

Daten zum Sauren Regen in Schleswig-Holstein

Von WOLFGANG HASSENPFUG, Kiel

1. Einleitung

Der durch Niederschläge bewirkte Eintrag schwacher Säuren in den Boden ist ein natürlicher Vorgang, der die nacheiszeitliche Entwicklung der Böden in Schleswig-Holstein geprägt hat. Dies gilt für die Entkalkung des Geschiebemergels im östlichen Hügelland und die Entkalkung und Alterung der Seemarschen an der Nordsee genau so wie für die durch Versauerung erst mögliche Podsolierung auf der Geest. Der Saure Regen, der erst nach 1981 in das Bewußtsein der Öffentlichkeit getreten ist, ist demgegenüber ein Niederschlag, der über das natürliche Maß hinaus saurer ist, weil er starke Säuren (Schwefel- und Salpetersäure) bzw. deren Vorstufen enthält, die bei der Verbrennung fossiler Brennstoffe wie Kohle, Erdöl und auch Erdgas entstehen, was wiederum seit Beginn der Industrialisierung in steigendem Umfang der Fall ist. Die Abgase der Verbrennungen gelangen als Emissionen in die Atmosphäre, werden transportiert, dabei chemisch umgewandelt und gelangen als Immissionen wieder zur Erdoberfläche zurück, als sogenannte trockene Deposition ohne Beteiligung von Niederschlägen und als nasse Deposition, wenn sie in Niederschlägen zur Erdoberfläche zurückgelangen. Säurebildner sind dabei nur einige der nach Hunderten zählenden chemischen Verbindungen, welche die Luft verunreinigen.

Saurer Regen kann als Indikator einer neuartigen Form der Umweltbelastung angesehen werden, die sich von den direkten Eingriffen des Menschen in Natur und Landschaft, wie etwa bei der Änderung der Flächennutzung und Bodenbedeckung dadurch unterscheidet, daß sie zunächst unsichtbar bleibt, mit menschlichen Sinnen nicht zu erfassen ist und erst mit beträchtlichem Zeitverzug und oft weit entfernt von ihrem Ursprungsort an ihren Auswirkungen zu erkennen ist. Über das Ausmaß des Sauren Regens in Schleswig-Holstein, einem fern von den großen Ballungsräumen liegenden Land, lagen Mitte 1981 keine umfassenden, detaillierten und räumlich differenzierten Daten vor, so daß ab Anfang 1982 ein eigenes Meßprogramm an 12 Stationen Schleswig-Holsteins zur Beschaffung solcher Daten begonnen wurde.¹⁾ Grundlage war die Probennahme in Zusammenarbeit mit

¹⁾ Anstoß zu dem Projekt war die didaktische Frage, inwieweit der Saure Regen geeignet ist, eine schulortbezogene schüleraktive Form der Umwelterziehung auf der Basis persönlicher Betroffenheit zu fördern. Diese Frage konnte relativ rasch positiv beantwortet werden; die dazu entwickelten Materialien und Demonstrationsexperimente haben Eingang in Lehrerfortbildung und Erwachsenenbildung gefunden. Durch die inzwischen an fast jedem Schulstandort nachweisbaren neuartigen Waldschäden ist dieser Form regionalisierter Umwelterziehung zusätzliche Schubkraft verliehen worden.

den Meßstationen des Deutschen Wetterdienstes, die den Niederschlag ohnehin zur Bestimmung der Niederschlagshöhe auffangen, und die zugleich die parallel erhobenen meteorologischen Daten zur weiteren Auswertung liefern können.

2. Material und Methoden

Die Niederschlagsproben wurden ab 1982 an den 11 Stationen des Deutschen Wetterdienstes Flensburg, Glückstadt, Gnutz, Helgoland, Kiel, Lauenburg, List, Lübeck, St. Peter, Schleswig und Westermarkelsdorf sowie an der Agrarmeteorologischen Beratungs- und Forschungsstelle Ahrensburg gewonnen. Die Besonderheiten dieser vorwiegend an den Landesgrenzen gelegenen Stationen sind aus Tabelle 1 ersichtlich.

1985 wurde auf dem Gelände der Pädagogischen Hochschule Kiel, am Rande des biologisch-ökologischen Versuchsgeländes vom Gewerbeaufsichtsamt Itzehoe – zuständig für die lufthygienische Überwachung in Schleswig-Holstein – die achte automatische Meßstation des Landes errichtet, in der Schwefeldioxyd, Stickoxyde, Kohlenwasserstoffe, Ozon und Schwebstaub erfaßt werden. Damit und mit anderen Meßstationen, wie denen des Umweltbundesamtes, sind nun Aussagen zur Luftqualität in einer Genauigkeit möglich, die weit über den Ansatz dieses Projektes hinausgehen.

Für die Probennahme mußten einfache Konstruktionen aus Auffangtrichter (15 cm Durchmesser) und Sammelbehälter aus neutralen Kunststoffen entwickelt werden, da die verzinkten Standardauffanggefäße des Deutschen Wetterdienstes zur Anhebung der pH-Werte der darin aufgefangenen Niederschläge führten (Freisetzung von Wasserstoff durch Reaktion der in den Niederschlägen enthaltenen Schwefelsäure mit Zink). Nur in Schleswig und Kiel wurde ein Standardauffanggefäß in Kunststoffausführung verwandt.

Für die Bewertung der Meßwerte ist folgendes wichtig:

1. Trockene und nasse Depositionen sind bei diesem Auffangverfahren nicht zu trennen. Was sich während niederschlagsfreier Perioden im Trichter ablagerte, wurde beim nächsten Niederschlag in den Sammelbehälter gespült. Trichter und Sammelbehälter wurden nach Notwendigkeit von grobem Schmutz (Blätter, Insekten, Vogelkot u.a.) gereinigt.
2. Die Niederschlagsproben wurden zum ersten Klimatermin um 7.00 Uhr genommen und auf den vorangegangenen Tag datiert.
3. Die Proben wurden in Transportgefäße aus Polystrol umgefüllt und jeweils am Monatsanfang an das Institut für Geographie und ihre Didaktik der Pädagogischen Hochschule Kiel zur Messung geschickt. Der kürzeste Zeitraum zwischen Niederschlag und Messung liegt so bei wenigen Tagen, der längste bei bis zu fünf Wochen. Da Niederschlagswasser eine ionenarme, nicht gepufferte Lösung ist, traten dabei Veränderungen der Meßwerte auf, ohne daß eine Systematik erkennbar gewesen wäre; unsystematische Veränderungen sollten durch die statistische Bearbeitung ausgeglichen werden.
4. Nur Niederschläge von mehr als 1 mm erreichen im Transportgefäß (3 cm Durchmesser) eine zur Messung ausreichende Höhe. Geringere Niederschläge können in unkontrollierter Weise verdunstet, weggeschüttet oder im Sammel-

Tab. 1: Die Meßstationen – Lage und Besonderheiten im Überblick

Station	Lage im Raum	Lage zum Ort	UTM	TK 25	Besonderheiten
List	Westküste	südwestlich auf 30 m hoher Düne	R624/H964	0916	2,7 ost-südöstlich der Nordseeküste, dazwischen Dünen
Flensburg	nördliche Landesgrenze	westlich, auf Flugplatzgelände	R243/H702	1222	--
Helgoland	Nordsee	Hafen, in Westecke des Tonnenhofes	R278/H038	1818	240 m östlich der offenen See, Spritzwasser aus Südost und West, Inselkraftwerk 1 km NNW, Abgase von Fischkuttern etc., 100 m südlich ein Baustofflager
Schleswig	Binnenland	nördlicher Ortsrand	R354/H425	1423	Probennahme aus 80x80 cm großem Auffanggefäß
St. Peter	Westküste	Ortsteil Böhl	R770/H169	1717	500 m nordöstlich des Deiches
Lauenburg (N*)	südwestliche Landesgrenze	Ortsmitte		2629	Industriegebiet 2 km ost-südöstlich
Westermarkelsdorf	Fehmarn	Leuchtturm	R333/H443	1432	direkt hinter dem Deich, Ostsee in West und Nord
Gnutz (N*)	Binnenland	Dorfzentrum	R539/H992	184	--
Glückstadt	Untereibe	nördlicher Ortsrand		2222	Bundesbahnausbesserungswerk südwestlich, Papierfabrik 1,5 km südlich
Lübeck	östliche Landesgrenze	bis 14.2.85 nördlich der Altstadt, seit 15.2.1985 in Blankensee südlich der Stadt	R113/H713 R123/H635	2130 2130	Industriegebiet und Trave westlich und nördlich der Station
Ahrensburg	Binnenland	südwestlich des Ortes	R796/H453	2327	nordöstlich des Ballungsraumes Hamburg
Kiel		westlich der Stadt	R712/H219	1626	inmitten der lockeren Bebauung der Stadttrand-gemeinde Kronshagen

* Niederschlagsstation
alle übrigen: Klimastationen des DWD

behälter geblieben und der nächsten Probenabfüllung zugeschlagen worden sein. Die Messung des pH-Wertes erfolgte mit der Glaselektrode gemäß Herstellervorschrift.

Die Meßwerte wurden im Personalcomputer erfaßt und nach Datierung und Höhe überprüft. Die weitergehende Datenbearbeitung erfolgte mit dem Statistikprogramm SPSS sowohl am Personalcomputer wie am Rechenzentrum der Universität Kiel.

Der pH-Wert, der als Maßzahl für den Säuregrad der Niederschläge verwendet wird, ist der negative dekadische Logarithmus der Wasserstoffionen-Konzentration.

$$\text{pH} = - \log \text{CH}^+$$

Aus dem pH-Wert läßt sich die entsprechende Wasserstoffionen-Konzentration, sowie durch Multiplikation mit der zugehörigen Niederschlagsmenge, auch die Wasserstoffionen-Deposition berechnen.

Die Rückrechnung in pH-Werte erfolgt dabei nach der Gleichung

$$\text{CH}^+ = 10^{-\text{pH}} \text{ (mol/l)}$$

Insgesamt liegen für den Zeitraum 1982 bis 1985, welcher der folgenden Auswertung zugrunde liegt, über 6.000 Messungen vor. Aus Tabelle 2 ist ersichtlich, daß ihre Zahl etwa derjenigen der Tage mit mehr als 1 mm Niederschlag entspricht.²

3. Ergebnisse und Diskussion

Die wichtigsten Ergebnisse der statistischen Analyse sind in den Tabellen 3 bis 7 und in Abbildungen 1 und 2 dargestellt. Der folgende Text gibt nur Hinweise, ohne die in den Tabellen enthaltene Information voll auszuschöpfen.

Tabelle 3 gibt anhand des Januar 1985, der durch eine ausgeprägte Smogwetterlage in Mitteleuropa geprägt war, einen Überblick über die Höhe der Meßwerte und ihre täglichen und stationsweisen Schwankungen. Die Höhe dieser Schwankungen ist auffallend; wenn man sie nicht einfach als durch die Sammel- und Meßtechnik bedingtes „Rauschen“ abtuen will, kann eine Erklärung darin gesehen werden, daß die herantransportierten Luftmassen kleinräumig und kurzzeitig im gegebenen Raster selbst bei gleichbleibender Großwetterlage aus recht unterschiedlichen „Paketen“ bestehen. Geringe tägliche Schwankungen zwischen den Stationen, verbunden mit niedrigen Mittelwerten, können als Hinweis auf stärkere Luftbelastung dienen. Das gleichsinnige Absinken aller Meßwerte im Januar 1985 bis zum Minimum am 21. Januar 1985 (vergl. Tab. 3 und Abb. 1) ist nur so zu interpretieren, daß mit dem Ende der Smogwetterlage am 21.1.85 die belasteten Luftmassen, die bis dahin über den mitteleuropäischen Ballungsgebieten festgelegen hatten, nun mit südlichen Winden in breiter Front nach Schleswig-Holstein gelangen konnten, wo die in der Luft und im atmosphärischen Wasser enthaltenen Schadstoffe mit dem Niederschlag zur Deposition kamen. Die Messungen im Rahmen der lufthygi-

²) Der Datensatz kann zur weiteren Analyse sowie zur Verknüpfung mit anderweitig erhobenen Daten auf Diskette zur Verfügung gestellt werden. Auch die Proben sind zunächst noch bei Raumtemperatur aufbewahrt worden und können für evtl. Analysen (z.B. auf Schwermetalle) zur Verfügung gestellt werden.

Tab. 2: pH-Wert-Messungen und Niederschläge 1982-1985

Station	Anzahl der pH-Messungen	Tage mit Niederschlag	Tage mit Niederschlag > 1 mm	Summe Niederschlag (in mm)	Summe Niederschlag ohne pH-Messung für gleichen Tag	Durchschnittlicher Niederschlag an Tagen ohne pH-Messung (in mm)
Li List	574	776	508	3097	120	0,6
Fl Flensburg (nur 1982)	127	186	133	855	148	2,5
He Helgoland	603	771	492	2779	233	1,4
Sl Schleswig	638	832	549	3611	192	1,0
SP Sankt Peter	590	804	549	3376	168	0,8
La Lauenburg	527	711	468	2540	163	0,8
We Westermarsdorf	482	680	440	2213	136	0,7
Gn Gnitz	672	841	535	3434	46	0,3
Gl Glückstadt	500	821	545	3068	560	1,7
Lü Lübeck	473	773	502	2666	351	1,2
Ah Ahrensburg	515	758	507	3134	425	1,7
Ki Kiel	611	775	520	3205	272	1,7
	6012					

Tab. 3: Ausschnitt aus der Tabelle der Meßwerte (in pH-Wert x 10)

Stationen Datum	Li	Fi	He	Si	SP	La	We	Gn	Gl	Lu	Ah	Ki	GWL*	NP*	MP*	SP*
01.01.85	49	0	64	40	0	50	61	41	57	48	0	38	HNZ	7	47,7	8,8
02.01.85	0	0	0	0	0	63	0	63	61	64	58	55	HNZ	5	60,2	3,7
03.01.85	0	0	0	54	0	48	0	72	0	59	63	41	HNZ	5	57,8	11,5
04.01.85	0	0	0	0	0	0	0	72	61	0	61	0	HNZ	3	64,7	6,4
05.01.85	0	0	0	77	53	65	67	64	0	0	0	0	HNZ	4	65,3	9,9
06.01.85	61	0	0	57	0	65	0	66	60	66	0	46	HNZ	6	59,3	7,4
07.01.85	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	HNZ	-	-	-
08.01.85	0	0	0	0	61	60	0	48	62	0	0	0	HNZ	3	57,0	7,8
09.01.85	65	0	0	47	65	0	65	55	60	0	0	0	HNZ	6	59,5	7,8
10.01.85	43	0	0	44	66	0	0	62	65	0	0	45	NZ	6	54,2	11,2
11.01.85	45	0	58	48	58	59	64	65	61	70	0	44	NZ	8	56,9	9,9
12.01.85	0	0	0	0	0	66	0	0	0	0	50	0	NZ	-	-	-
13.01.85	0	0	0	0	0	63	0	62	0	68	0	0	NFZ	2	65,0	4,2
14.01.85	0	0	0	41	67	0	0	50	61	0	0	0	NFZ	4	54,8	11,6
15.01.85	0	0	0	0	0	0	65	0	0	0	0	46	NFZ	-	-	-
16.01.85	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	NFZ	-	-	-
17.01.85	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	SEA	-	-	-
18.01.85	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	SEA	-	-	-
19.01.85	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	U	-	-	-
20.01.85	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	WZ	-	-	-
21.01.85	40	0	42	38	40	46	41	37	0	0	35	39	WZ	7	38,6	2,1
22.01.85	46	0	45	46	48	60	0	45	66	0	41	0	WZ	6	48,7	8,8
23.01.85	49	0	55	52	44	0	0	65	0	0	0	45	WZ	5	51,0	8,5
24.01.85	47	0	60	53	43	54	64	67	63	65	53	47	WZ	9	55,8	9,1
25.01.85	62	0	0	0	0	60	0	53	41	64	41	0	WZ	5	52,2	11,0
26.01.85	39	0	59	47	41	64	68	67	72	0	0	42	WZ	7	53,7	14,6
27.01.85	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	WZ	-	-	-
28.01.85	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	WZ	-	-	-
29.01.85	45	0	76	49	49	60	45	48	49	60	41	44	WZ	9	47,8	5,4
30.01.85	36	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	WZ	-	-	-
31.01.85	45	0	61	49	45	63	51	50	61	67	43	46	WZ	9	50,8	8,1

* GWL Großwetterlagen

* NP Anzahl der pH-Messungen

* MP arithm. Mittel der pH-Messungen

* SP Standardabweichung vom MP

jeweils ohne Stationen He u. La

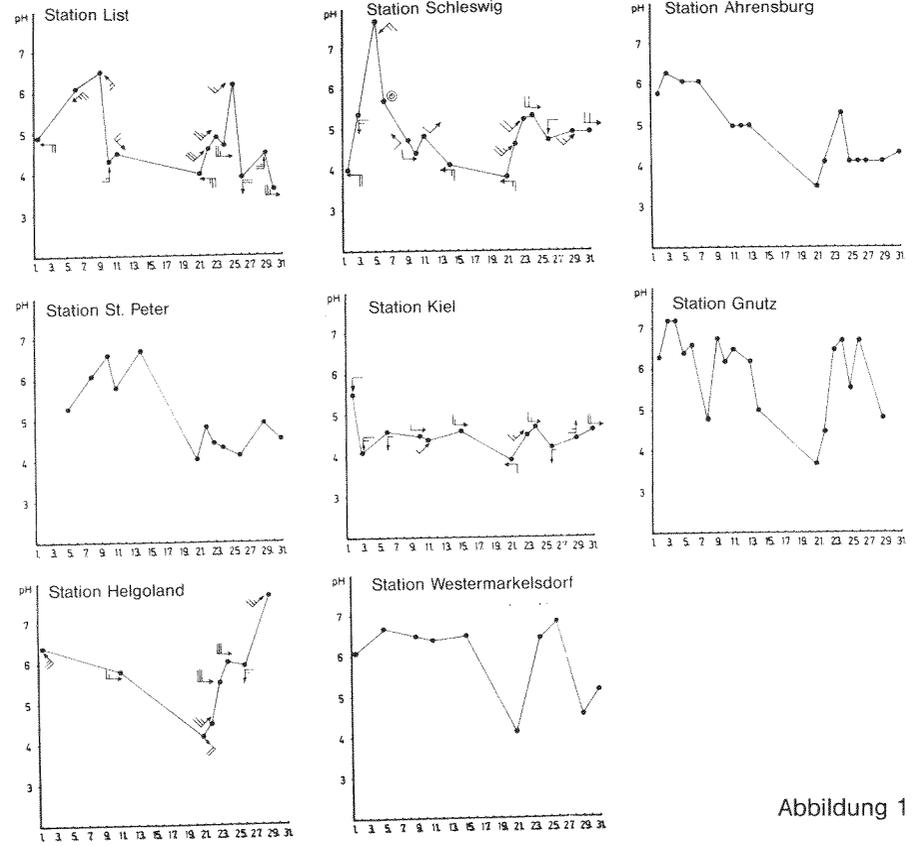


Abbildung 1

enischen Überwachung bestätigen dieses durch gleichzeitige SO₂-Spitzen der trockenen Deposition am 21.1.85.

Abbildung 2 zeigt die stationsweise Zusammenfassung der Meßwerte des Untersuchungszeitraumes zu einer Häufigkeitsverteilung. Das der Normalverteilung angenäherte Verteilungsbild zeigt an, daß der Untersuchungszeitraum hinreichend lang war, und der Datensatz hinreichend groß ist für statistische Analysen. Die Verteilungen der einzelnen Jahre weisen demgegenüber ein unausgeglichenes und uneinheitliches Verteilungsbild auf, in dem stationsweise und jahresweise Unterschiede deutlich werden (vgl. dazu Tab. 4). Ordnet man die arithmetischen Mittelwerte der Tabelle 4, die hier zunächst einmal als Maß des Säureeintrags gelten sollen, nach ihrem Rang, so gibt dies eine bemerkenswerte Rangfolge von hohen pH-Mittelwerten zu niedrigen: Lauenburg, Helgoland, Glückstadt, Lübeck, Westermarkelsdorf, Gnutz, Flensburg, Ahrensburg, Schleswig, Kiel, St. Peter, List. Dabei sind, wie sich aus Tabelle 4 ebenfalls ergibt, die am Ende der Rangfolge stehenden Stationen wie Ahrensburg, Schleswig, Kiel, St. Peter und List ganz oder überwiegend linkssteil, d.h. Mo < Md < AM, während die am Anfang stehenden

Tab. 4: Mittelwerte und Streuungsmaße der pH-Wert-Messungen, für die einzelnen Stationen (dargestellt als pH x 10)

Station	Jahr	Mo	Md	AM	s	Min	Max	N
Ah	1982	44	45,5	48,2	8,5	30	68	108
	1983	46	47	49,0	8,6	33	68	128
	1984	45	52	53,0	9,0	37	74	132
	1985	41	47	49,4	8,6	35	78	139
	82-85	44	47,5	49,9	8,8	30	78	488
Fl	1982	46	50	50,6	8,7	36	85	117
	1983							
	1984							
	1985							
	82-85							
Gl	1982	44	48	49,5	7,6	38	68	101
	1983	68	60	57,6	10,4	35	72	122
	1984	58	55	54,6	9,2	35	75	123
	1985	60	55	55,1	8,5	36	76	141
	82-85	60	55	54,3	9,4	35	76	472
Gn	1982	56	54	54,0	6,9	36	74	144
	1983	56	52	50,5	8,0	32	70	171
	1984	43	50	51,4	8,1	37	71	161
	1985	51	54	54,3	8,5	37	72	185
	82-85	54	53	52,4	8,1	32	74	651
He	1982	64	62	58,8	8,5	36	75	125
	1983	60	58,5	57,0	9,0	36	82	168
	1984	59	57,5	55,8	9,6	36	88	158
	1985	61	54	53,1	9,3	31	76	143
	82-85	62	58	56,1	9,3	31	88	594
Ki	1982	42	50	50,4	8,0	35	70	131
	1983	44	49	50,7	8,1	37	77	166
	1984	47	47	48,6	7,6	37	72	156
	1985	43	43	45,9	8,1	36	83	152
	82-85	42	47	48,8	8,0	35	83	595

Station	Jahr	Mo	Md	AM	s	Min	Max	N
La	1982	62	60	57,6	7,1	40	69	108
	1983	60	61	59,9	5,4	45	69	141
	1984	65	66	66,1	5,0	46	78	128
	1985	71	63	62,5	7,9	46	81	139
	82-85							516
Li	1982	54	46	48,0	7,7	30	66	122
	1983	58	48	49,8	8,0	34	72	150
	1984	45	45	46,3	6,6	33	73	142
	1985	41	44	46,0	7,6	33	71	149
	82-85	44	46	47,5	7,6	30	73	549
Lu	1982	60	56	54,0	7,7	39	69	96
	1983	61	56,5	55,5	8,4	36	70	124
	1984	45	50	52,4	9,3	36	75	124
	1985	43	49	51,4	9,3	37	73	121
	82-85	60	53	53,2	8,8	36	75	461
SP	1982	46	47	49,3	7,3	35	67	120
	1983	44	46	47,7	8,5	34	79	162
	1984	45	46	47,2	7,5	35	81	148
	1985	45	46	48,3	8,0	35	70	149
	82-85	44	46	48,1	7,8	34	81	566
Sl	1982	48	49	49,7	7,5	34	72	141
	1983	40	48	48,6	7,2	32	69	171
	1984	45	47	49,7	8,2	34	78	154
	1985	45	48	49,5	6,7	38	77	161
	82-85	45	48	49,3	7,3	32	78	619
We	1982	42	50	51,2	10,3	34	76	90
	1983	40	51,5	51,3	9,9	34	68	122
	1984	60	54	54,1	9,0	35	79	129
	1985	45	53	53,1	8,9	32	72	132
	82-85	60	52	52,6	9,5	32	79	464

Mo Mode
Md Median
AM arithm. Mittel
S Standardabweichung
N Anzahl der Messungen

Abbildung 2

32	xx	1
34	xxx	2
35	xxx	2
36	xxxxx	4
37	xxxxxxx	6
38	xxxxxxxxxxxxxxxx	13
39	xxxxxxxxxxx	10
40	xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx	25
41	xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx	16
42	xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx	27
43	xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx	22
44	xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx	37
45	xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx	43
46	xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx	36
47	xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx	38
48	xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx	42
49	xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx	34
50	xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx	28
51	xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx	32
52	xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx	24
53	xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx	16
54	xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx	26
55	xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx	17
56	xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx	18
57	xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx	19
58	xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx	17
59	xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx	20
60	xxxxxxxxxx	8
61	xxx	2
62	xxxxxxxxxxxx	10
63	xxxxxxxxxx	7
64	xxxxxxxxxx	6
65	xxxx	3
66	xxxx	3
68	xx	1
69	xxxx	3
71	xxx	2
72	xx	1
73	xxx	2
75	xxx	2
77	xx	1
78	xx	1

Stationen wie Helgoland, Glückstadt und Lübeck überwiegend rechtssteil sind, d. h. Mo > Md > AM.

Unter der Annahme, daß stationsweise Unterschiede im Säureeintrag sich über den Meßzeitraum von vier Jahren hinweg ausgleichen, sind für diese Unterschiede zwischen den Stationen Lokaleffekte verantwortlich zu machen. Diese sind in einem

mehr oder weniger großen Angebot basisch reagierender, den Säuregrad verringernder bzw. puffernder Stoffe zu suchen.

An der Station Helgoland sind die geringen Säuregrade durch Meerwasser zu erklären, das bei stärkeren Winden als Spritzwasser in das Probengefäß gelangt (vgl. die topographische Lage der Station, Tab. 1). Nachgewiesen wurde dies durch gleichzeitige Chloridbestimmungen. Meerwasser ist schwach alkalisch (pH-Wert 7,5 bis 8,5) und gut gepuffert (Natriumhydrogenkarbonat), so daß Anteile davon im Niederschlagswasser dessen pH-Wert erhöhen. Für die Station Westermarkelsdorf auf Fehmarn gilt dies mit Einschränkungen; Salzgehalt, Windstärke und freie Meerestrecke westlich der Station sind hier geringer, entsprechend liegt die Station in der Rangfolge im Mittelfeld. Für die extrem hohen pH-Werte der Station Lauenburg, die im dicht bebauten (Alt-) Stadtzentrum liegt, sind vermutlich alkalische Stäube verantwortlich zu machen (dazu wurden keine Untersuchungen gemacht).

Immerhin zeigte sich für die Station Lübeck eine Abnahme des pH-Wertes, als sie vom dicht bebauten und verkehrsreichen Altstadtrandbereich am 15. Februar 1985 zum freien Flughafengelände südlich der Stadt verlegt wurde: der pH-Wert betrug vor dem 15.2.1985 im Mittel von 366 Fällen 5,5, nach dem 15.2.1985 im Mittel von 166 Fällen 4,9. Daraus ist zu folgern, daß ein hoher pH-Wert des Niederschlags nicht generell ein Indikator unbelasteter Luft und Niederschläge ist.

Schließlich bleibt zu berücksichtigen, daß Ammoniak in Wasser gelöst, dessen Reaktion ins Basische verschiebt; Ammoniak ist insbesondere im ländlichen Bereich zu erwarten. Sucht man nun nach einer Station, die weder vom Meerwasser noch von alkalischen Stäuben noch von Ammoniak beeinflusst sein dürfte, so trifft dies nur auf die Station List zu, weit genug von der Nordsee entfernt, exponiert auf einer Düne außerhalb der Siedlung gelegen, ohne landwirtschaftliche Nutzflächen in ihrer Umgebung. Aus diesen Rahmenbedingungen ist vermutlich zu erklären, warum List die Station mit dem niedrigsten Mittelwert und mit der niedrigsten Einzelmessung des pH-Wertes ist; es ist die Station, an der die eintreffenden Luftmassen am wenigsten durch neutralisierende Lokaleffekte beeinträchtigt werden, die Station, die am ehesten das Ausmaß der importierten Säurebelastung dokumentiert.

Die Berechnung der Mittelwerte nach verschiedenen Verfahren ergab Unterschiede in der Höhe, nicht aber in der Rangfolge der Stationen (vgl. Tab. 5). Am höchsten liegen die arithmetischen Mittel der pH-Werte. Berechnet man aus den pH-Werten die mittlere Wasserstoffionen-Konzentration und wandelt diese wieder in einen pH-Wert zurück, so liegt dieser etwa 0,3 Einheiten niedriger als das arithmetische Mittel. Berücksichtigt man zusätzlich noch die tägliche Niederschlagsmenge, so erhält man einen minimal niedrigeren Wert.

In Tabelle 6 ist für ausgewählte Stationen die jährliche Säure-Deposition angegeben, die durch Umwandlung des täglichen pH-Wertes in eine Wasserstoffionen-Konzentration, deren Multiplikation mit dem täglichen Niederschlag und durch Summierung der Produkte errechnet wurde. Die Werte liegen im unteren Bereich der von ULRICH 1985, Seite 176, angegebenen Spannweite der nassen Deposition in Nordwestdeutschland (0,2 bis 0,8 kmol H⁺ pro Hektar und Jahr).

Tab. 5: Mittelwerte des pH-Wertes 1982-1985 nach verschiedenen Berechnungen

Station	AM	R	AM _H	R	AM _{HN}
Ahrensburg	4,99	5	4,63	5	
Glückstadt	5,44	1	4,90	2	
Gnutz	5,25	4	4,69	4	
Kiel	4,88	7	4,57	7	4,52
List	4,75	9	4,46	9	4,44
Lübeck	5,32	2	4,91	1	4,72
Sankt Peter	4,80	8	4,49	8	4,44
Schleswig	4,93	6	4,59	6	4,54
Westermarkelsdorf	5,26	3	4,73	3	

AM arithmetisches Mittel
 AM_H arithmetisches Mittel der aus dem pH-Wert errechneten Wasserstoffionen-Konzentrationen, zurückgerechnet in pH-Wert
 AM_{HN} wie AM_H, jedoch mit tägl. Niederschlag gewichtet
 R Rang

Der Frage, wie stark und welcher Art die Zusammenhänge bzw. Unterschiede zwischen den Stationen sind, wurde durch Berechnung der Interkorrelationen sowie durch den Wilcoxon-Test nachgegangen. Aus den Interkorrelationen läßt sich ablesen, wie stark die Kurvenverläufe der einzelnen Stationen über den Meßzeitraum zusammenhängen. Das Resultat ist, daß fast alle Stationen untereinander gering aber signifikant korrelieren (gemeinsame Varianz bis zu etwa 15 %). Dies läßt auf generelle Einflußfaktoren schließen.

Tab. 6: Säure-Deposition in Schleswig-Holstein, berechnet aus pH-Wert und Niederschlag (Werte in kmol H⁺ pro ha und Jahr)

Jahr	Station:				
	List	Schleswig	St. Peter	Lübeck	Kiel
1982	0,26	0,21	0,15	0,09	0,20
1983	0,27	0,37	0,43	0,13	0,21
1984	0,28	0,23	0,36	0,15	0,24
1985	0,32	0,23	0,28	0,13	0,32
Summe	1,13	1,05	1,22	0,51	0,96

Der Wilcoxon-Test beantwortet die Frage, ob signifikante Unterschiede zwischen zwei Stationen hinsichtlich des Mittelwertes bestehen. Diese Frage ist aufgrund des Testes zu bejahen, was auf lokale Einflußfaktoren schließen läßt.

Mit einer zweifachen Varianzanalyse wurde ein möglicher Effekt von Jahr und Station bzw. von Jahresgang und Station auf den pH-Wert geprüft. Resultat ist zum einen, daß aus der Gesamtheit der Stationen über die Jahre kein Gesamttrend ermittelbar ist; die Stationen müssen vielmehr getrennt betrachtet werden. Resultat ist zum anderen, daß die einzelnen Stationen auch im Jahresverlauf unterschiedliche Veränderungen aufweisen, so daß keine für Schleswig-Holstein insgesamt gültige Jahreskurve daraus ableitbar ist. Es ist nicht zulässig, den Jahresgang des pH-Wertes in Schleswig-Holstein anhand einer einzigen Station zu beschreiben, sofern man unterstellt, daß die Meßwerte mehr als nur lokale Repräsentanz besitzen.

Das Fehlen eines Jahresganges des pH-Wertes trotz eines eindeutig nachgewiesenen Jahresganges der SO₂-Emissionen, der Hauptsäurebildner im Niederschlag, entspricht den Feststellungen von WINKLER 1982. Es steht im Gegensatz zu den Messungen von KUTLER 1982 für Bochum, aus denen sich deutliche jahreszeitliche Unterschiede ergeben; zu dieser Frage sind offensichtlich noch weitere Auswertungen erforderlich.

In einem weiteren Analyseansatz wurden die pH-Meßwerte nach Großwetterlagen gegliedert; das ist bisher noch nicht versucht worden.

Lediglich WINKLER 1982 hat versucht, für die Jahre 1976 bis 1980 in Hamburg auf der Grundlage von Trajektorienbestimmungen für das 850 mb-Niveau mittlere pH-Werte für die einzelnen Sektionen zu bestimmen; das Resultat waren minimale Unterschiede (von pH 4,1 bis 4,3).

Die Überprüfung des Zusammenhanges zwischen pH-Wert und Bodenwind, wie für die schleswig-holsteinischen Stationen für das Jahr 1982 vorgenommen wurde, ergab, daß der Bodenwind nur geringfügig zur Erklärung der Varianz des pH-Wertes beiträgt. Der Bodenwind ist zwar besser auf lokale, dafür aber schlechter auf überregionale Einflußgrößen bezogen. Methodisch ist es zudem problematisch, die einmal täglich erfaßten und dann zu mitteln Bodenwind in Beziehung zu setzen. Die einmal pro Tag erfaßten Großwetterlagen können dagegen für sämtliche Stationen Gültigkeit beanspruchen, so daß allein schon aus praktischen Gründen ein Erklärungsversuch mit ihnen sinnvoll ist.

Die detaillierte Gliederung der Großwetterlagen, die auch im Deutschen Wetterdienst gebräuchlich ist, umfaßt 30 Typen (aufgeführt bei BLÜTHGEN und WEISCHET 1980, Tab. IIIe) (2, S. 493); sie wurden in die Datentabelle (Tab. 3) übernommen. Eine zu neun Gruppen zusammengefaßte Gliederung wurde von KUHNKE und KLEIN 1969 vorgelegt (freundliche mündliche Mitteilung von Dr. Schulz, Deutscher Wetterdienst Freiburg); sie ist in Tab. 7 als Code B bzw. als Gruppenüberschrift in Spalte 1 wiedergegeben, während die wichtigsten Großwetterlagen aus der detaillierten Gliederung (mit Häufigkeiten während des Meßzeitraumes in Klammern) darunter aufgeführt sind.

Dargestellt ist in Tab. 7 die mittlere Wasserstoffionenkonzentration (umgerechnet aus pH-Meßwerten und ohne Gewichtung mit der Niederschlagsmenge), und zwar für jede Großwetterlage und Station. Die Unterschiede zwischen den Großwetterla-

Tab. 7: Wasserstoffionenkonzentration in $\mu\text{g/l}$ 1982-1985, gegliedert nach Wetterlagen

Wetterlage (mit Häufigkeit in %)	Stationen:										m \pm s	N	
	Code B	Li	Fi nur 1982	Sl	SP	We	Gn	Gl	Lu	Ah			Ki
Übergang (2.0)	0	38	27	78	51	66	48	68	35	40	47	50 \pm 16	111
Hochdruck HM (8.4), SEa (0.8)	1	(112)	(82)	62	59	53	15	(46)	13	37	(25)	50 \pm (31)	118
BM (8.9), HFa (2.2)	3	76	55	26	(94)	50	19	21	30	47	(63)	48 \pm 25	185
Ost TM (3.8), HFz (1.2) u.a.	9	111	54	(63)	81	28	(47)	28	37	(48)	40	(54) \pm 26	355
Südwest TrW (5.1), SWz (5.1) SWa (4.0), TB (3.3) u.a.	4	56	25	41	50	45	41	24	25	41	38	39 \pm 11	1152
West WS (4.9) Wa (7.4) Wz (15.1)	8 6 7	64 57 36	48 28 21	55 23 24	73 50 34	(77) (79) (75)	43 24 (71)	36 18 (74)	(47) 13 (73)	41 (30) 33	54 36 28	54 \pm 14 30 \pm 14 23 \pm 9	317 438 1453
Nordwest HB (6.4), TrM (6.2) NWz (3.4), NWA (2.6) u.a.	5	(37)	(6)	(17)	(25)	21	12	15	13	38	31	(27) \pm 10	969
Total (100)		50	30	33	46	32	24	21	21	38	36	33 \pm 10	5098

z zyklonal, a antizyklonal
o Maximum
m \pm s Mittelwert und Streuung der Stationswerte
N Anzahl der Fälle

gen, immerhin im Verhältnis 1 : 10 zwischen Minimum und Maximum entsprechend einer pH-Wert-Differenz von 1, sind deutlich, wenngleich nicht durchgehend signifikant. Die höchsten mittleren Säurekonzentrationen treten fast ausschließlich bei West- und Nordwestwetterlagen auf; die Streuungen zwischen den Stationen sind hier am geringsten. Die südliche Westlage (WS), die zu den Westlagen gezählt wird, ist im Hinblick auf die Wasserstoffionenkonzentration eher Ost- und Hochdrucklagen zuzuordnen. Die Südwestlage nimmt eine unauffällige mittlere Stellung ein.

Eine Erklärung für diese Verteilung ist darin zu sehen, daß die austauschreichen Südwest-, West- und Nordwestlagen Konzentrationsmindernd wirken, und daß bei den austauschärmeren Ost- und Hochdrucklagen lokale Einflüsse stärker wirksam werden können.

Offensichtlich sind die für Räume kontinentalen Ausmaßes definierten und nur unscharf voneinander abzugrenzenden Großwetterlagen geeignet, selbst für einen vergleichsweise kleinen Raum wie Schleswig-Holstein Erklärungsansätze für die Varianz des Sauren Regens zu liefern. Dies Resultat kann weitgehend Fragen anregen, etwa zur jahreszeitlich unterschiedlichen Gewichtung der Wetterlagen (eine Hochdruckwetterlage im Sommer ist anders zu bewerten als eine im Winter) oder auch zur Berücksichtigung der mit den Großwetterlagen verknüpften Luftmassentypen. Großräumige und lokale Einflüsse auf den Sauren Regen in Schleswig-Holstein könnten so möglicherweise noch schärfer herausgearbeitet werden.

Zusammenfassung

Es wird ein vierjähriges Meßprogramm zur Erfassung des Sauren Regens in Schleswig-Holstein in Zusammenarbeit mit dem Deutschen Wetterdienst und zehn bis zwölf seiner Stationen beschrieben. Probennahme und Meßmethodik werden dargestellt. Anschließend wird eine erste statistische Auswertung der Daten gegeben, die zeigt, daß trotz des durch die Erfassungsmethodik bedingten „Rauschens“ Aussagen möglich sind: Lokale Einflüsse auf den Säuregrad der Niederschläge sind anhand der Mittelwerte und Verteilungsformen erkennbar und werden diskutiert; nicht feststellbar ist ein Jahresgang des pH-Wertes und eine gleichsinnige Veränderung über die Jahre; eine Gliederung nach Großwetterlagen ergibt deutliche Unterschiede.

Danksagung

Das Projekt wurde vom Deutschen Wetterdienst, Wetteramt Schleswig, Herrn Dipl.Met. Klockow, sowie von der Agrarmeteorologischen Beratungs- und Forschungsstelle Ahrensburg, Herrn Dipl.Met. Dr. Beinbauer, unterstützt. Die Probenahme erfolgte durch die Mitarbeiter der Meßstationen. Die Messungen und die damit verbundenen Arbeiten wurden von studentischen Hilfskräften sowie von den Herren Dipl.Geographen Packschies und Fröhling sowie Studienrat Henke im Rahmen von Arbeitsbeschaffungsmaßnahmen durchgeführt. Herr Kollege Bauer vom Institut für Chemie und ihre Didaktik im Hause half bei der Klärung chemischer und meßtechnischer Fragen.

Bei der statistischen Analyse unterstützte mich Herr Dr. Niehusen. Allen sei für Unterstützung und Mitarbeit gedankt.

Literatur

- BLÜTHGEN, J. und WEISCHET, W. (1980): Allgemeine Klimageographie. Lehrbuch der Allgemeinen Geographie, **2**; Berlin/New York.
- HASSENPFUG, W. (1983): Saurer Regen auf Schleswig-Holstein. – Die Heimat, **90**: 42–53.
- HASSENPFUG, W. (1983): Saurer Regen – neue Experimente zu einem neuen Thema. – Praxis Geographie, **1**: 28–34.
- KUHNKE, W. und KLEIN, E. (1969): Erläuterung zur Dezimalklassifikation des Wettergeschehens. Ber. d. Dt. Wetterdienstes, **15** (114), Anhang zum Beitrag von Bock.
- KUTTLER, W. (1982): Niederschlagsanalysen im Rahmen des Stanseeprojektes „Kemrade“ In: Bochumer Geogr. Arbeiten, H. 42, S. 24–66.
- SCHNUG, E. und von FRANCK, E. (1985): Schwefel-Eintrag aus der Atmosphäre in Schleswig-Holstein. – Z. Pflanzenern. und Bodenkunde, **148**: 24–32.
- ULRICH, B. (1985): Natürliche und anthropogene Komponenten der Bodenversauerung. – Mitteilgn. der dtsh. Bodenkundl. Gesellsch. **43** (1): 159–187.
- WINKLER, P. (1982): Zur Trendentwicklung des pH-Wertes des Niederschlags in Mitteleuropa. – Z. Pflanzenern. und Bodenk. **145**: 576– 585.
- WINKLER, P. (1983): Saurer Niederschlag – eine Trendanalyse. – Ann. D. Meteorologie NF **20**: 117–118.

Tabellenverzeichnis

1. Die Meßstationen – Lage und Besonderheiten im Überblick
2. pH-Wert-Messungen und Niederschläge 1982–1985
3. Ausschnitt aus der Tabelle der Meßwerte (in pH-Wert x 10)
4. Mittelwerte und Streuungsmaße der pH-Wert-Messungen für die einzelnen Stationen (dargestellt als pH x 10)
5. Mittelwerte des pH-Wertes 1982–1985 nach verschiedenen Berechnungen
6. Säuredeposition in Schleswig-Holstein berechnet aus pH-Wert und Niederschlag (Werte in kmol H⁺ pro Hektar u. Jahr)
7. Wasserstoffionen-Konzentration 1982–1985 an den einzelnen Stationen, gegliedert nach Großwetterlagen (in µg)

Abbildungen

1. Zeitlicher Verlauf der Meßwerte im Januar 1985
2. Die Häufigkeitsverteilung der Meßwerte 1982–1985 der Station Schleswig (dargestellt als pH x 10)