	0,7148	441	- 0,1556	- 96
Kalium	0,1998	1,9527	977	2,0733*	1038	- 0,1206	- 60
Blei	0,0145	0,0111	77	0,00061	4	+ 0,01049	72
Cadmium	0,00025	0,00048	200	0,00005	21	0,00043	172
Zink	0,0397	0,0771	194	0,0079*	20	0,0692	174

* = bereinigter Wert

Tab. 12: Bilanz der Stofffrachten - Weymouthkiefern

Daraus ist folgendes ersichtlich:
Die Erwartung, daß der Standort St. Arnold auf Grund seiner günstigen Lage zu Großemitenten als Reinluftgebiet anzusehen ist, wird durch die Ergebnisse im Freilandniederschlag nur zum Teil bestätigt. So ist hier zwar die Belastung durch freie Säure, Sulfat, Blei und Cadmium geringer als in der Haard und im Landesdurchschnitt (20). Für die Stickstoffverbindungen aber auch für Calzium und Magnesium gilt das dagegen nicht. Die Belastung durch diese Stoffe, die alle aus der Landwirtschaft stammen können, ist im Gegenteil größer als in der Haard, der nächstgelegenen Meßstation des Landes. Im Bestandsniederschlag der beiden Waldflächen werden fast alle untersuchten Inhaltsstoffe im Vergleich zum Freilandniederschlag angereichert, bei den Weymouthskiefern wiederum mehr als bei den Eichen-Buchen. Daß das bei den H-Ionen nicht zutrifft, dürfte seine Ursache darin haben, daß die trocken deponierten Stäube, die in den Baumkronen in besonders großen Mengen anfallen, alkalisch reagieren.

Das Sickerwasser aus den Waldbeständen ist von deutlich besserer Qualität als das des gedüngten Grünlands. Dieser geringere Austrag an Inhaltsstoffen betrifft nicht nur die gedüngten Pflanzennährstoffe sondern auch die H-Ionen und die Schwermetalle.

Es gibt jedoch Hinweise, daß dieser Vorteil in der Zukunft mit zunehmender Bodenversauerung vor allem im Weymouthskiefernbestand zunichte gemacht werden wird.

Eine spezielle Untersuchung zu den Bodenversauerungsprozessen, die zusammen mit der Landbau-Universität Wageningen angestellt wurde (15) hat mit Hilfe von Stoffbilanzen das Ausmaß der Bodenversauerung quantifizieren können und kommt zu dem Ergebnis, daß unter den Weymouthskiefern schon in wenigen Jahren mit einem Fortschreiten der Versauerungsfront bis ans Grundwasser gerechnet werden muß mit der Folge stark erhöhter Stickstoff- und Metalleinträge ins Grundwasser.

Der Eichen-Buchenbestand verkraftet die hier allerdings auch deutlich geringeren Einträge weitaus besser nicht zuletzt auch auf Grund einer hier verabfolgten Kalkgabe.

4. Zusammenfassung

Es werden die verschiedenen Meßprogramme, die an der Großlysimeteranlage St. Arnold in den 25 Jahren von 1966 bis 1990 durchgezogen wurden, besprochen und Ihre Ergebnisse komprimiert dargestellt.

Es sind vor allem folgende:

1. Unter Wald ist die Grundwasserneubildung deutlich geringer als unter Grünland; unter Weymouthskiefern wiederum noch geringer als unter Eichen-Buchen.

2. Diese Unterschiede gehen vor allen Dingen auf entsprechende Unterschiede in der Interzeptionsverdunstung zurück, während die der aktuellen Transpiration klein sind.

3. Das Wetter, vor allen Dingen die Höhe der Niederschläge, hat entscheidenden Einfluß auf die Höhe der Grundwasserneubildung. Danach rangiert, was die Bedeutung angeht, die Gesamtverdunstung, deren Schwankungen von Jahr zu Jahr im Verhältnis zu denen des Niederschlags gering sind.

Die Ergebnisse der quantitativen Messungen des meteorologischen und lysimetrischen Programms dienen als Grundlage für eine Reihe von Prozeßanalysen, deren Ergebnisse wiederum in einem numerischen Modell zur Berechnung der Wasserflüsse im ungesättigten Bodenbereich und der bodennahen Luftschicht zur einer Nachbildung des gesamten Wasserkreislaufs an einem bewachsenen Standort synthetisiert werden.

Dessen detaillierte Ergebnisse dienen als Grundlage für die Verarbeitung qualitativer Untersuchungen, deren Hauptziel es war die Bodenversauerung infolge von Schadstoffeinträgen zu quantifizieren und zu analysieren. Hauptergebnis dieser Untersuchung ist, daß der Eintrag an versauernd wirkenden Stoffen bei den Weymouthskiefern auf Grund ihrer größeren Filterwirkung weit größer ist als bei den Eichen-Buchen. Infolge davon ist dort auch die Bodenversauerung doppelt so stark, so daß dort schon in wenigen Jahren mit einer Erschöpfung der Pufferkapazität des Bodens gerechnet werden muß, mit entsprechend starkem Stickstoff- und Metalleintrag ins Grundwasser im Gefolge.

5. Literatur

1) Prenk.J.u.Flender, A.: Die Großlysimeteranlage St. Arnold bei Rheine, Dt. Gewässerk. Mitt. 9,6 (1965) S. 132

2) Schroeder, M.: Untersuchungen an Lysimetern mit Waldbestockung, Mitteilung des Arbeitskreises "Wald und Wasser" Nr. 5, Essen (1970),Seite 27-33

3) Schroeder, M.: Erste Ergebnisse der Großlysimeteranlage St. Arnold bei Rheine, Die Wasserwirtschaft 65, 11 (1975) Seite 301-305

4) Schroeder, M.: Untersuchungen über die Sickerwasserqualität unter Grünland und Wald auf der Großlysimeteranlage St. Arnold, Forschung und Beratung, Reihe C, Heft 30 "Untersuchungen zur Kontamination von Grund- und Oberflächenwasser durch land- und forstwirtschaftliche Bodennutzung", MELF Nordrhein-Westfalen (1976) S. 55-68

5) Schroeder, M.: Wasserflüsse im ungesättigten Bodenbereich, Beiträge zur Hydrologie, Heft 4 (1977) S. 81-223

6) - - :Empfehlungen zum Bau und Betrieb von Lysimetern, DVWK-Regeln zur Wasserwirtschaft, Heft 114 (1980) Paul Parey Verlag

7) Schroeder, M.; K.H. Günther: Wald und Grundwasser. Schriftenreihe des Deutschen Verbandes für Wasserwirtschaft und Kulturbau, Heft 41 -Wald und Wasser- 1979, S. 81-88, Verlag Paul Parey

8) Schroeder, M.: Neue Werte zur Grundwasserneubildung unter Wald für das Münsterland, DGM 27.4 (1983) S. 121-124

9) Schroeder, M.: Die Interzeptionsmessungen an der Großlysimeteranlage St. Arnold, DGM 31 (1987) Seite 164-171

10) Schroeder, M.: Jahreswerte der Waldverdunstung und ihrer Teilgrößen an der Großlysimeteranlage St. Arnold, DGM 31 (1987) Heft 1, Seite 21-23

11) Schroeder, M.: 15 Jahre Messungen an der Großlysimeteranlage St. Arnold (Zeitreihenanalysen, Interzeptionsuntersuchungen Simulationsmodelle) Wasser und Abfall, Heft 44, Landesamt für Wasser und Abfall NW, Düsseldorf, 1988

12) Schroeder, M.: Interzeptionsmessungen an der Großlysimeteranlage St. Arnold in den Jahren 1984 bis 1987 und die Extrapolation der Meßwerte mit Hilfe eines Rechenmodells, DGM 33 (1989) Heft 2, Seite 56-64

13) Schroeder, M.; D. Wyrwich: Eine in Nordrhein-Westfalen angewendete Methode zur flächendifferenzierten Ermittlung der Grundwasserneubildung, DGM 34 (1990) Heft 1/2, Seite 12-16

14) Schroeder, M.: Verdunstung von Land- und Wasserflächen in St. Arnold bei Rheine in den Jahren 1980 bis 1987, DGM 34 (1990) Heft 4, Seite 110-116

15) van Grinsven, J.J.M.; Wesselink, L.G.; Schroeder, M.; van Bremen, N.: Soil acidification and solute budgets for forested lysimeters in Nordrhein-Westfalen, Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde, 154 (1991) S. 181-188

16) Bauer, H.J.: Der Münsterländer Kiessandzug, Geologie, Hydrologie, Hydrochemie und Wasserwirtschaft, Berliner Geowissenschaftliche Abhandlungen, Reihe A, Band 10, Dietrich Riemer Verlag Berlin, 1979

17) Wesseling, J.: Hulpmiddelen bij de berekening van de verdamping uit een vrij wateropperflak, Instituut voor Cultuurtechniek en Waterhuishouding, Medeling 19, 1960

18) Weiß, J.: Klimatologische Analyse der 25jährigen Wetterdaten der Großlysimeteranlage St. Arnold für die gewässerkundlichen Rahmenpläne "Isselmeerzuflüsse" und "Ems-Münster", unveröffentlichter Bericht des StAWA Münster, Juni 1992

19) Schroeder, M.: Die Wassergüteuntersuchungen an der Großlysimeteranlage St. Arnold, Unveröffentlichter Bericht des StAWA Münster vom 20.03.85

19) Maessen, L.; Weihe, J.: Langfristige Durchmessermessungen mit einem Kunststoffband. Forstarchiv 49, 10 (1978) S. 204

20) Block, J.; Bartels, U.: Ergebnisse der Schadstoffdepositionsmessungen in Waldökosystemen in den Meßjahren 1981/82 und 1982/83, Forschung und Beratung, Reihe C, Heft 39, 1985 MURL Düsseldorf

Liste der Tabellen

Tabelle 1: Jahreswerte der wichtigsten meteorologischen Meßgrößen

Tabelle 2: 25jährige Monatsmittel bzw. -summen der Wetterdaten für den Zeitraum 1966-1990

Tabelle 3: Jahreswerte von Niederschlag (No) und Sickerwasserablauf (S) und ihrer Differenzen untereinander

Tabelle 4: Jahreswerte der Interzeptionsmeßergebnisse

Tabelle 5: Entwicklung der beiden Waldbestände in St. Arnold ab 1974

Tabelle 6: Lysimeter 1: Jährliche Simulationsergebnisse des numerischen Modells

Tabelle 7: Lysimeter 2: Jährliche Simulationsergebnisse des numerischen Modells

Tabelle 8: Lysimeter 3: Jährliche Simulationsergebnisse des numerischen Modells

Tabelle 9: Jahreswerte der Konzentrationen und Frachten an Gesamtstickstoff (NO_2, NO_3, NH_4) im Sickerwasserablauf der drei Lysimeter

Tabelle 10: Bilanz der Stofffrachten - Grünland

Tabelle 11: Bilanz der Stofffrachten - Eichen-Buchen

Tabelle 12: Bilanz der Stofffrachten - Weymouthskiefern

Liste der Abbildungen

Abbildung 1: Meßkeller und eines der drei Auffangbecken der Großlysimeteranlage St. Arnold

Abbildung 2: Lageplan Großlysimeteranlage St. Arnold

Abbildung 3: Jahreswerte der Meßergebnisse von Niederschlag (No) und Sickerwasserablauf (S)

Abbildung 4: Differenzen aus Niederschlag (No) und Sickerwasser (S)

Abbildung 5: Differenzen der Sickerwasserabläufe der drei Vegetationsarten untereinander

Abbildung 6: Entwicklung der Stammzahlen auf Fläche 2 (Eichen-Buchen) und auf Fläche 3 (Weymouthskiefern)

Abbildung 7: Entwicklung der Baumhöhen auf Fläche 2 (Eichen-Buchen)

Abbildung 8: Entwicklung der Baumhöhen auf Fläche 3 (Weymouthskiefern)

Abbildung 9: Lysimeter 1 (Grünland). Jährliche Simulationsergebnisse des numerischen Modells

Abbildung 10: Lysimeter 2 (Eichen-Buchen). Jährliche Simulationsergebnisse des numerischen Modells

Abbildung 11: Lysimeter 3 (Weymouthskiefern). Jährliche Simulationsergebnisse des numerischen Modells

Verwendete Symbole

N_1 Niederschlag, gemessen in 1 m über Gelände, mm

N_o Niederschlag, gemessen in Geländehöhe, mm

N_k Niederschlag, um einen systematischen Fehler von 8 % korrigiert, mm

T_n Lufttemperatur, Tagesmittel, °C

T_{max} Lufttemperatur, Tagesmaximum, °C

T_{min} Lufttemperatur, Tagesminimum, °C

RF Relative Luftfeuchte, Tagelsmittel, %

SD Sonnenscheindauer, Tagessumme, h

STR Globalstrahlung, Tagessumme, $J/m^2/min$

E_o Potentielle Verdunstung nach Penman, mm

S_1 Sickerwasserablauf aus Becken 1, mm

S_2 Sickerwasserablauf aus Becken 2, mm

S_3 Sickerwasserauflauf aus Becken 3, mm

AET Aktuelle Evapotranspiration, mm

S_b Sickerwasserablauf, berechnet, mm

S_g Sickerwasserablauf, gemessen, mm

R Korrelationskoeffizient

DBF Bodenfeuchteänderung, mm