

SIGURD EVJEN

STATISTISCHE UNTERSUCHUNGEN
AN DRUCK- UND TEMPERATURFELDERN
ÜBER SÜD-SKANDINAVIEN

INHALTSVERZEICHNIS

v. Statistische Untersuchungen über das horizontale Luftdruckfeld und die horizontale Bewegungsgrösse.	
1. Der Gradientensatz.....	5
2. Material und Genauigkeitsuntersuchungen	6
3. Resultate der Ausmessungen von Feld I	8
4. Ausmessungen von Feld A und Feld B	17
B. Die kinetische Energie des Geostrophwindes	18
C. Zum Energieverbrauch der Atmosphäre	20
D. Statistische Untersuchungen über durchschnittliche Gradienten von Mitteltemperaturkarten	21
E. Über den Wärmeumsatz der horizontalen Luftströme.	
1. Definition und Berechnungsweise des Wärmeumsatzes	26
2. Statistische Untersuchungen hinsichtlich des Wärmeumsatzes über Feld I	28
Zusammenfassung	31

VERZEICHNIS DER AM MEISTEN BENUTZTEN ABKÜRZUNGEN

(Die übrigen werden im Text erklärt.)

- A* Areal, im Abschnitt C auch Arbeit. (Das Areal von Feld I = 1 231 600 km².)
- c_p* sp. Wärme bei konst. Druck.
- G* Gradient, meistens Druckgradient, $\frac{\Delta p}{\Delta s}$. Gewöhnlich wird $\Delta p = 5$ mb gesetzt, und Δs ist der kürzeste Abstand zwischen Nachbarisobaren.
- h* Schichtdicke, meistens gleich 1 cm.
- L* Länge sämtlicher Isolinien über einem Gebiet, N, S, E und W ihre Komponenten gegen Norden, Süden, Osten und Westen, R die Resultante der Komponenten.
- v* Windgeschwindigkeit.
- a* sp. Volumen.
- ρ* Dichte.
- λ $2\omega \sin \varphi$.
- φ* Breite.
- ω* Winkelgeschwindigkeit der Erde.

VORWORT

Bei der vorliegenden Untersuchung ist die grösste Arbeit in den Tabellen und Abbildungen versteckt. Neben einer Besprechung hiervon enthält die Arbeit auch Beschreibungen der angewandten Methoden. Natürlich könnten statistische Untersuchungen von Druck- und Temperaturfeldern auch andere Untersuchungen als die hier besprochenen umfassen, um aber die Arbeit in absehbarer Zeit beenden zu können war eine gewisse Begrenzung notwendig. Auch die hier vorliegenden Resultate konnten nur durch die Mithilfe des hiesigen Instituts zuwegegebracht werden. Mit der Ausmessung der Druckkarten war mir besonders Assistentin *Frl. S. Brekke* behilflich. Für diese Unterstützung bin ich den Herren Direktor *Hesselberg* und Abteilungsleiter *Björkdal* zu grossem Dank verpflichtet.

STATISTISCHE UNTERSUCHUNGEN AN DRUCK- UND TEMPERATURFELDERN ÜBER SÜD-SKANDINAVIEN

VON
SIGURD EVJEN

(Manuskript am 2. April 1915 eingelefert.)

A. STATISTISCHE UNTERSUCHUNGEN ÜBER DAS HORIZONTALE LUFTDRUCKFELD UND DIE HORIZONTALE BEWEGUNGSGRÖSSE.

I. Der Gradientsatz.

Im Jahre 1890 haben *S. Finsterwalder* und *Karl Peucker*¹⁾ zur selben Zeit eine Methode angegeben, wodurch sich die mittlere Böschung eines Gebirges durch Ausmessung der Länge der Höhenkurven bestimmen lässt. Ohne damals Kenntnis von diesen Abhandlungen zu besitzen habe ich später gezeigt²⁾, dass man den mittleren Gradienten, \bar{G} , einer Druckkarte durch Ausmessung der Isobarenlängen finden kann. Nennt man die gesamte Länge der Isobaren L und die Druckdifferenz zwischen zwei Nachbarisobaren Δp , so findet man die Summe P der Skalarwerte der horizontalen Luftdruckkräfte über dem untersuchten Gebiet nach²⁾ mittels der Gleichung

$$P = \Delta p \cdot L \quad 1a)$$

wenn die Höhe h der Luftschicht gleich 1 gesetzt wird. Durch Division mit dem Flächeninhalt A des Gebietes ergibt sich den mittleren Gradienten

$$\bar{G} = \frac{\Delta p \cdot L}{A} \quad 1b)$$

Der kürzeste Abstand zwischen zwei Nachbarisobaren nennen wir Δs . Wir finden einen Mittelwert für Δs über dem Gebiet A nach der Gleichung

$$\Delta s_m \cdot L = A \quad 1c)$$

Denn das ganze Areal A wird von den Isobaren in Arealstreifen geschnitten, welche zusammen die Länge L haben, denen wir eine mittlere Breite Δs_m zuschreiben können.

Die Gleichung des Geostrophwindes ist bekanntlich

$$a \cdot G = \lambda \cdot v \quad 2a)$$

Innerhalb eines kleinen Gebietes können wir λ als eine Konstante betrachten. Auch a variiert verhältnismässig wenig und lässt sich deshalb hinreichend genau durch eine Konstante ersetzen. Wir schreiben deswegen

$$a \cdot \bar{G} = \lambda v_m \quad 2b)$$

Hierdurch finden wir v_m als einen Mittelwert des Geostrophwindes über A , wenn wir \bar{G} nach Gl. 1b) einführen.

Setzt man Geostrophwind überall im Felde voraus, so bilden zwei Nachbarisobaren ein Stromrohr mit demselbem Massentransport durch jeden Querschnitt. Durch Ausmessung der Isobarenlängen lässt sich deshalb auch der Skalawert der Bewegungsgrösse des Geostrophwindes bestimmen, wenn man das Gebiet so klein wählt, dass man λ als eine Konstante innerhalb des Gebietes ansehen darf.

¹⁾ *S. Finsterwalder*: Über den mittleren Böschungswinkel und das wahre Areal einer topographischen Fläche. Sitzber. d. math. physikal. Classe d. k. b. Akad. d. Wissenschaften zu München. Band 20, 1890.

Karl Peucker: Der mittlere Neigungswinkel des Bodens. Mitt. d. Deutsch. und österr. Alpenvereins 1890, S. 10. Die Originalabhandlung *Peuckers* war mir z. Z. nicht zugänglich. Besprochen bei *Albrecht Penck*: Morphologie der Erdoberfläche. 1. Teil.

²⁾ *Sigurd Evjen*: Bemerkungen über horizontale Luftdruckkräfte. Meteorologische Zeitschrift, 1928, Heft 7.

Gl. 2 a) lässt sich schreiben

$$\rho v \Delta s = \frac{\Delta p}{\lambda} \quad (2c)$$

Die Bewegungsgrösse $\rho v \Delta s$ ist enthalten in einem Rohr von der Breite Δs , der Höhe l und der Länge l entlang der Isobaren. Die gesamte Bewegungsgrösse B innerhalb A finden wir deshalb durch Multiplikation von $\rho v \Delta s$ mit L , oder

$$B = \frac{\Delta p}{\lambda} L \quad (3a)$$

Pro Flächeneinheit (eigentlich pro Volumeneinheit, weil $h = 1$) wird die Bewegungsgrösse gleich

$$\frac{B}{A} = \frac{\Delta p}{\lambda} \frac{L}{A} \quad (3b)$$

Durch Projektion der Isobaren auf ein Achsenkreuz können wir die Komponenten sowohl der Bewegungsgrösse als der Druckkräfte finden, nur muss man erinnern, dass der Gradient 90° nach links von den Isobaren gedreht ist. Theoretisch müssen die Nachbarisobaren unendlich nahe an einander liegen, d. h. Δp muss unendlich klein sein, damit jede Isobare genau ein Stromrohr repräsentiert, praktisch lässt sich dies nicht durchführen. Bei der Projektion müssen die Isobaren mit Richtungsangaben versehen werden, positiv in der Richtung des Gradientwindes. Nachdem die «Isobarenkomponenten» bestimmt sind, lässt sich die Resultante leicht finden. Isobaren, die innerhalb des Gebietes geschlossen sind, kommen bei der Bestimmung der Resultante nicht in Betracht.

Wählen wir die positive x -Achse gegen Osten, können wir die Isobarenkomponenten gegen Norden, Süden, Osten und Westen mit N, S, E bzw. W bezeichnen. N bezeichnet deshalb einen Massentransport gegen Norden, entspricht m. a. W. einem geostrophischen Südwind und zugleich einem nach Westen zeigenden Gradienten. Wenn wir in Gl. 3 a) und 1 b) N statt L einführen, finden wir die Komponente der Bewegungsgrösse gegen Norden, bzw. die Westkomponente des mittleren Gradienten.

Für die hier angedeuteten Vektoroperationen möchte ich den Namen *Gradientsatz* vorschlagen. Der Satz lässt sich auf beliebige Isolinien verwenden, selbstverständlich mit wechselnd physikalischer Bedeutung. Im Folgenden wird beispielsweise auch vom Gradientsatz Gebrauch ge-

macht um den durchschnittlichen Gradienten von Mitteltemperaturkarten zu bestimmen.

Die Gleichungen 1) und 3) geben verschiedene Ausdrücke für den Gradientsatz. Weitere Ausdrücke dürften überflüssig sein, weil die Anwendung des Satzes nur gewöhnliche Vektoradditionen und Vektorprojektionen umfasst. Wollen wir den Gradientsatz in Worten ausdrücken, können wir sagen: *Der durchschnittliche Gradient über einem Gebiet ist den Längen der Isolinien proportional.* Für Luftdruckkarten — mit $\lambda = \text{constant}$ — hat der Satz auch die spezielle Form: *Die Bewegungsgrösse des Geostrophwindes über einem Gebiet ist den Längen der Isobaren proportional.* —

Wir gehen zunächst zur Untersuchung der Isobaren über.

2. Material und Genauigkeitsuntersuchungen.

Als Material dienten die Arbeitskarten des hiesigen Meteorologischen Instituts. Abb. 1 zeigt die Gebiete, welche für die Ausmessung gewählt

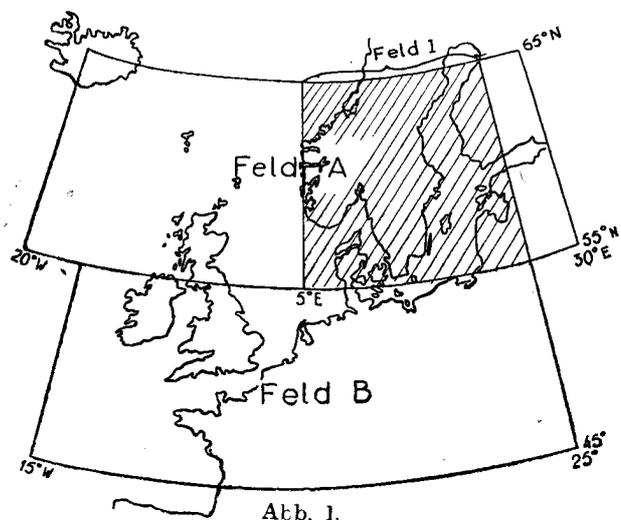


Abb. 1.
Karte über die untersuchten Felder.

wurden; der schraffierte Teil von Feld A ist mit Feld 1 bezeichnet. Die Arbeit wurde hauptsächlich auf Feld 1 beschränkt, wo die Längen der Isobaren und die Längen der «Isobarenkomponenten» für das Jahrzehnt 1922—31 für alle Morgenkarten ausgemessen wurden. Ähnliche Ausmessungen für Feld A und B begrenzen sich auf das Jahr 1935.

Zur Ausmessung der Isobarenlängen wurde ein Kurvenmesser verwendet; die Längen der

Isobarenkomponenten sind durch Projektion auf die Meridiane und auf den mittleren Breitenkreis des Gebietes bestimmt. Als Einheiten sind weiter unten halbe Breitengrade (55,5 km) gebraucht, weil sich dies als praktisch erwies.

Um über die Genauigkeit der Messungen etwas aussagen zu können wurden folgende Fehler untersucht:

a) *Änderung des Kurvenmessers durch Gebrauch.*

Von diesem Fehler können wir absehen, denn eine merkbare Änderung konnte trotz häufiger Kontrolle nicht nachgewiesen werden.

b) *Fehler von L auf Grund der Kartenprojektion.*

Verwendet ist eine konforme Kegelprojektion¹⁾. Der Kegel schneidet durch 30° und 60° N, wo der Massstab folglich richtig ist. Ausserhalb dieser Breiten sind alle Linienelemente durch eine Reduktionskonstante zu dividieren, deren Wert aus nachstehender kleinen Tabelle hervorgeht:

Breitenkreis:	65°	60°	55°	50°	45°
Reduktions-					

konstante:	1,034	1,000	0,980	0,968	0,966
------------	-------	-------	-------	-------	-------

Als Reduktionskonstante wurde 0,97 für Feld B gewählt, 1,00 für Feld A und Feld 1.

Ein Fehler von L kann durch Verwendung einer *mittleren* Reduktionskonstante entstehen, falls die Isobaren unregelmässig verteilt sind, z.B. wenn die Isobaren hauptsächlich auf der nördlichen Hälfte des Gebietes vorkommen. Versuche ergaben jedoch, dass wir von einem derartigen Fehler im Mittel (wie Monatsmittel) für die gewählten Gebiete absehen können. M. a. W.: die Isobaren verteilen sich im Mittel gleichmässig auf die nördliche und südliche Hälfte des Gebietes. Daraus folgt auch, dass man einen mittleren Wert von λ einführen darf. Auf eine Wiedergabe des Zahlenmaterials dieser Fehleruntersuchungen wird hier verzichtet.

Bei der Projektion der Isobaren auf den mittleren Breitenkreis des Gebietes wurden die Meridiane als Lotlinien verwendet d. h. es wurde auf die Abnahme der Längengrade gegen Norden keine Rücksicht genommen. Im Mittel gleichen sich diese Fehler aus, was durch die soeben erwähnten Versuche bestätigt wurde.

¹⁾ V. Bjerknes: Sur les projections et les échelles à choisir pour les cartes géophysiques. Geografiska annaler, 1920, Häft 1.

c) *Gebirgsstörungen.*

Es ist hier vorgezogen von den Gebirgsstörungen ganz abzusehen. In 1000 m Höhe (Gradientwind) decken die Gebirge nur etwa 5 % von Feld 1. Falls wir die Gebirgsgegenden bei der Ausmessung der Isobaren fortlassen, weil hier keine Luft transportiert wird, so vermindern sich Isobarenlängen und Flächeninhalt des Gebietes ungefähr in demselben Verhältnis, und pro Flächeneinheit werden die Zahlen für Gradienten oder Bewegungsgrössen kaum merkbar beeinflusst.

d) *Zufällige Fehler.*

Gegen grobe Ablesefehler u. dergl. kann man nicht ganz sicher sein ohne jede einzelne Messung nachzuprüfen, und eine solche Mehrarbeit konnte hier nicht geopfert werden. Ausgedehnte Kontrollversuche haben jedoch gezeigt, dass man die unten gegebenen Mittelzahlen als zuverlässig ansehen darf.

Auch die Ausmessung von L und seinen Komponenten auf einer einzelnen Karte ist mit einer gewissen Unsicherheit behaftet, die aber nach der Versuchen nur 1 bis 2 % der gefundenen Werten ausmacht und deshalb schon beim Monatsmittel zu vernachlässigen ist.

e) *Zusammenfassung.*

Den angestellten Untersuchungen zufolge sind die zufälligen Fehler bei der Ausmessung der Morgenkarten so klein, dass sie schon im Monatsmittel nur von der Grössenordnung 1 % sein können. Neben den zufälligen Fehlern können aber auch systematische Fehler auftreten, z.B. können sich die Kartenblanketten im Laufe der Zeit verschieden geändert haben, oder bei Neudruck decken sich die neuen und alten Karten nicht vollständig. Solche systematische Fehler können nicht gross sein, wahrscheinlich nur von der Grössenordnung 1 bis 2 %; es lassen sich wenigstens die Längen der Meridiane leicht kontrollieren. Für die Monatsmittel können wir deshalb mit einem Fehler von höchstens 3 % der Mittelzahlen rechnen und für die Jahresmittel mit höchstens 2 %. Es muss zwar vorausgesetzt werden, dass es notwendig und zulässig ist die Isobaren mit einem glatten Verlauf zu ziehen, so wie es überall im untersuchten Zehnjahr gemacht worden ist.

f) *Unsicherheit im Monatsmittel der Tagesmittel durch Anwendung von Morgenkarten allein.*

Die statistischen Untersuchungen in der vorliegenden Arbeit umfassen nur die Ausmessung von Morgenkarten. Lassen wir die Morgenkarte als Tagesmittel gelten, entsteht dadurch eine gewisse Unsicherheit im Monatsmittel der Tagesmittel. Diese Unsicherheit können wir jedoch abschätzen, indem wir sowohl Morgen- als Abendkarten für einige Monate ausmessen. Wir können davon ausgehen, dass das wahre Tagesmittel annähernd dem Mittel der Morgen- und Abendkarte gleich ist. Deshalb können wir die Hälfte der Differenzen zwischen den Werten der Morgen- und Abendkarten gewissermassen als scheinbare Fehler betrachten.

Nachstehende Tabelle gibt das Resultat der Ausmessung über Feld 1 für Januar—Juni 1922 n halben Breitengraden als Einheiten. L ist dabei Isobarenlänge, N die nach Norden zeigende Isobarenkomponente (Geostrophwind aus Süden) usw.

Januar.					Februar.						
L	N	S	E	W	L	N	S	E	W		
Morgenkarte	98	45	17	29	32	Morgenkarte	95	41	16	42	22
Abendkarte	91	40	19	22	23	Abendkarte	86	34	15	41	20
Differenz...	7	5	2	7	1	Differenz...	9	7	1	1	2

März.					April.						
L	N	S	E	W	L	N	S	E	W		
Morgenkarte	84	18	30	33	21	Morgenkarte	73	36	17	18	23
Abendkarte	74	18	27	29	18	Abendkarte	63	30	14	15	22
Differenz...	10	0	3	4	3	Differenz...	10	6	3	3	1

Mai.					Juni.						
L	N	S	E	W	L	N	S	E	W		
Morgenkarte	76	21	25	42	6	Morgenkarte	66	17	27	26	11
Abendkarte	73	20	26	42	5	Abendkarte	65	15	26	28	12
Differenz...	3	1	1	0	1	Differenz...	1	2	1	2	1

Aus der Tabelle geht hervor, dass die Unsicherheit — der «scheinbare Fehler» — des Monatsmittels der Tagesmittel etwa 5% von L ausmacht und etwa 10% von seinen Komponenten. Die Unsicherheit beim Jahresmittel können wir abschätzen, indem wir nach den Regeln der Wahrscheinlichkeitsrechnung diese Zahlen mit $\sqrt{12}$ dividieren. Es handelt sich ja hier nur um Überschlagsrechnungen, so dass wir alle Monatsmittelwerte als gleichwertig betrachten können. In den gefundenen Zahlen stecken selbstverständlich die oben besprochenen zufälligen Fehler.

Untersuchen wir Felder, die grösser als Feld 1 sind, wird der scheinbare Fehler — die

Unsicherheit — im Mittel kleiner; denn um so leichter kann eine Gebietsausgleichung stattfinden derart, dass ein Anwachsen des Gradienten an einer Stelle der Karte im Laufe des Tages von einer Abnahme an anderen Stellen kompensiert wird. Für Feld A und Feld B wurde eine Stichprobe für Januar 1935 vorgenommen. In diesem Monat wurden sämtliche Morgen- und Abendkarten ausgemessen und die Grösse der Differenz untersucht. Der mittlere scheinbare Fehler des Monats machte für L etwa 2% des Monatsmittels für beide Felder aus, d. h. er war bedeutend kleiner als was oben für Feld 1 gefunden wurde. Für die Komponenten muss diese Zahl um rund die Hälfte erhöht werden.

Je nachdem wir Mittelzahlen für die Morgenkarten allein betrachten oder Mittelzahlen für die Morgenkarten als Repräsentanten für den ganzen Tag, müssen wir den Mittelzahlen verschiedene Unsicherheiten beimessen. Im Folgenden betrachten wir nur die Morgenkarten für sich und rechnen mit den unter Pkt. e) abgeschätzten Fehlern.

3. Resultate der Ausmessungen von Feld 1.

Tab. 1.
Isobarenlänge L für Feld 1 in halben Breitengraden (55,5 km).

Jahr	J.	F.	M.	A.	M.	J.	J.	A.	S.	O.	N.	D.	Mittel
1922	98	95	84	73	76	66	68	59	74	68	94	89	79
1923	101	93	68	69	69	69	57	67	80	81	96	93	79
1924	102	90	86	79	66	69	56	61	83	80	77	105	79
1925	108	107	81	68	61	67	57	62	70	91	87	98	80
1926	91	98	95	73	62	63	59	64	75	77	94	91	79
1927	109	89	84	85	71	68	47	63	65	90	90	82	79
1928	104	103	83	66	63	72	72	61	65	81	94	94	80
1929	95	95	81	79	68	67	67	74	73	95	90	117	83
1930	100	89	90	74	55	56	54	63	71	83	95	95	77
1931	94	102	85	71	66	74	66	57	73	96	89	107	82
Zehnjahresmittel	100	96	84	74	66	67	60	63	73	84	91	97	80
Fünfjahresmittel													
1922—26	100	97	83	72	67	67	59	63	76	79	90	95	
1927—41	100	96	85	75	65	67	61	64	69	89	92	99	

Mit $2,775 \cdot 10^{10}$ multipliziert geben die Zahlen die Summe der Druckkräfte in dyn, mit $2,23 \cdot 10^{-6}$ multipliziert den mittleren Druckgradienten in dyn cm⁻³, mit $2,21 \cdot 10^{14}$ multipliziert die Bewegungsgrösse des Geostrophwindes in g cm sec⁻¹ und mit $1,8 \cdot 10^{-2}$ multipliziert die Bewegungsgrösse pro Volumeneinheit in g cm sec⁻¹ cm⁻³. Höhe der betrachteten Schicht gleich 1 cm.

Tab. 2.
Länge der Isobarenkomponente N gegen Norden
(geostrophischer Südwind). Feld 1.

Jahr	J.	F.	M.	A.	M.	J.	J.	A.	S.	O.	N.	D.	Mittel
1922	45	41	18	36	21	17	23	24	24	11	25	41	27
1923	32	53	29	25	30	12	16	24	33	35	30	33	29
1924	53	26	30	27	29	20	21	33	32	45	25	52	33
1925	31	48	20	29	31	8	21	18	25	27	24	38	27
1926	55	50	22	27	25	21	13	19	26	23	53	22	30
1927	65	42	43	24	19	24	16	25	32	25	34	28	31
1928	53	47	44	26	13	17	15	17	20	38	40	35	30
1929	35	46	8	18	27	17	14	31	27	44	58	72	33
1930	53	22	31	25	21	18	14	21	28	38	32	58	30
1931	44	64	14	29	27	12	34	14	8	22	63	23	29
Zehnjahresmittel	47	44	26	27	24	17	19	23	26	31	38	40	30
Fünfjahresmittel													
1922—26	43	44	24	29	27	16	19	24	28	28	31	37	
1927—31	50	44	28	24	21	18	19	22	23	33	45	43	

Mit $2,775 \cdot 10^{10}$ multipliziert geben die Zahlen die Summe der Komponenten der Druckkräfte gegen Westen in dyn, mit $2,23 \cdot 10^{-6}$ multipliziert die Komponente des mittleren Druckgradienten gegen Westen in dyn cm^{-3} , mit $2,21 \cdot 10^{14}$ multipliziert die Komponente der Bewegungsgröße des Geostrophwindes gegen Norden in $g \text{ cm sec}^{-1}$ und mit $1,8 \cdot 10^{-2}$ multipliziert die Bewegungsgröße gegen Norden pro Volumeneinheit in $g \text{ cm sec}^{-1} \text{ sec}^{-3}$. Höhe der betrachteten Schicht gleich 1 cm.

Tab. 3.
Länge der Isobarenkomponente S gegen Süden
(geostrophischer Nordwind). Feld 1.

Jahr	J.	F.	M.	A.	M.	J.	J.	A.	S.	O.	N.	D.	Mittel
1922	17	16	30	17	25	27	21	15	25	35	39	21	24
1923	29	9	15	18	13	30	16	20	18	12	20	28	19
1924	17	30	23	24	13	21	15	9	15	16	22	7	18
1925	26	16	30	17	9	35	14	22	18	35	30	26	24
1926	10	7	36	20	15	15	23	23	19	27	10	32	20
1927	11	22	13	27	28	16	15	14	11	32	17	16	18
1928	11	19	12	11	25	25	22	21	21	19	17	18	18
1929	32	13	41	28	17	23	27	13	22	18	8	12	21
1930	7	26	26	9	16	13	19	19	21	17	30	9	17
1931	21	7	36	19	11	27	9	22	40	34	5	46	23
Zehnjahresmittel	18	17	26	19	17	23	18	18	21	25	20	22	20
Fünfjahresmittel													
1922—26	20	16	27	19	15	26	18	18	19	25	24	23	
1927—31	16	17	26	19	19	20	18	18	23	24	15	20	

Mit $2,775 \cdot 10^{10}$ multipliziert geben die Zahlen die Summe der Komponenten der Druckkräfte gegen Osten in dyn, mit $2,23 \cdot 10^{-6}$ multipliziert die Komponente des mittleren Druckgradienten gegen Osten in dyn cm^{-3} , mit $2,21 \cdot 10^{14}$

multipliziert die Komponente der Bewegungsgröße des Geostrophwindes gegen Süden in $g \text{ cm sec}^{-1}$ und mit $1,8 \cdot 10^{-2}$ multipliziert die Bewegungsgröße gegen Süden pro Volumeneinheit in $g \text{ cm sec}^{-1} \text{ cm}^{-3}$. Höhe der betrachteten Schicht gleich 1 cm.

Tab. 4.
Länge der Isobarenkomponente E gegen Osten
(geostrophischer Westwind). Feld 1.

Jahr	J.	F.	M.	A.	M.	J.	J.	A.	S.	O.	N.	D.	Mittel
1922	29	42	33	18	42	26	24	24	25	24	49	39	31
1923	61	24	17	14	31	38	31	28	44	43	46	37	34
1924	37	41	32	27	27	25	23	21	46	33	42	69	35
1925	73	48	33	27	16	22	17	23	30	41	33	40	34
1926	27	36	49	22	12	17	19	25	34	27	41	45	29
1927	45	35	29	44	22	31	8	24	25	11	35	24	28
1928	54	52	27	19	13	35	50	20	29	32	35	36	34
1929	27	27	36	27	22	30	29	39	35	43	38	51	34
1930	61	38	44	13	15	26	13	21	16	35	45	32	30
1931	28	38	26	16	21	41	23	19	26	57	29	53	31
Zehnjahresmittel	44	38	33	23	22	29	24	24	31	35	39	43	32
Fünfjahresmittel													
1922—26	45	38	33	22	25	25	23	24	36	34	42	46	
1927—31	43	38	32	24	19	33	25	25	26	35	36	39	

Mit $2,775 \cdot 10^{10}$ multipliziert geben die Zahlen die Summe der Komponenten der Druckkräfte gegen Norden in dyn, mit $2,23 \cdot 10^{-6}$ multipliziert die Komponente des mittleren Druckgradienten gegen Norden in dyn cm^{-3} , mit $2,21 \cdot 10^{14}$ multipliziert die Komponente der Bewegungsgröße des Geostrophwindes gegen Osten in $g \text{ cm sec}^{-1}$ und mit $1,8 \cdot 10^{-2}$ multipliziert die Bewegungsgröße gegen Osten pro Volumeneinheit in $g \text{ cm sec}^{-1} \text{ cm}^{-3}$. Höhe der betrachteten Schicht gleich 1 cm.

Tab. 5.
Länge der Isobarenkomponente W gegen Westen
(geostrophischer Ostwind). Feld 1.

Jahr	J.	F.	M.	A.	M.	J.	J.	A.	S.	O.	N.	D.	Mittel
1922	32	22	21	23	6	11	19	12	20	14	7	13	17
1923	56	32	23	28	9	8	7	12	8	9	21	20	19
1924	27	22	24	21	12	19	10	12	11	10	10	7	15
1925	4	22	21	13	20	18	18	14	12	11	21	20	16
1926	24	29	11	22	26	25	18	9	15	20	15	17	19
1927	15	14	21	9	20	14	18	16	14	14	24	28	17
1928	12	13	20	25	26	12	4	16	12	13	24	20	16
1929	26	34	6	24	19	14	13	8	7	14	10	11	16
1930	6	25	15	36	17	13	21	17	24	13	11	20	18
1931	24	20	28	23	22	9	14	16	16	8	16	13	17
Zehnjahresmittel	23	23	19	22	18	14	14	13	14	13	16	17	17
Fünfjahresmittel													
1922—26	29	25	20	21	15	16	14	12	13	13	15	15	
1927—31	17	21	18	23	21	12	14	14	15	12	17	18	

Mit $2,775 \cdot 10^{10}$ multipliziert geben die Zahlen die Summe der Komponenten der Druckkräfte gegen Süden in dyn, mit $2,23 \cdot 10^{-6}$ multipliziert die Komponente des mittleren Druckgradienten gegen Süden in dyn cm^{-3} , mit $2,21 \cdot 10^{14}$ multipliziert die Komponente der Bewegungsgröße des Geostrophwindes gegen Westen in g cm sec^{-1} und mit $1,8 \cdot 10^{-2}$ multipliziert die Bewegungsgröße gegen Westen pro Volumeneinheit in $\text{g cm sec}^{-1} \text{cm}^{-3}$. Höhe der betrachteten Schicht gleich 1 cm.

Tab. 1 bis 5 geben Monats-, Jahres- und Zehnjahreswerte von L und seinen Komponenten gegen Norden, Süden, Osten und Westen. Die Einheit ist ein halber Breitengrad ($55,5 \cdot 10^5 \text{ cm}$), $\Delta p = 5 \text{ mb} = 5000 \text{ dyn cm}^{-2}$. Das Areal A von Feld 1 ist $1,2316 \cdot 10^{16} \text{ cm}^2$, wenn wir die Erde als eine Kugel vom Radius 6370 km betrachten. Weiter setzen wir $\lambda = 1,26 \cdot 10^{-4} \text{ sec}^{-1}$. Nach den Gleichungen 1 a), 1 b), 3 a) und 3 b) repräsentiert jede Einheit in den Tabellen:

$$\begin{aligned} \text{Eine Kraft von } \Delta p L &= 5000 \cdot 55,5 \cdot 10^5 \\ &= 2,775 \cdot 10^{10} \text{ dyn} \end{aligned} \quad 4)$$

$$\begin{aligned} \text{Einen Gradienten von } \frac{\Delta p L}{A} &= \frac{5000 \cdot 55,5 \cdot 10^5}{10^{16}} \\ &= 2,23 \cdot 10^{-6} \text{ dyn cm}^{-3} \end{aligned} \quad 5)$$

$$\begin{aligned} \text{Eine geostrophische Bewegungsgröße von} \\ \frac{\Delta p}{\lambda} L &= \frac{5000 \cdot 55,5 \cdot 10^5}{1,26 \cdot 10^{-4}} = 2,21 \cdot 10^{14} \text{ g cm sec}^{-1} \end{aligned} \quad 6)$$

Eine durchschnittliche Bewegungsgröße pro

$$\begin{aligned} \text{Volumeneinheit von } \frac{\Delta p}{\lambda} \cdot \frac{L}{A} \\ &= 1,8 \cdot 10^{-2} \text{ g cm sec}^{-1} \text{ sec}^{-3} \end{aligned} \quad 7)$$

Hinsichtlich der Dimensionen muss man erinnern, dass h gleich 1 gesetzt ist, so dass man sich L und A mit h multipliziert denken muss.

Wir betrachten zunächst

a) Die Zehnjahresmittel.

Das Mittel von L ist 80. Multipliziert mit den Konstanten der Gleichungen 4) bis 7) finden wir

Die gesamten horizontalen, durchschnittlichen Druckkräfte = $2,2 \cdot 10^{12} \text{ dyn}$.

Den durchschnittlichen Gradienten = $1,80 \cdot 10^{-4} \text{ dyn cm}^{-3}$.

Die gesamte durchschnittliche Bewegungsgröße = $1,76 \cdot 10^{16} \text{ g cm sec}^{-1}$.

Die durchschnittliche Bewegungsgröße pro $\text{cm}^3 = 1,43 \text{ g cm sec}^{-1} \text{ cm}^{-3}$.

Ähnliche Ausdrücke lassen sich auch leicht für den Komponenten herleiten.

Nach Gl. 1 c) berechnen wir den mittleren Abstand zwischen zwei Nachbarisobaren zu

$$\Delta s_m = \frac{A}{L} = \frac{1,2316 \cdot 10^{16}}{80 \cdot 55,5 \cdot 10^5} = 2,77 \cdot 10^7 \text{ cm} \quad 8)$$

Wählen wir $\alpha = 850 \text{ cm}^3 \text{ g}^{-1}$, finden wir den durchschnittlichen Geostrophwind des Dezenniums nach Gl. 2 b) zu

$$v_m = \frac{\alpha G}{\lambda} = \frac{850 \cdot 1,80 \cdot 10^{-4}}{1,26 \cdot 10^{-4}} = 1,22 \cdot 10^3 \text{ cm sec}^{-1} \quad 9)$$

Die N-, S-, E- und W-Komponenten zeigen (Tab. 2—5) bzw. die Längen 30, 20, 32 und 17 Einheiten. Infolgedessen wird im Durchschnitt beinahe doppelt so viel Masse von Westen nach Osten als umgekehrt transportiert und 50 % mehr Masse gegen Norden als gegen Süden. Abb. 2 gibt das Achsenkreuz der Isobarenkomponenten nebst ihrer Resultante.

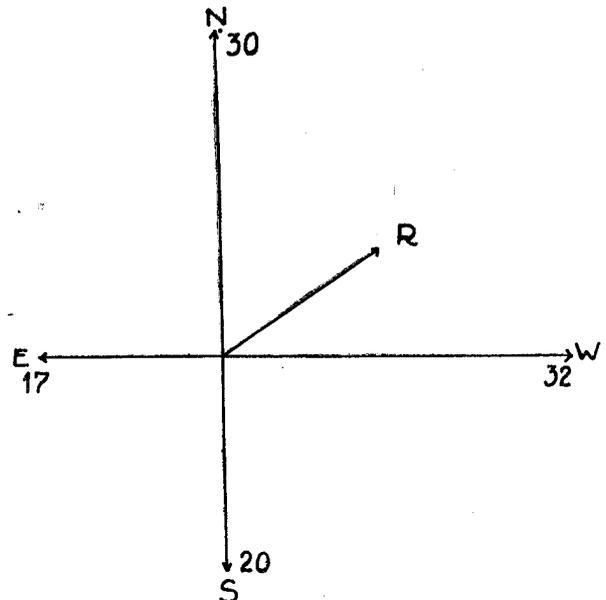


Abb. 2. Durchschnittliche, geostrophische Bewegungsgröße über Feld 1 im Jahrzehnt 1922—31 nach Tab. 2—5.

Der zufällige Fehler des Zehnjahresmittels der Morgenkarten dürfte nur wenige Promille vom L -Wert ausmachen. Selbst wenn wir mit systematischen Fehlern wegen Änderungen der Kartenblanketten u. dergl. rechnen, dürfte die Unsicherheit kaum mehr als 1 % des Zehnjahresmittels ausmachen.

b) Die Jahresmittel.

Aus Tab. 1—5 können wir die Schwankungen von *L* und seinen Komponenten von einem Jahr zum anderen beurteilen. Um aber einen besseren Überblick zu bekommen betrachten wir Abb. 3, wo die Werte von *L* und seinen Komponenten in Prozenten der Dezennienmittel eingetragen sind. Die Schwankungen von *L* sind unbedeutend, die Schwankungen der Komponenten dagegen

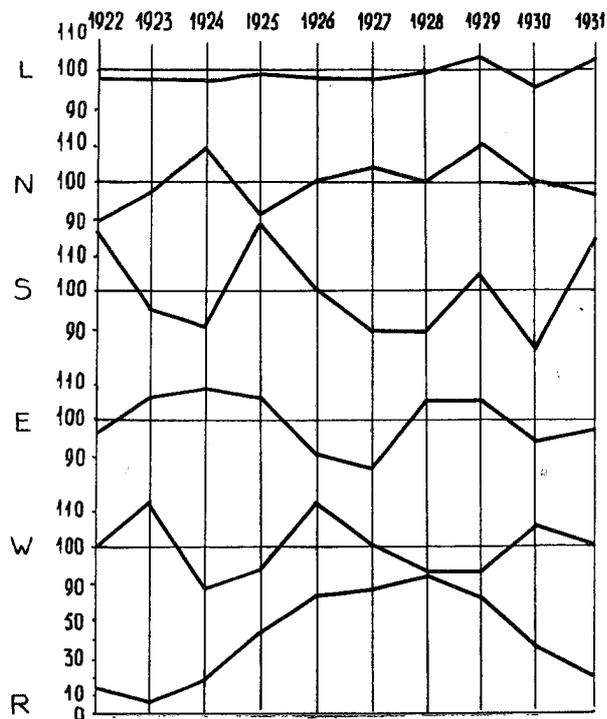


Abb. 3. Jahresmittel von *L* und seinen Komponenten in Prozenten der Dezennienmittel (Feld 1). *R* Sonnenfleckrelativzahlen (provisorische).

ziemlich gross. *Säkulare* Schwankungen der betrachteten Grössen sind natürlich nicht ausgeschlossen, lässt sich aber mittels zehn Jahreswerte nicht beurteilen. Es ist anzunehmen, dass *L*, über der ganzen Erde ausgemessen, prozentisch nur unbedeutende Schwankungen in den Jahresmitteln aufweisen kann.

Die Kurve der Sonnenfleckrelativzahlen zeigt keine Ähnlichkeit mit den übrigen Kurven.

c) Die Monatsmittel.

Aus Tab. 1—5 geht hervor, dass die einzelnen Monatswerte unregelmässige Schwankungen von einem Jahr zum anderen aufweisen. Die Schwankungen von *L* sind ziemlich klein, die Schwankungen der Komponenten dagegen viel grösser. Eine graphische Darstellung der Monatsmittelwerte im Januar wird als Beispiel für die Monatschwankungen in Abb. 4 gegeben.

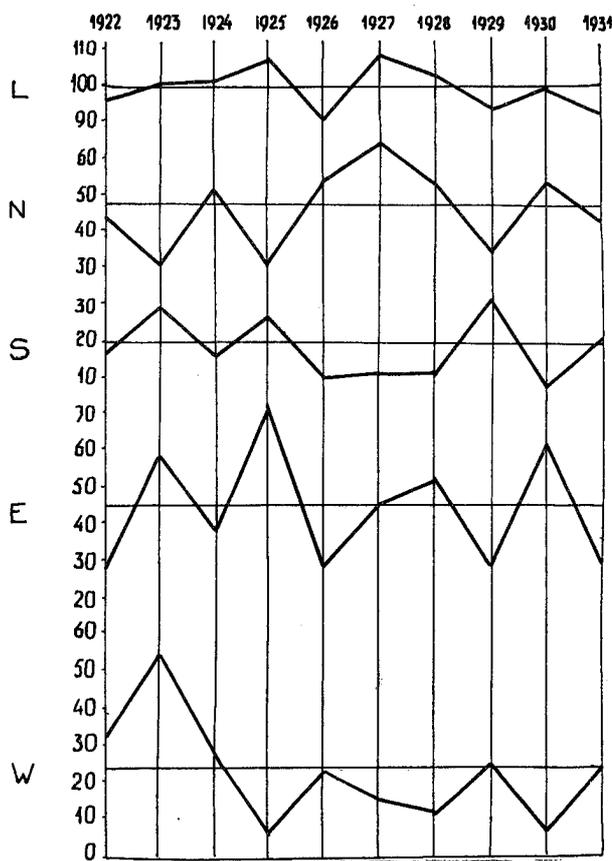


Abb. 4. Monatsmittelwerte (Januar) von *L* und seinen Komponenten im Jahrzehnt 1922—31 für Feld 1 nach Tab. 1—5.

Der durchschnittliche jährliche Gang von *L* und seinen Komponenten geht aus den Tabellen 1—5 und Abb. 5 hervor. In der Abbildung sind auch Kreuze für die Lustrenmittel 1922—26 und Punkte für die Lustrenmittel 1927—31 eingetragen. Wo keine solche Punkte eingetragen sind, fallen die Lustrenmittel mit der Zehnjahreskurve zusammen. Schon 5 Jahre genügt um den jährlichen Gang in den Hauptzügen darzustellen, doch zeigt die Zehnjahreskurve meistens einen glätteren Verlauf. — Bei *L* ist der Jahresgang besonders ausgesprochen. Die April- bis Septemberwerte liegen unterhalb, die der übrigen Monatswerte oberhalb des Mittelwertes. Der Januarwert verhält sich zum Juliwert wie 100 : 60. In dem untersuchten Zeitraum ist der Juniwert unbedeutend höher als der Maiwert.

Betreffs der Komponente gegen Norden (Südwind) finden wir auch hier einen deutlich ausgeprägten jährlichen Gang. Das Minimum fällt in den Juni, und die Kurve steigt ziemlich regelmässig von diesem Monat an bis Januar. Auffallend ist der kleine Wert im März.

Die Komponente gegen Süden (Nordwind)

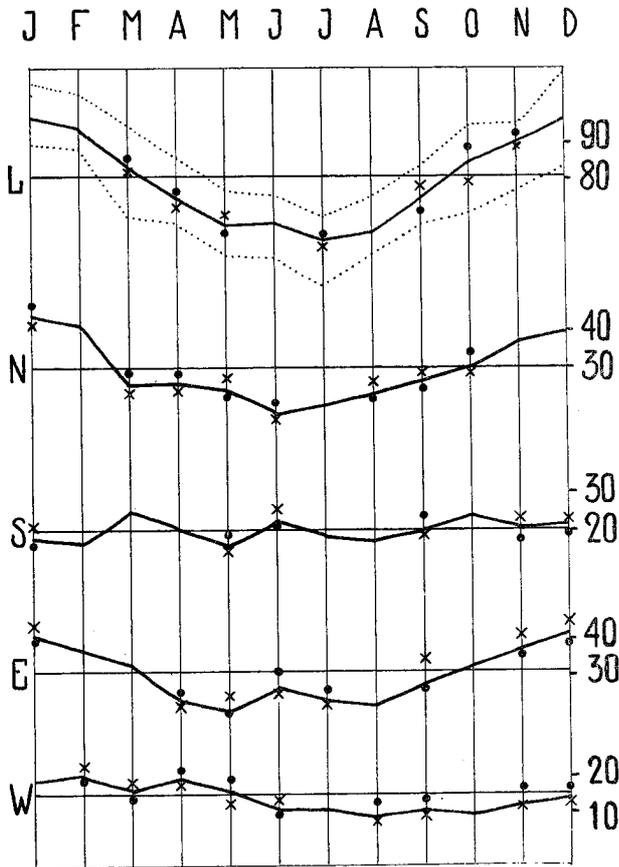


Abb. 5. Durchschnittlicher, jährlicher Gang im Jahrzehnt 1922—31 von *L* und seinen Komponenten (Feld 1). Die Kreuze sind Lustrenmittel 1922—26, die Punkte Lustrenmittel 1927—31. Für *L* sind auch die extremsten Monatswerte eingetragen.

zeigt mehrere kleine Maxima und Minima statt eines einfachen jährlichen Ganges. Die Maxima im März und Oktober treten mit demselben Wert in den beiden Lustrenmitteln auf und sind wohl deshalb als reell zu betrachten. Das Junimaximum ist weniger ausgesprochen.

Wenden wir uns zur Komponente gegen Osten (Westwind), finden wir wieder einen deutlichen jährlichen Gang mit einem kleinen sekundären Maximum im Juni, das jedoch im Lustrenmittel 1922—26 wenig ausgesprochen ist.

Die Komponente gegen Westen (Ostwind) zeigt eine Kurve mit einem ziemlich flachen jährlichen Gang. Die Monatswerte von Juni bis November liegen unterhalb, die übrigen oberhalb des Mittels. Minimum im August, maximum im Januar—Februar. Im März Andeutung eines kleinen sekundären Minimums.

In Abb. 6 finden wir die mittleren Komponenten für jeden Monat nebst ihren Resultanten in ein Achsenkreuz eingetragen. Im Januar und im Februar kommt der hauptsächlichste Massentransport — wie die Resultante zeigt — etwa von SW_tS, im März genau von W, im April von S_tW usw. Juni ist der einzige Monat, wo die Resultante eine Komponente gegen Süden hat.

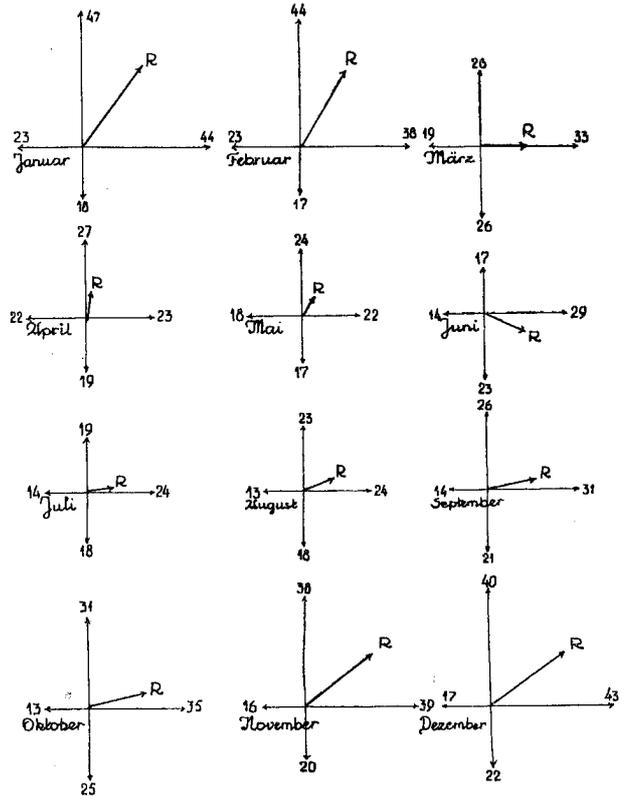


Abb. 6. Durchschnittliche, monatliche geostrophische Bewegungsgrößen über Feld 1 im Jahrzehnt 1922—31.

Richtung und Stärke der Resultante lassen sich auch an Hand von Mitteldruckkarten beurteilen; über die Grösse der oben bestimmten N-, S-, E- und W-Komponenten sagen uns aber die Mitteldruckkarten nichts.

Mittels der unter Gl. 4) bis 7) gegebenen Zahlen und der Tabellen 1—5 lässt sich die geostrophische Bewegungsgrösse, die mittlere Grösse des Gradienten usw. in absolutem Mass für jeden Monat leicht berechnen. Für weitere Einzelheiten wird auf die Tabellen und Abbildungen hingewiesen. Es sei hier noch nur erwähnt, dass man in der Abb. 5 auch die maximalen und

minimalen Monatswerte von L für den untersuchten Zeitraum findet. Wie zu erwarten ist haben auch diese Werte einen jährlichen Gang, der mit dem mittleren jährlichen Gang von L in guter Übereinstimmung ist. Der höchste Monatswert fällt allerdings in den Dezember statt in den Januar, was aber wahrscheinlich der Unzulänglichkeit des Zahlenmaterials zuzuschreiben ist. Die Differenz zwischen dem Höchst- und Tiefstwert für jeden Monat hält sich annähernd konstant während des Jahres. — Der jährliche Gang von L ist so ausgeprägt, dass der minimalste Januarwert immer noch höher ist als sämtliche Maximalwerte des Sommerhalbjahres (April—September).

d) *Extreme Tageswerte.*

Es mag von einigem Interesse sein die extremsten Werte von L zu untersuchen. In Abb. 7

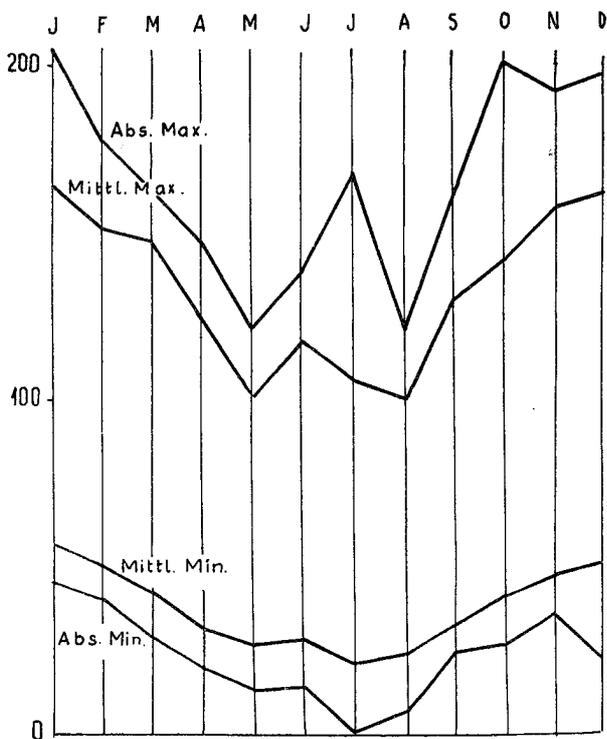


Abb. 7. Tageswerte von L , Feld 1: Absolute Maxima, mittlere Maxima, mittlere Minima und absolute Minima im Jahrzehnt 1922—31.

gibt die oberste Kurve die absoluten Maxima der Tageswerte für jeden Monat. Der grösste Wert des untersuchten Dezenniums wurde am 2. Januar 1925 mit 208 Einheiten (a 55,5 km) beobachtet. Die nächste Kurve gibt die mittleren

Maxima desselben Zeitraumes. Weiter unten finden wir mittlere und absolute Minima. Im Juli ist sogar der Wert Null des absoluten Minimums eingetroffen, was natürlich nur daher kommt, dass man nicht das Druckfeld nur durch alle 5 mb genau darstellen kann. Wie zu erwarten ist dominiert der jährliche Gang. Die Kurven der mittleren Maxima und Minima sind schon ziemlich regelmässig trotzdem, dass das Material nur zehn Jahre umfasst.

Eine Ähnliche Untersuchung auch von den Komponenten von L hat für die Minimalwerte keinen Zweck, denn im allgemeinen wird der Wert Null für jeden Monat mehrmals eintreffen. Z.B. haben die absoluten Minima für die Komponente gegen Süden (Nordwind) in 108 von den untersuchten 120 Monaten den Wert Null gehabt, und in den übrigen 12 Fällen traten nur äusserst geringe Werte auf. Für die *Maximalwerte* der Komponenten müssen wir dagegen einen deutlichen jährlichen Gang erwarten, falls der untersuchte Zeitraum hinreichend gross ist. Zehn Jahre bilden allerdings ein spärliches Material. Abb. 8

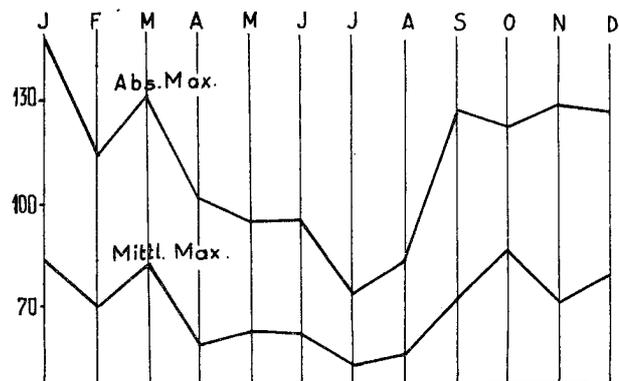


Abb. 8. Absolute und mittlere Maxima der Tageswerte der S-Komponente über Feld 1 im Jahrzehnt 1922—31.

gibt als Beispiel die absoluten und mittleren Maxima der Tageswerte für die Komponente gegen Süden. Wir finden das Minimum im Sommer trotzdem die Monatsmittel des ganzen Dezenniums (Abb. 5, S) keinen jährlichen Gang aufweist. Wir müssen deshalb annehmen, dass im Sommer die Fälle mit Nordwind weniger kräftig, aber häufiger wie im Winter vorkommen, ein Schluss, der durch die im nächsten Abschnitt erwähnten Häufigkeitsuntersuchungen bestätigt wird.

- e) *Häufigkeitsuntersuchungen über die Richtung der Resultante R der Bewegungsgrösse des Geostrophwindes von Feld 1.*

Die Bestimmung von R geschieht leicht, weil wir schon für jede Karte die «Isobarenkomponenten» bestimmt haben.

Die folgenden Häufigkeitsuntersuchungen umfassen nur Richtung und nicht Grösse von R und zwar nach den acht Hauptrichtungen N, NE, E, usw. Wie oben erwähnt sind die Komponenten des West- und Südwindes im Durchschnitt für das ganze Dezennium grösser als die des Ost- und Nordwindes. Das mag daher kommen, dass die West- und Südwinde die kräftigsten aber nicht die häufigsten sind. Die oben gemachten Untersuchungen über die Grösse der Komponenten erhalten deshalb durch Häufigkeitsuntersuchungen eine Ergänzung.

In extremen Fällen können alle Isobaren geschlossen sein, und die Resultante wird dann gleich Null. Solche Fälle müssen wir aus der Statistik ausscheiden lassen. Ausserdem sind aber auch alle Fälle mit $R \geq 10$ Einheiten (a 55,5 km) ausgelassen worden. Hierdurch fallen 155 von den 3652 Morgenkarten weg. Trotz dieser «Reinigung» des Materials schien es doch wünschenswert zwischen solchen Fällen zu unterscheiden, wo eine deutlich bevorzugte Hauptströmung vorkam und solchen, wo die Hauptströmung wenig klar hervortrat. In dieser Hinsicht wurde das Verhältnis $\frac{R}{L}$ als ein relatives Mass für die *Geradlinigkeit der Isobaren* (Stromröhren) schon früher eingeführt¹⁾ und zwar in Prozenten ausgedrückt. Sind alle Isobaren parallel und geradlinig wird $\frac{R}{L} = 100\%$, sind alle Isobaren geschlossen wird $\frac{R}{L} = 0$. Beim Fall $\frac{R}{L} = 0$ brauchen übrigens die Isobaren innerhalb des Feldes nicht geschlossen zu sein, falls nur die Komponenten einander aufheben. Falls alle Isobaren Halbkreise wären, würde $\frac{R}{L}$ gleich $\frac{2}{\pi}$ oder etwa 64% sein.

Nach Feststellung des Verhältnisses $\frac{R}{L}$ können wir die Karten in beliebige Klassen je nach

der Geradlinigkeit der Isobaren einteilen. Hier wurden drei Klassen verwendet: $\frac{R}{L} = 0-50\%$, $\frac{R}{L} = 51-75\%$ und $\frac{R}{L} = 76-100\%$. Als Bei-

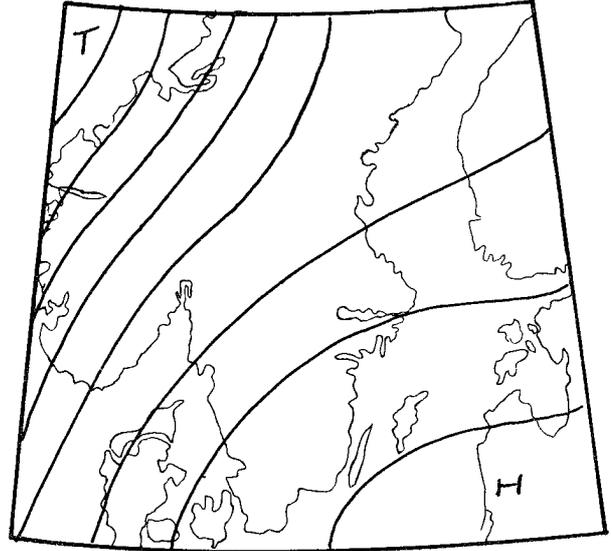


Abb. 9 a. Isobaren über Feld 1 am 2/1-28, 8 Uhr. Geradlinigkeit der Isobaren 89%. Resultante der Strömung aus SW.

spiele betrachten wir die Abbildungen 9 a—c. Bei der ersten Karte wurde $\frac{R}{L} = 89\%$ gefunden; die Isobaren sind ziemlich geradlinig und repräsentieren einen deutlichen SW-Strom. Bei der zweiten

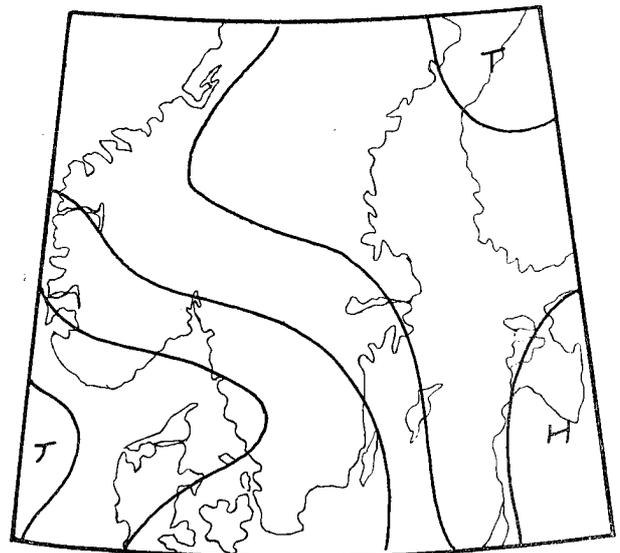


Abb. 9 b. Isobaren über Feld 1 am 11/2-28, 8 Uhr. Geradlinigkeit der Isobaren 67%. Resultante der Strömung aus S.

¹⁾ Sigurd Evjen: Über statistische Untersuchungen von «Zyklonentätigkeit» mittels Isobarenkarten. M. Z., 1932, Heft 5.

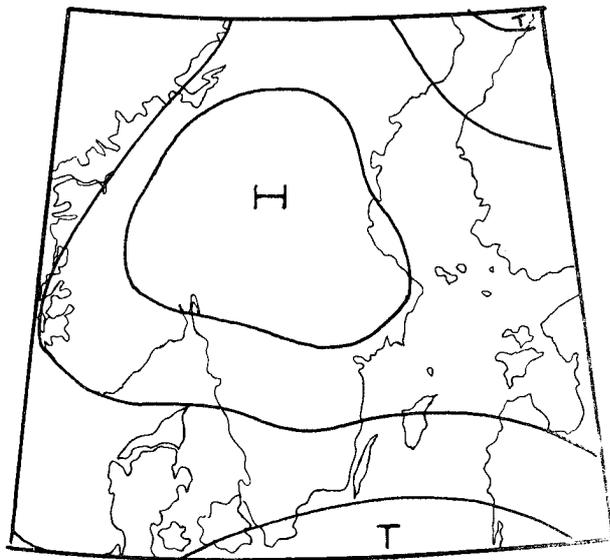


Abb. 9 c. Isobaren über Feld 1 am 18/1-28, 8 Uhr. Geradlinigkeit der Isobaren 25 %. Resultante der Strömung aus SE.

Karte war $\frac{R}{L} = 67\%$; die Resultante R der Bewegungsgröße verläuft gegen Norden, weil die E- und W-Komponenten einander (annähernd) aufheben. Bei der dritten Karte war $\frac{R}{L} = 25\%$, und die Resultante verläuft gegen NW. Hier können wir aber nicht mehr durch bloße Betrachtung der Karte eine bevorzugte Stromrichtung bestimmen.

Wir gehen jetzt zum Resultat der Statistik über. In Abb. 10, Kurve a, finden wir wie sich die Isobarenresultanten der Morgenkarten des ganzen Dezenniums (3497 Fälle) auf die verschiedenen Richtungen verteilen. Hier bedeutet N Nordwind, S Südwind usw. Eine Klasseneinteilung je nach der Geradlinigkeit der Stromröhren ist hier nicht vorgenommen; die Kurve umfasst m. a. W. sämtliche Fälle (ausser den 155 weggelassenen). Wir finden ein Minimum für NE—E und ein Maximum für SW. Die SW-winde sind also nicht nur die stärksten, sondern auch die häufigsten.

Bei der Kurve b sind nur die Fälle mitgenommen, wo $\frac{R}{L} = 0-50\%$. Wir finden, dass diese Kurve beinahe geradlinig verläuft. Es sind deshalb nur die deutlich hervortretenden Strömungen, die eine ausgeprägte Verteilung zeigen. Zur besseren Illustrierung dieses Verhältnisses

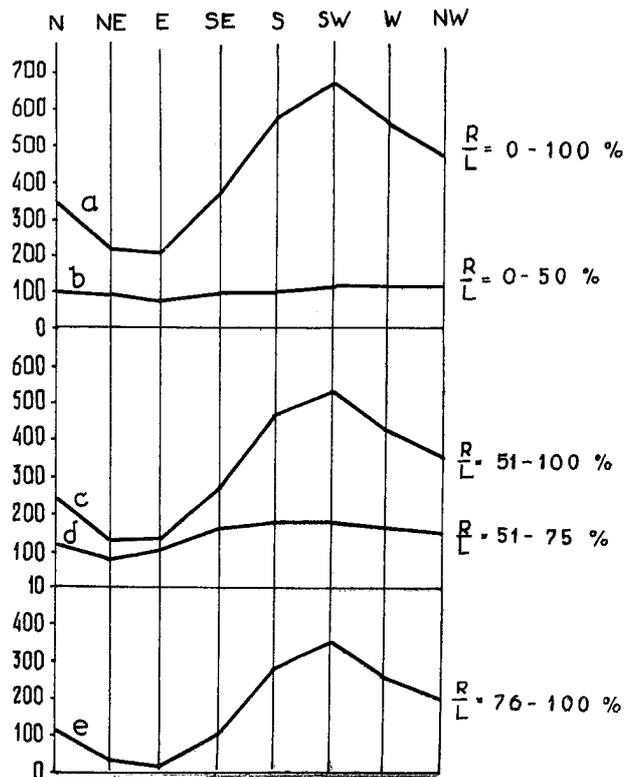


Abb. 10. Häufigkeit der Richtungen der Resultante der geostrophischen Bewegungsgröße über Feld 1 im Jahrzehnt 1922—31. N bezeichnet Wind aus Norden, NE aus Nordosten usw. Weitere Erläuterungen im Text.

dienen die Kurven c—e. Kurve c umfasst Fälle mit $\frac{R}{L} = 51-100\%$, also die Differenz zwischen Kurve a und Kurve b, Kurve d Fälle zwischen 51 und 75% und Kurve e Fälle über 75%.

In Abb. 11 entsprechen die Kurven a und b den ähnlich benannten Kurven in Abb. 10, nur sind beide Lustrenmittel für 1922—26 und

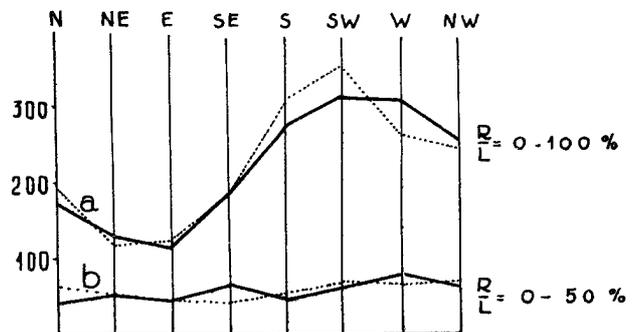


Abb. 11. Häufigkeit der Richtungen der Resultante der geostrophischen Bewegungsgröße über Feld 1 in den Jahren 1922—26 (ausgezogene Kurve) und 1927—31 (punktierter Kurve). N Wind aus Norden usw.

1927—31 statt des Dezennienmittels eingetragen. Die Ähnlichkeit der beiden Lustrenmittel deutet darauf hin, dass die Kurven in Abb. 10 ziemlich konstant sind, so dass eine Änderung der Hauptzüge durch Anwendung von längeren Jahresreihen nicht zu befürchten ist.

Wir können auch die Verteilung der Resultanten nach den 8 Hauptrichtungen für jeden Monat untersuchen. Dasselbe Material, dass in Abb. 10 für eine einzige Kurve verwendet ist, muss dann auf 12 verschiedene Kurven verteilt werden. Hierdurch wird aber das Material für jeden Monat so spärlich, dass grosse Änderungen in den Kurven durch Hinzufügung von längeren Jahresreihen zu befürchten sind. In der Tat zeigten Versuche mit Fünfjahresmitteln so grosse Verschiedenheiten zwischen den beiden Lustren, dass die folgenden Kurven über Monatsmittel nicht als «konstant» anzusehen sind. Sie geben jedoch die Verteilung im untersuchten Dezennium wieder und sind deshalb hier mitgenommen, aber nur für Fälle mit $\frac{R}{L} = 51-100\%$. Abb. 12

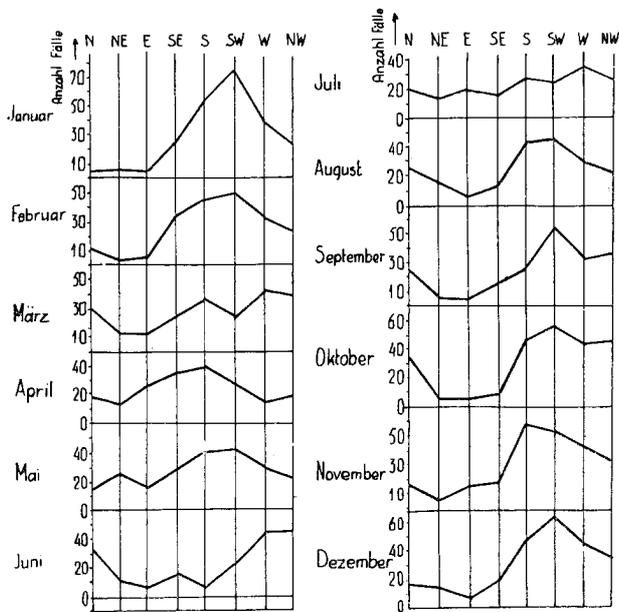


Abb. 12. Häufigkeit der Richtungen der Resultante der geostrophischen Bewegungsgröße für jeden Monat im Jahrzehnt 1922—31. R/L ist überall 51—100 %.

zeigt die Verteilung auf die 8 Hauptrichtungen innerhalb jedes Monats. Januar hat ein ausgeprägtes Maximum von SW-Wind, März von W-Wind, April von S-Wind, usw. Die Juni- und Juli-Kurven zeigen am wenigsten Ähnlichkeit mit

der entsprechenden Kurve c in Abb. 10 für das ganze Dezennium, aber sonst dominieren die S- bis W-Winde in den meisten Kurven.

Abb. 13 gibt dasselbe Material wie Abb. 12, nur anders geordnet. Wir sehen z.B., dass der Nordwind im März, Juni und Oktober häufiger vorkommt als in den anderen Monaten. NE kommt sehr häufig im Mai vor, E im April, SE

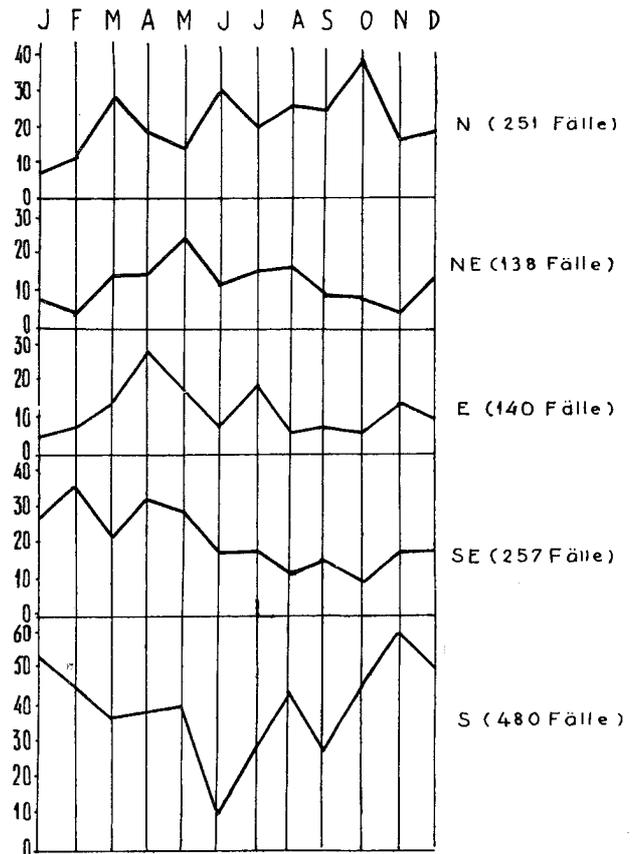


Abb. 13.

im Februar und April, S hat ein ausgeprägtes Minimum im Juni, SW Minima im März und Juli usw. Für weitere Einzelheiten wird auf die Kurven hingewiesen.

Untersuchungen, wie die hier vorgenommenen, können für die praktische Wettervorhersage von einigem Nutzen sein. Man muss nämlich damit vorsichtig sein Wetterentwicklungen zu erwarten, die nur selten vorkommen. Nach Abb. 13 kommt z.B. ein südlicher Luftstrom über Feld 1 sechs mal so häufig vor im November wie im Juni. Die Vorhersage eines südlichen Luftstroms über Feld 1 wird deshalb leichter im November als im Juni gelingen.

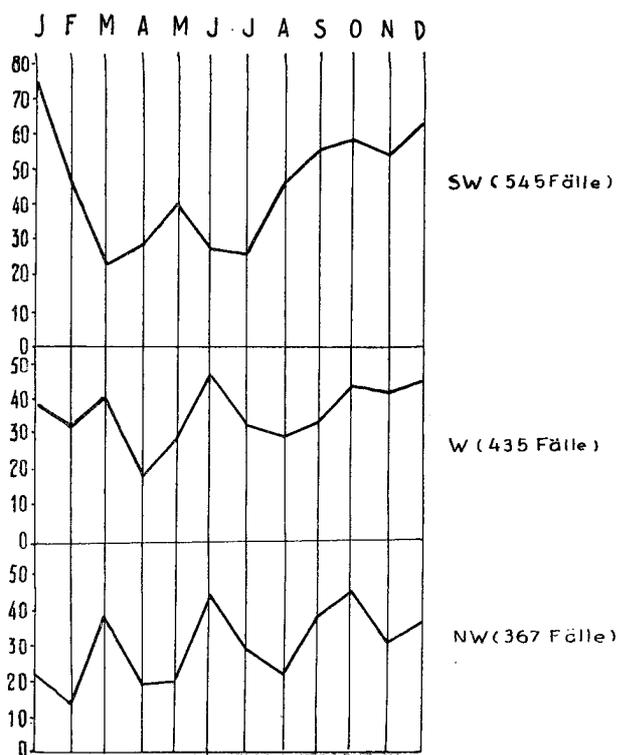


Abb. 13. (fortgesetzt). Häufigkeit der Richtungen der Resultante der geostrophischen Bewegungsgröße für jeden Monat im Jahrzehnt 1922—31 nach den 8 Hauptrichtungen geordnet. R/L ist überall 51—100 %.

4. Ausmessungen von Feld A und Feld B.

Für andere Gebiete als Feld 1 müssen wir etwas andere Mittelzahlen für L und seine Komponenten erwarten. Besonders muss dies für die Komponenten gelten, denn diese sind mit den Richtungen der grossen Windsystemen der Erde eng verbunden. Die gesamte Bewegungsgröße — ohne Richtungsangabe — ändert sich dagegen wahrscheinlich viel weniger von Feld zu Feld, wenigstens innerhalb des Westwingürtels. Um etwas mehr als Vermutungen anführen zu können, wurde eine Stichprobe mit den Feldern A und B (Abb. 1) vorgenommen. Die Ausmessung umfasste sowohl L als seine Komponenten für das Jahr 1935. Monats- und Jahreswerte in halben Breitengraden sind in Tab. 6 eingetragen. Wir finden unregelmässige Schwankungen von Monat zu Monat; der jährliche Gang macht sich wenigstens zum Teil bemerkbar, aber wir sehen auch, dass ein Jahr nicht genügt um den jährlichen Gang festzustellen. Am deutlichsten finden wir den jährlichen Gang bei L wieder mit einem

Tab. 6.

Monats- und Jahreswerte von L und seinen Komponenten für Feld A und Feld B im Jahre 1935. Einheit in halben Breitengraden (55,5 km).

Feld	J.	F.	M.	A.	M.	J.	J.	A.	S.	O.	N.	D.	Jahr
N A ...	72	89	79	66	29	63	49	55	75	90	150	105	77
S » ...	75	60	54	61	60	38	64	42	54	47	9	40	50
E » ...	125	128	82	39	61	56	82	59	73	126	77	64	81
W » ...	28	35	41	62	43	41	19	27	44	34	48	60	41
N B ...	34	54	47	53	33	56	13	27	51	48	117	83	51
S » ...	67	62	40	50	46	26	56	39	33	42	16	34	43
E » ...	75	167	63	90	28	66	67	45	113	119	87	101	85
W » ...	58	34	64	31	65	28	28	30	16	23	34	43	38
L A ...	243	250	231	179	138	157	169	149	198	245	235	212	198
» B ...	177	242	166	171	135	136	124	108	166	179	198	204	167

Maximum im Winter, einem Minimum im Sommer. Das Maximum fällt im Jahre 1935 allerdings in den Februar; in diesem Monat war der Westwind ausserordentlich stark entwickelt. — Bezüglich weiterer Einzelheiten wird auf die Tabelle verwiesen.

Feld 1 macht genau 40 % vom Feld A aus, und dasselbe gilt sehr annähernd in Bezug auf Feld B. Wollen wir die Zahlen in Tab. 6 mit den entsprechenden in Tab. 1—5 vergleichen, müssen wir deshalb Tab. 6 mit 0,40 multiplizieren. In der nachstehenden Tabelle finden wir die Dezennienwerte von L und seinen Komponenten für Feld 1 nach Tab. 1—5 und die ent-

Tabelle.

	L	N	S	E	W
Feld 1. Dezennienwerte von L und seinen Komponenten nach Tab. 1—5.	80	30	20	32	17
Feld A. Jahreswerte von L und seinen Komponenten mit 0,40 multipliziert	79	31	20	32	16
Feld B. Jahreswerte von L seinen Komponenten mit 0,40 multipliziert	69	20	17	34	15
Feld B. Die Werte von Feld B vergrößert im Verhältnis $\frac{\sin 60^\circ}{\sin 50^\circ}$	78	23	19	38	17

sprechenden Jahreswerte für Feld A und Feld B nach Tab. 6, aber mit 0,40 multipliziert. Wir sehen, dass Feld 1 und Feld A einander beinahe vollständig folgen. Bei Feld B sind sowohl L als

seine N- und S-Komponente kleiner als für die zwei anderen Felder, dagegen hat die E- und W-Komponente ungefähr denselben Wert wie für Feld 1 und Feld A. Die Zahlen in den drei ersten Zeilen der Tabelle repräsentieren Druckkräfte (und Druckkomponenten) in relativem Mass. Wir bekommen die Druckkräfte in absolutem Mass, wenn wir die Zahlen mit der Konstante in Gl. 4) multiplizieren ($h = 1$), nur sei nochmals daran erinnert, dass der Gradient senkrecht auf den Isobaren steht, so dass z.B. die N-Komponente mit einem nach Westen zeigenden Gradienten verbunden ist. Die Zahlen der ersten Zeile repräsentieren auch Bewegungsgrösse, wenn wir sie mit der Konstante in Gl. 6) multiplizieren. Dieselbe Konstante lässt sich auch für die Zahlen des A-Feldes in der zweiten Zeile verwenden, weil λ für Feld 1 und Feld A denselben Wert hat. Für Feld B muss die Konstante der Gl. 6) im Verhältnis $\frac{\sin 60^\circ}{\sin 50^\circ} = 1,13$ vergrössert werden. In der Tabelle sind die Zahlen der dritten Zeile mit 1,13 multipliziert worden und in die vierte Zeile eingetragen. Dann lassen sich die Zahlen in der ersten, zweiten und vierten Zeile als Relativzahlen für die Bewegungsgrösse vergleichen. Wir sehen, dass die Bewegungsgrösse von allen drei Feldern beinahe denselben Wert hat. Diese Untersuchung deutet darauf hin, dass die Bewegungsgrösse innerhalb des Westwindgürtels nicht alzu grosse Schwankungen von Feld zu Feld unterliegt, wenigstens nicht über den Ozeanen und den angrenzenden Teilen der Kontinente. Wahrscheinlich können wir deshalb die Mittelzahlen der Bewegungsgrösse von Feld 1 annähernd für den ganzen Westwindgürtel verwenden, natürlich mit gehöriger Reduktion auf die fragliche Fläche.

Bei der Ausmessung der L -Werte für Feld B ist nicht berücksichtigt worden, dass wir eine Korrektur für die Kartenprojektion anbringen müssen (Abschnitt A, 2, b), falls wir genau rechnen wollen. Die Isobarenkomponenten dagegen sind direkt in Graden abgelesen und brauchen deshalb keine solche Korrektur.

B. DIE KINETISCHE ENERGIE DES GEOSTROPHWINDES.

Die Windgeschwindigkeit des Geostrophwindes ist bekanntlich durch den Ausdruck $v = \frac{\alpha}{\lambda} \cdot \frac{\Delta p}{\Delta s}$

gegeben. Die kinetische Energie einer Massenpartikel, m , wird deshalb $\frac{1}{2} m v^2 = \frac{1}{2} m \left(\frac{\alpha}{\lambda} \cdot \frac{\Delta p}{\Delta s} \right)^2$.

Wir denken uns die Isobaren so nahe an einander gezogen, dass wir sie über einem kleinen Gebiet als parallel und geradlinig ansehen können. Den Zwischenraum zwischen zwei Nachbarisobaren können wir dann durch Querstriche senkrecht zu den Isobaren in kleine Quadrate einteilen derart, dass die Seitenlänge jedes Quadrates gleich dem Isobarenabstand wird («Isobarische Quadrate»). Mit $h = 1$ wird dann die Masse eines solchen Quadrates gleich $\rho \Delta s^2$, wenn Δs die Seitenlänge ist, und die kinetische Energie wird:

$$K = \frac{1}{2} \rho \Delta s^2 \left(\frac{\alpha}{\lambda} \cdot \frac{\Delta p}{\Delta s} \right)^2 = \frac{1}{2} \frac{\alpha}{\lambda^2} \Delta p^2 \dots 10)$$

Bei dieser Betrachtung haben wir α und λ als konstant gesetzt. Dann wird die kinetische Energie eines isobarischen Quadrates auch konstant trotzdem Δs über dem Felde eine variable Grösse ist. Wir können somit die kinetische Energie über dem ganzen Felde integrieren, indem wir alle Zwischenräume zwischen Nachbarisobaren in isobarische Quadrate einteilen und die Zahl der Quadrate bestimmen. In dieser Weise sind alle Morgenkarten des Jahres 1931 hinsichtlich Feld 1 untersucht worden.

Bei der numerischen Berechnung von K müssen wir Mittelwerte von α und λ einführen. Wir suchen zunächst den Fehler von K abzuschätzen. Es ist einleuchtend, dass wir für das kleine Feld 1 einen *mittleren* Wert von λ benutzen können; der hierdurch entstandene Fehler wird für Monatsmittel ganz bedeutungslos. α hängt von dem Druck und der Temperatur ab. Wir können den Mitteldruck über Feld 1 am Boden gleich 1010 mb setzen. Die durchschnittliche Abweichung des ganzen Feldes vom Mitteldruck wird nur selten 25 mb übersteigen. Deshalb wird der Fehler in α wegen Abweichung vom Mitteldruck nur selten 2,5 % übersteigen. Die mittlere Temperatur in 1000 m Höhe können wir gleich 0°C setzen (Abb. 16). Grössere Abweichungen als 15° im Mittel über dem ganzen Felde können wir ausser Acht lassen. Der Fehler in α wegen Abweichung von der Mitteltemperatur können wir deshalb höchstens zu 5 % setzen. — Endlich entsteht ein Fehler wegen Ungenauigkeit beim Zeichnen der

Quadrate. Dieser Fehler kann abgeschätzt werden, indem wir eine und dieselbe Karte mehrmals kopieren und in Quadrate einteilen. Versuche ergaben Differenzen zwischen den einzelnen Ausmessungen, die 5 % nicht überstiegen. Die genannten Fehler können sich für eine einzelne Karte zufällig addieren, aber grössere Fehler als etwa 12 % einer Einzelkarte dürften nur selten auftreten. Der zufällige Fehler eines Monatsmittels dürfte deshalb kaum 2,5 % übersteigen, und der zufällige Fehler des Jahresmittels dürfte höchstens nur von der Grössenordnung 1 % sein. Es muss doch vorausgesetzt werden, dass eine Ausgleichung aus freier Hand beim Ziehen der Isobaren notwendig und zulässig ist. Es ist bei diesen Betrachtungen ausserdem vorausgesetzt worden, dass die Gleichung $v = \frac{a}{\lambda} \cdot \frac{\Delta p}{\Delta s}$ in aller Strenge gilt.

Ehe wir zur Statistik übergehen, berechnen wir (annähernd) die kinetische Energie eines isobarischen Quadrates. In Gl. 10) setzen wir $a = 900 \text{ cm}^3 \text{ g}^{-1}$, $\lambda = 1,26 \cdot 10^{-4} \text{ sec}^{-1}$ und $\Delta p = 5000 \text{ dyn cm}^{-2}$. Hierdurch wird

$$K = 7,14 \cdot 10^{10} \text{ joule} \quad 11)$$

In den folgenden zwei Abbildungen sind die Zahl der Quadrate als Bestimmungsstücke entlang der y-Achse gewählt. In Abb. 14 finden

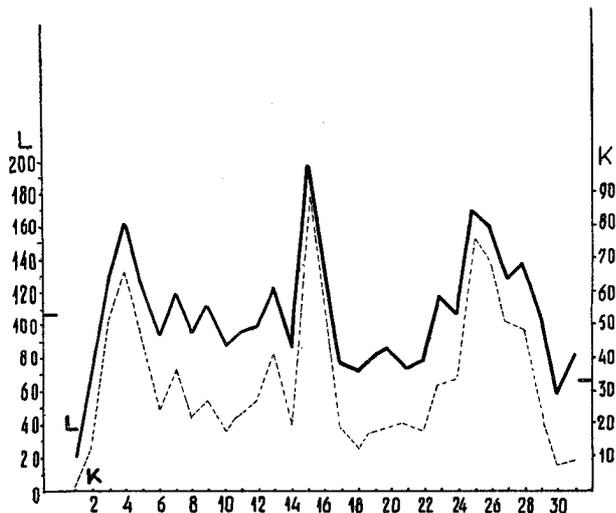


Abb. 14. Tägliche Werte der Isobarenlänge L und Zahl der «isobarischen Quadrate» K im Dezember 1931.

wir die Werte der einzelnen Tage für Dezember 1931 wiedergegeben. Zum Vergleich ist auch die Isobarenlänge L eingetragen.

Wie zu erwarten war schwingen die beiden Grössen beinahe im selben Takt. Doch macht K grössere Ausschläge als L , weil $K \propto v^2$, $L \propto v$ proportional ist.

Nachstehende kleine Tabelle gibt die durchschnittlichen Monatswerte der kinetischen Energie über Feld 1 in Zahl der Quadrate für das Jahr 1931:

J.	F.	M.	A.	M.	J.	J.	A.	S.	O.	N.	D.	Jahr
22,2	27,9	17,1	12,7	9,3	12,1	9,9	8,8	13,2	25,0	22,8	33,5	17,9

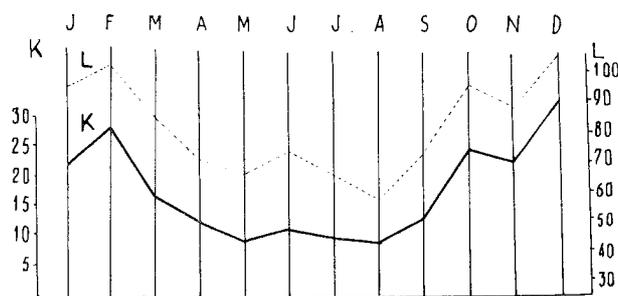


Abb. 15. Monatswerte der Isobarenlänge L und Zahl der «isobarischen Quadrate» K im Jahre 1931.

Dieselben Zahlen sind auch in Abb. 15 wiedergegeben, wo ausserdem die Monatswerte von L für 1931 nach Tab. 1 zu finden sind. Auch hier schwingen die beiden Grössen beinahe im gleichen Takt. Es ist z.B. deshalb berechtigt zu schliessen, dass der K -Wert vom Januar im Mittel für das Dezennium 1922—31 den höchsten Monatswert aufweisen muss, weil L für diesen Monat den grössten Wert hat. Auch im Monatsmittel zeigt K grössere Ausschläge als L . Das Verhältnis zwischen höchstem und tiefstem Monatswert in 1931 ist für K gleich $\frac{33,5}{8,8} = 3,8$, für L gleich $\frac{107}{57} = 1,9$.

Der Jahreswert ist 17,9 Quadrate, d. h. $K \approx 17,9 \cdot 7,14 \cdot 10^{10} = 1,28 \cdot 10^{12} \text{ joule}$. Pro cm^2 bekommt man deshalb $\frac{1,28 \cdot 10^{12}}{1,23 \cdot 10^{16}} = 1,04 \cdot 10^{-4} \text{ joule}$.

Der gefundene Jahreswert gilt zwar nur für das Jahr 1931, aber weil L und K sehr nahe im gleichen Takt schwingen, und L wenig von Jahr zu variiert, können wir mit grosser Wahrscheinlichkeit den gefundenen Wert für das ganze Dezennium 1922—31 verwenden und somit 17,9

oder 18 Quadrate angenähert als «Normalwert» für Feld 1 betrachten.

Beim Zeichnen der Quadrate wird es meistens notwendig Zwischenisobaren zu ziehen. Wählen wir $\Delta p = 2,5$ mb, wird K nur ein Viertel des in Gl. 11) gegebenen Wertes.

C. ZUM ENERGIEVERBRAUCH DER ATMOSPHÄRE.

H. U. Sverdrup hat seinerzeit die Arbeit der Reibungskräfte in der Atmosphäre berechnet¹⁾. Er findet, dass Reibungsarbeit und Arbeit der Druckkräfte für mittlere Zustände als gleich gross zu betrachten sind, ein Resultat, das er als einleuchtend bezeichnet. Denn im Mittel ist die potentielle und kinetische Energie der Atmosphäre unverändert, deshalb muss die Arbeit der Druckkräfte zur Überwindung der Reibung gehen. Weiter findet er, dass der Verlust an kinetische Energie — m. a. W. die Reibungsarbeit — der in einer Luftschicht stattfindet, der kinetischen Energie derselben Luftschicht proportional ist. Für den gesamten Energieverbrauch in den verschiedenen Schichten gibt er folgende Zahlen an: Erdboden bis 10 m Höhe:

$$0,05 \cdot 10^{-3} \text{ Kw m}^{-2} = 5 \cdot 10^{-6} \text{ W cm}^{-2}$$

10—1000 m:

$$1,98 \cdot 10^{-3} \text{ Kw m}^{-2} = 198 \cdot 10^{-6} \text{ W cm}^{-2}$$

1 000—10 000 m:

$$2,7 \cdot 10^{-3} \text{ Kw m}^{-2} = 270 \cdot 10^{-6} \text{ W cm}^{-2}$$

10 000—20 000 m:

$$1,5 \cdot 10^{-3} \text{ Kw m}^{-2} = 150 \cdot 10^{-6} \text{ W cm}^{-2}$$

Es soll hier in etwas abgeänderter Form die mittlere Arbeit der Druckkräfte und somit auch die Arbeit der Reibung für eine horizontale Luftschicht annähernd berechnet werden. Vorausgesetzt wird, dass wir Mittelwerte von α , λ und dem Ablenkungswinkel ψ verwenden können, und dass die Windgeschwindigkeit der des Geostrophwindes proportional ist. Wir legen die y -Achse entlang des Gradienten $\frac{\Delta p}{\Delta s}$ und haben dann pro Volumeneinheit und Zeiteinheit die Arbeit:

$$A = \frac{\Delta p}{\Delta s} \cdot v_y.$$

Wir setzen $v = c \cdot \frac{\alpha}{\lambda} \cdot \frac{\Delta p}{\Delta s}$, wo c eine Konstante ist, also $v_y = c \cdot \frac{\alpha}{\lambda} \cdot \frac{\Delta p}{\Delta s} \cdot \cos \psi$. Dann wird

$$A = \frac{\Delta p^2}{\Delta s^2} \cdot c \cdot \frac{\alpha}{\lambda} \cos \psi$$

$$\text{oder } A \cdot \Delta s^2 = \Delta p^2 \cdot c \cdot \frac{\alpha}{\lambda} \cos \psi = \text{Konst.} \quad (12)$$

Δs^2 ist aber das Volumen eines isobarischen Quadrates, wenn $h = 1$ gesetzt wird, und wir haben deshalb das Resultat gefunden, dass die mittlere Druckerarbeit (und die mittlere Reibungsarbeit) für ein isobarisches Quadrat konstant ist. Oben fanden wir (Abschnitt B), dass die kinetische Energie auch für isobarische Quadrat konstant war, es folgt daher, wie bei *Sverdrup*, dass der Verlust an kinetische Energie der kinetischen Energie desselben Volumens proportional ist.

Wir wollen die Reibungsarbeit für Feld 1 berechnen, wo die mittlere Zahl der isobarischen Quadrate ist. $\Delta p = 5000$ dyn cm^{-2} , $\lambda = 1,26 \cdot 10^{-4}$ sec⁻¹, und α können wir gleich 800 cm³ g⁻¹ setzen. Für c und ψ können wir nur Annäherungswerte angeben. Wir setzen $c = \frac{1}{2}$ und $\psi = 60^\circ$, weil Feld 1 sowohl Land als Meer enthält (siehe *Sverdrup*, l. c. Tab. 2). Dadurch finden wir:

$$A \cdot \Delta s^2 = 4 \cdot 10^3 \text{ Kw pro isobar. Quadrat.}$$

Über Feld 1 kommen im Jahresdurchschnitt 18 isobarische Quadrate vor, und das Areal war rund $1\,200\,000$ km² gross. Folglich ist die Arbeit $\frac{18 \cdot 4 \cdot 10^3}{1\,200\,000} = 6 \cdot 10^{-2}$ Kw km⁻² = $6 \cdot 10^{-9}$ W cm⁻², wenn $h = 1$ cm ist. Nehmen wir an, dass wir dieselben Zahlen für v_y für das ganze Schicht zwischen dem Erdboden und der Zehnmeterhöhe verwenden können, finden wir:

$$A = 6 \cdot 10^{-6} \text{ W cm}^{-2} \quad (13)$$

Dieser Wert stimmt gut mit *Sverdrups* überein, was nicht merkwürdig ist, denn Neubestimmungen sind nur die Druckgradienten (mittels der isobarischen Quadrate), während c und ψ *Sverdrups* Arbeit entnommen sind. Auch bei der hier vorgeschlagenen Methode ist eine Bestimmung von c und ψ unentbehrlich, aber eine solche Bestimmung hinsichtlich Feld 1 lag ausserhalb des Plans der vorliegenden Arbeit. Über Gebiete, wie Feld 1, wo Luftmassen und Windrichtungen ständig wechseln, müssen wir annehmen, dass sich der mittlere Wert von c und ψ für längere Zeiträume — mindestens einen Monat — ziemlich konstant

¹⁾ H. U. Sverdrup: Über den Energieverbrauch der Atmosphäre. Veröff. des geophys. Instituts der Universität Leipzig. Band 2. Heft 4.

hält. Deshalb können wir für ein und dasselbe Gebiet das Verhältnis zwischen den Reibungsarbeiten in bestimmten, längeren Zeiträumen einigermaßen festlegen ohne Kenntnis von c und ψ zu besitzen und zwar durch einen relativ kleinen Arbeitsaufwand. Hierin dürfte der grösste Vorteil der vorgeschlagenen Methode stecken. Im vorliegenden Fall müssen die Monatswerte der Reibungsarbeit über Feld 1 für das Jahr 1931 wie die Zahl der isobarischen Quadrate in Abb. 15 schwanken.

D. STATISTISCHE UNTERSUCHUNGEN ÜBER DURCHSCHNITTLICHE GRADIENTEN VON MITTELTEMPERATURKARTEN.

Mittels des Gradientsatzes können wir auch andere Isolinien als Isobaren untersuchen. Elemente wie Temperatur, Feuchtigkeit usw. haben indessen keine solche unmittelbare dynamische Bedeutung wie den Luftdruck, und sie sind ausserdem in der Nähe der Erdoberfläche viel mehr lokal beeinflusst. Die Untersuchung von anderen Isolinien als Isobaren auf den täglichen synoptischen Karten ist deshalb von weniger Interesse. Dagegen spielen *mittlere* Isothermen eine ausschlaggebende Rolle für den Wärmeumsatz (siehe den nächsten Abschnitt). Die Grösse der durchschnittlichen Gradienten der Mittelkarten bestimmt, *ceteris paribus*, die Grösse des Wärmeumsatzes. Von diesem Gesichtspunkte aus spielen deshalb Mittelwerte von Isolinien eine grössere Rolle als Momentanwerte.

Weiter unten ist eine Untersuchung über den Wärmeumsatz über Feld 1 durchgeführt worden, und hierzu wurde eine Herstellung von mittleren Temperaturkarten notwendig. Nachdem diese Karten fertig vorlagen, wurden auch ihre durchschnittlichen Gradienten ausgemessen. An und für sich kann es ja auch von einem gewissen klimatologischen Wert sein zu wissen, wie die mittleren Temperaturgegensätze über einem Gebiete im Laufe der Zeit variieren, selbst wenn man nicht unmittelbar die Berechnung des Wärmeumsatzes daran anknüpft. — Die Untersuchung von anderen Mittelkarten als Temperaturkarten liegt ausserhalb des Bereichs dieser Arbeit.

Es wurde zunächst die Temperaturmittelkarte vom Feld 1 für das Dezennium 1922—31 untersucht. Abb. 16 ist eine Wiedergabe dieser Karte. Die Temperaturangaben dieser und der

folgenden Karten wurden hauptsächlich den Jahrbüchern der betreffenden Länder entnommen, und die häufigst verwendeten Stationen sind in Abb. 16 durch kleine Kreuze angegeben.

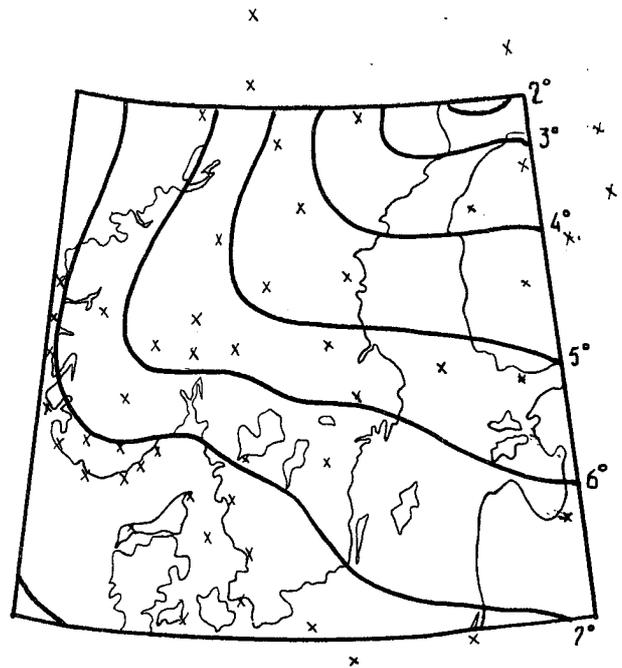


Abb. 61. Temperaturmittelkarte für das Jahrzehnt 1922—31.

Das Ziehen der Isothermen ist mit ziemlich viel Unsicherheit behaftet, besonders über den Gebirgsgegenden, wo sich allerlei lokale Einflüsse bemerkbar machen. Man muss eine Ausgleichung aus freier Hand als zulässig und notwendig ansehen. Man kann sagen, dass diese Ausgleichung ein Minimum der Isothermenlängen anstrebt. In dieser Weise bekommt man den wahrscheinlichsten Ausdruck für die Isothermen in der freien Atmosphäre, wo keine Diskontinuitäten im Mittel vorkommen können. (Selbstverständlich ist eine Reduktion der Stationshöhe auf das betreffende Niveau vorzunehmen).

Die Ausmessung der Isothermenlängen in Abb. 16 ergab 109 Einheiten zu 55,5 km. Der Mittelabstand zwischen zwei Nachbarisothermen ergab sich nach Gl. 1c) zu $204 \text{ km} = 2,04 \cdot 10^7 \text{ cm}$.

Weil es im folgenden nur auf die relativen Änderungen ankommt, sind die Isothermenlängen in halben Breitengraden angegeben, und eine Reduktion auf die Flächeneinheit ist nicht vorgenommen. Die Karten der einzelnen Jahre haben sämtliche ein ähnliches Aussehen wie Abb. 16 mit einem Minimum im Nordosten, einem Maxi-

mum im Südwesten. Die Längen der Isothermen sind in Abb. 17 eingetragen und durch die voll ausgezogene Linie repräsentiert. Um eine Idee von der Genauigkeit dieser Messungen zu bekom-

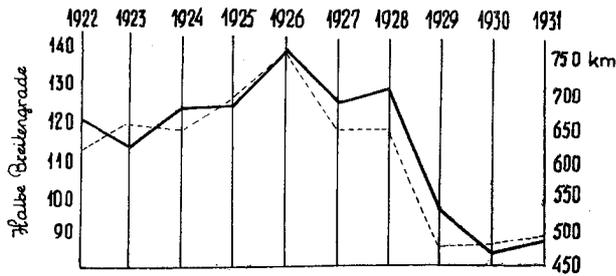


Abb. 17. Relative Grösse der durchschnittlichen Gradienten der Temperaturmittelkarten in den Jahren 1922—31. Ausgezogene Linie: Gewöhnliche Isothermen, gestrichelte Linie: Zwischenisothermen.

men wurden auch die Zwischenisothermen für 2,5°, 3,5° usw. gezeichnet und ihre Längen ausgemessen. Teils verlaufen die Zwischenisothermen etwas anders als die ursprünglichen, teils werden sie in anderer Weise vom Kartenrahmen abgeschnitten. Das Resultat ist durch die gestrichelte Linie in Abb. 17 wiedergegeben. Wir können die Differenzen als scheinbaren Fehler auffassen. Die grösste Differenz kam 1928 vor; die Länge der gewöhnlichen Isothermen war in diesem Jahre 129 Einheiten, die der Zwischenisothermen 117, d. h. die Differenz macht etwa 10 % der Isothermenlänge aus. Nach Abb. 17 brauchen wir im Durchschnitt kaum mit grösseren Fehlern (grösserer Unsicherheit) als etwa 5 % für den Jahreskarten zu rechnen. Eine ähnliche Unsicherheit müssen wir auch bei der Dezennienkarte annehmen. Diese Fehleruntersuchung macht es sehr wahrscheinlich, dass die beobachtete grosse Änderung in der Isothermenlänge von 1926 bis 1930 reell ist. In der Tat ist eine Änderung von 138 Einheiten im Jahre 1926 zu 85 im Jahre 1930 erstaunlich gross. Abb. 18 a und b ist eine Wiedergabe dieser zwei extremen Karten. Der Unterschied in der Grösse der durchschnittlichen Gradienten fällt sofort ins Auge.

Es wurden auch Temperaturmittelkarten für jeden Monat im Zeitraum 1922—31 hergestellt. Die jährliche Änderung des Aussehens der Monatsmittelkarten ist bekanntlich dadurch bestimmt, dass im Sommer das Land wärmer ist als das Meer; im Winter ist dies umgekehrt. Frühling und Herbst haben die kleinsten Temperaturdif-

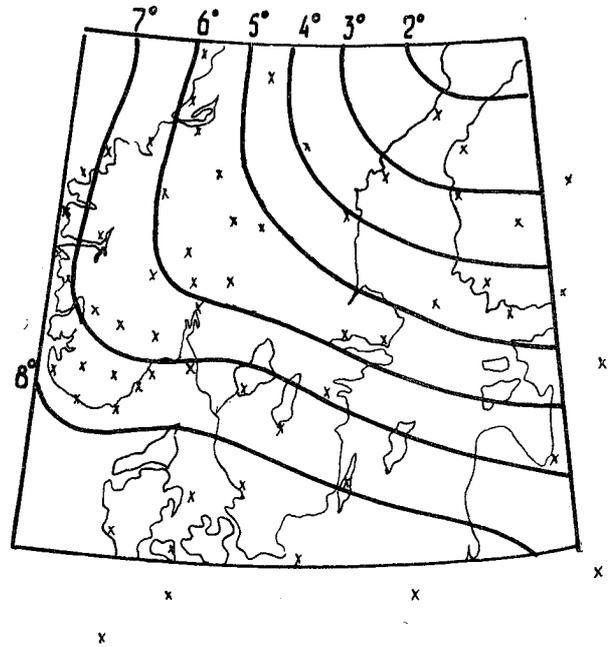


Abb. 18 a. Mittlere Isothermen im Jahre 1926.

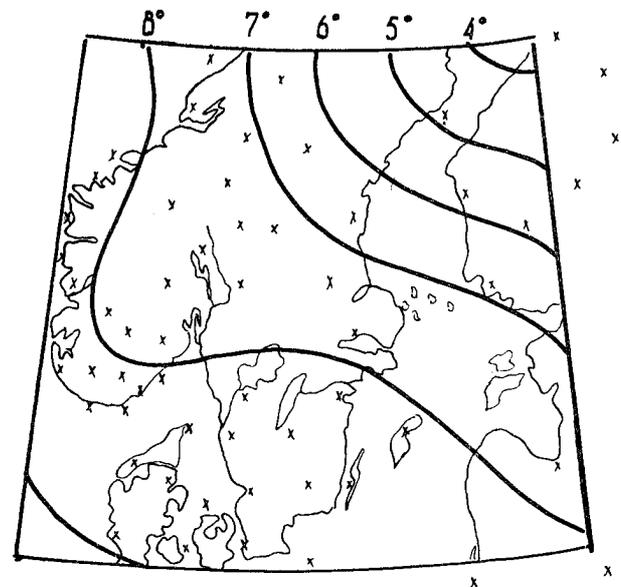


Abb. 18 b. Mittlere Isothermen im Jahre 1930.

ferenzen zwischen Land und Meer. Die Grösse des durchschnittlichen Temperaturgradienten eines Monats kann aber von einem Jahr zum andern ausserordentlich stark wechseln; dies geht aus Tab. 7 hervor, wo die Resultate der Ausmessungen der Monatskarten zu finden sind. Wir sehen, dass der Januar im Durchschnitt die grössten Temperaturgegensätze aufweist, dann kommt der Dezember; Juni zeigt ein sekundäres Maximum. Das

Tab. 7.

Isothermenlängen der Monatsmittelkarten über Feld 1 in halben Breitengraden.

Jahr	J.	F.	M.	A.	M.	J.	J.	A.	S.	O.	N.	D.
1922	421	349	200	185	252	243	206	139	114	176	272	351
1923	235	364	233	150	195	225	251	126	128	193	286	353
1924	481	315	265	121	229	263	200	85	115	120	264	328
1925	290	202	208	166	240	239	193	139	121	198	315	396
1926	367	418	154	196	232	249	227	137	121	202	227	360
1927	311	255	189	139	159	232	228	129	133	198	308	486
1928	365	303	225	192	213	253	202	140	120	166	269	313
1929	414	430	157	117	263	237	263	155	125	141	169	175
1930	190	269	147	175	217	256	170	93	134	148	240	284
1931	412	279	220	166	289	233	223	120	114	151	184	283
Mittel	348	319	200	161	229	243	216	126	122	169	254	329

tiefste Minimum kommt im August—September vor, ein anderes Minimum findet sich im April. Der mittlere jährliche Gang ist auch graphisch in Abb. 19 dargestellt.

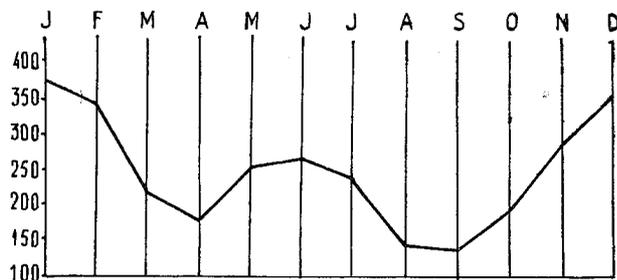


Abb. 19. Mittlerer jährlicher Gang des durchschnittlichen Temperaturgradienten der Monatskarten über Feld 1 im Jahrzehnt 1922—31 nach Tab. 7.

Die grössten Änderungen in den Werten der einzelnen Monate treten im Winter auf. Januar 1924 zeigt 481 Einheiten gegen 190 im Jahre 1930, Dezember zeigt 486 Einheiten im Jahre 1927 gegen nur 175 im Jahre 1929. Die Temperaturkarten der zwei letztgenannten Monate sind in Abb. 20 a und b wiedergegeben. In Abb. 20 a sind übrigens zwei ganz kleine geschlossenen Isothermen innerhalb des Minimums in Süd-Norwegen weggelassen worden. Sonst zeigen beide Karten einen winterlichen Verlauf der Isothermen. — September zeigt dagegen nur kleine Schwankungen mit den Extremwerten 114 und 134.

Wir finden die Resultante des Temperaturgradienten durch Projektion der Isothermen auf ein Achsenkreuz. Die positive Richtung der Isothermen ist 90° nach recht vom Gradienten ge-

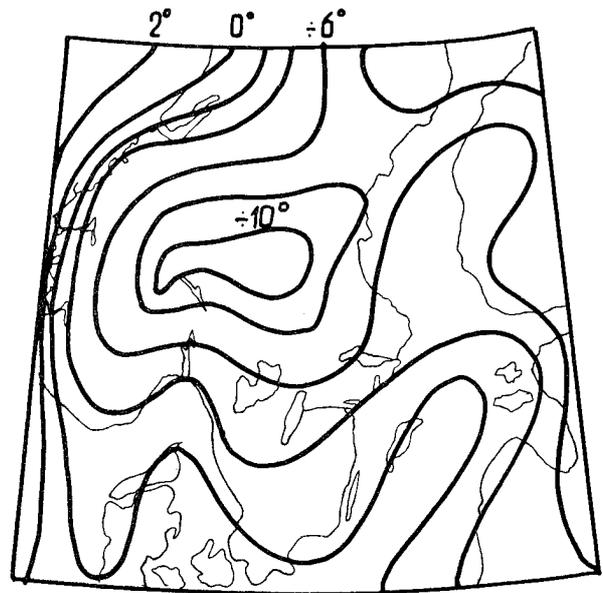


Abb. 20 a. Mittlere Isothermen im Dezember 1927.

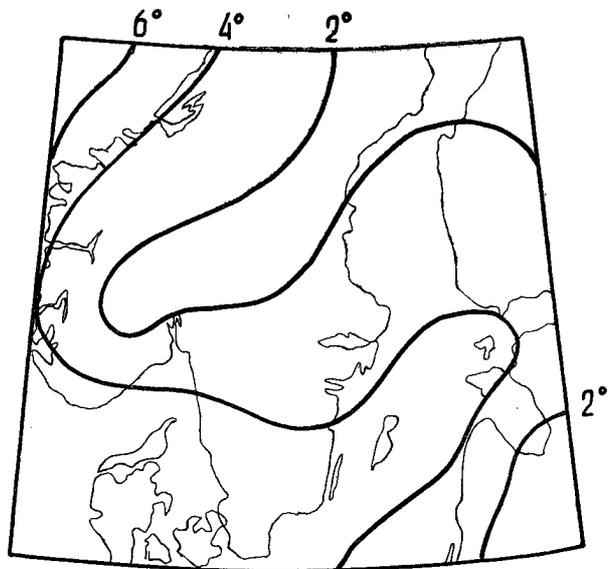


Abb. 20 b. Mittlere Isothermen im Dezember 1929.

dreht. Die gefundene Resultante des Dezenniums ist in Abb. 21 eingetragen. Hier finden wir auch die Resultanten der einzelnen Jahre vektoriel addiert. Einheit in halben Breitengraden, Massstab des Dezenniums zehnmal so gross wie für die einzelnen Jahre. Auf eine Wiedergabe sämtlicher der Konstruktion notwendigen Zahlen wurde verzichtet. Eigentlich sollten die zwei Endpunkte zusammenfallen, der Fehler ist jedoch unbedeutend; die Untersuchung spricht zu Gunsten der Genauigkeit der Karten.

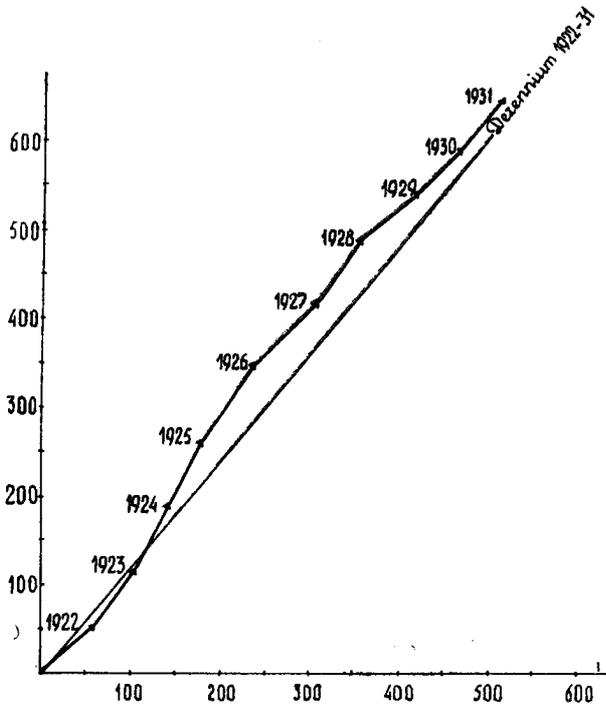


Abb. 21. Durchschnittlicher Temperaturgradient des Jahrzehnts 1922—31 bestimmt mittels der Dezennienkarte wie auch mittels der einzelnen Jahreskarten. Feld 1.

Die Tabellen 8—11 geben die Isothermenkomponenten in Richtung N, S, E und W für jeden Monat im Dezennium 1922—31. Mittels dieser Zahlen lässt sich die Resultante für jeden Monat konstruieren. In Abb. 22 sind die Resultanten für jeden Monat der Jahre 1922 und 1923 eingetragen nebst der Mittel des Dezenniums. Wir sehen, wie die mittlere Resultante im Laufe des Jahres von ENE im Januar bis WNW im Juli

Tab. 8.
Die N-Komponente der Isothermenlängen
der Tab. 7.

Jahr	J.	F.	M.	A.	M.	J.	J.	A.	S.	O.	N.	D.
1922	48	40	6	34	122	142	130	64	38	18	32	16
1923	12	8	4	8	80	106	134	66	36	24	56	56
1924	44	8	6	2	102	144	120	56	36	14	22	20
1925	46	10	0	40	100	116	128	62	26	16	20	40
1926	0	12	0	18	110	128	132	66	14	18	22	20
1927	4	8	4	24	66	138	162	74	20	10	32	60
1928	40	6	12	42	100	134	102	64	16	4	24	40
1929	40	24	0	0	122	130	144	82	22	14	18	20
1930	10	20	2	38	116	132	92	48	2	4	24	10
1931	32	12	18	32	140	106	140	82	22	8	10	22
Mittel	28	15	5	24	106	128	128	66	23	13	26	30

Tab. 9.
Die S-Komponente der Isothermenlängen
der Tab. 7.

Jahr	J.	F.	M.	A.	M.	J.	J.	A.	S.	O.	N.	D.
1922	236	100	128	76	66	42	30	22	30	82	146	200
1923	128	252	132	78	54	42	46	26	24	64	96	176
1924	276	200	120	74	46	54	22	8	28	50	124	180
1925	130	84	108	58	54	52	26	32	36	94	156	192
1926	248	184	114	84	62	54	36	34	36	84	88	192
1927	218	166	100	54	46	48	26	12	50	94	144	236
1928	196	188	110	86	60	74	30	28	24	74	94	148
1929	232	292	136	88	56	56	54	20	34	36	82	92
1930	106	154	80	78	46	66	24	18	76	70	98	190
1931	236	168	152	78	60	42	42	6	36	72	132	162
Mittel	201	179	118	75	55	53	34	21	37	72	116	177

Tab. 10.
Die E-Komponente der Isothermenlänge
der Tab. 7.

Jahr	J.	F.	M.	A.	M.	J.	J.	A.	S.	O.	N.	D.
1922	152	126	94	78	103	81	48	56	59	72	101	172
1923	110	144	82	72	90	83	91	52	82	128	119	154
1924	146	124	137	57	109	109	46	28	67	56	108	95
1925	113	120	124	83	123	83	46	40	65	118	152	164
1926	142	190	65	119	96	88	87	52	88	124	128	156
1927	129	92	111	75	63	62	48	50	85	118	162	150
1928	142	134	81	81	82	65	90	66	90	103	138	124
1929	124	104	12	48	95	61	94	92	87	105	77	63
1930	77	93	72	67	65	87	37	30	82	84	138	82
1931	162	116	71	59	114	112	53	58	74	81	46	114
Mittel	130	124	85	74	94	83	64	52	80	99	117	127

Tab. 11.
Die W-Komponente der Isothermenlänge
der Tab. 7.

Jahr	J.	F.	M.	A.	M.	J.	J.	A.	S.	O.	N.	D.
1922	80	66	12	26	25	37	35	22	12	28	39	42
1923	31	46	31	8	14	40	35	8	5	16	44	50
1924	102	44	34	5	14	30	56	7	5	16	56	59
1925	74	14	13	8	20	45	41	7	13	9	42	68
1926	26	58	6	4	14	36	31	14	0	12	26	52
1927	18	40	11	7	18	35	39	9	3	5	38	118
1928	46	43	55	22	19	25	14	7	2	5	30	78
1929	90	112	29	2	34	32	37	6	2	2	19	47
1930	32	54	19	22	38	37	42	16	2	9	27	59
1931	58	38	36	22	25	22	31	2	1	4	33	47
Mittel	56	52	25	13	22	34	36	10	5	11	35	62

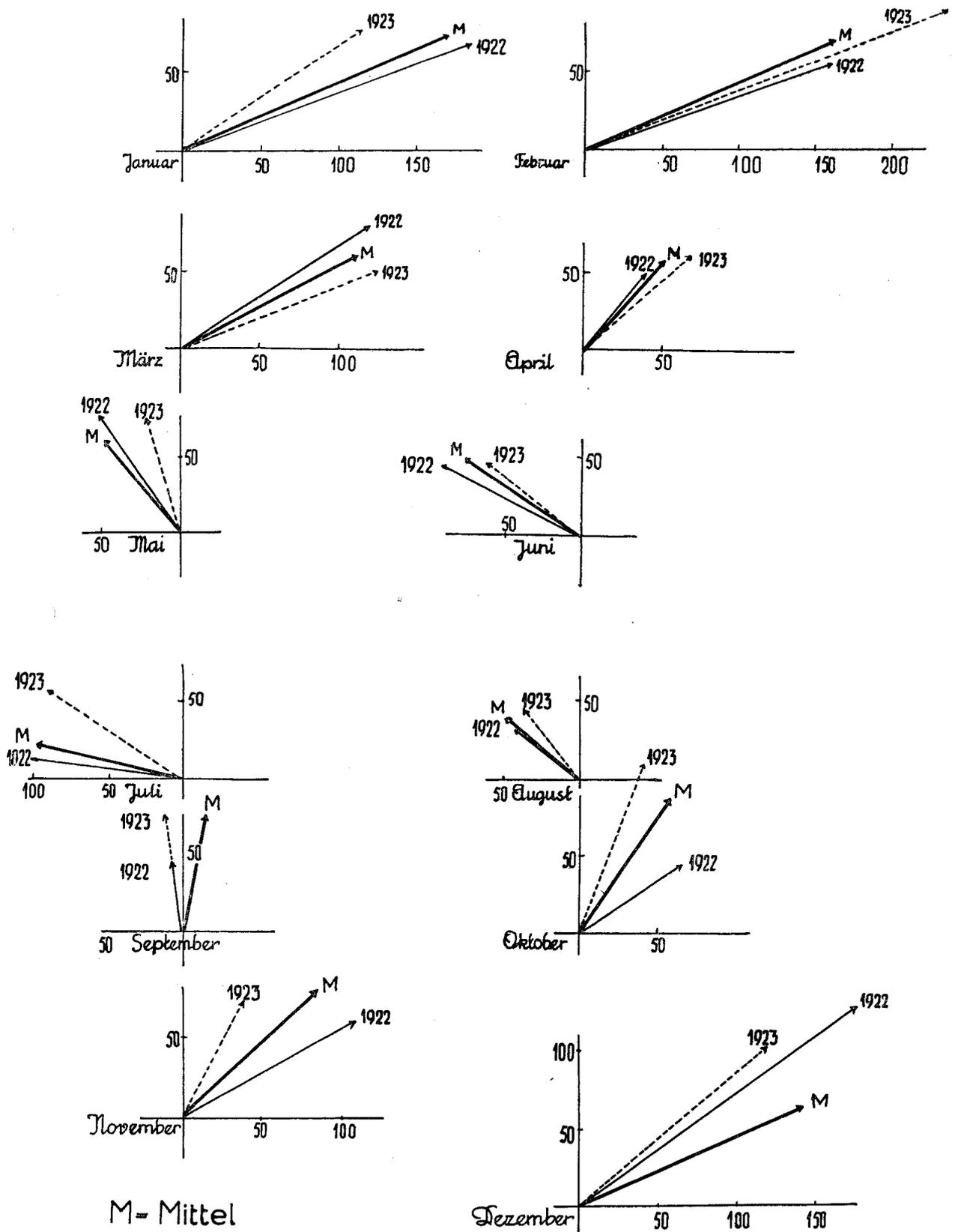


Abb. 22. Durchschnittliche, monatliche Temperaturgradienten über Feld 1 für die Jahre 1922 und 1923 und im Mittel für das Jahrzehnt 1922-31.

und dann wieder zurück schwingt. Die Resultanten der einzelnen Monate ändern sich viel von einem Jahr zum anderen. Im Mittel für das Jahrzehnt haben sämtliche Resultanten eine Komponente gegen Norden, die einzelnen Monate können jedoch ausnahmsweise eine kleine Komponente gegen Süden zeigen. Dies traf im Juli 1930 und im Februar 1929 ein, aber die Komponente gegen Süden war in beiden Fällen ganz unbedeutend. Trotzdem sehen wir, dass die Temperaturgegensätze zwischen Osten und Westen diejenigen zwischen Norden und Süden für einen einzelnen Monat ganz überdecken können.

Durch blosse Betrachtung einer einzelnen Karte ist es oft unmöglich die Richtung der Resultante selbst einigermaßen zu bestimmen. Man betrachtete z.B. Abb. 20 a, wo die Ausmessung der Komponente gegen Osten 132 Einheiten und gegen Norden 32 Einheiten ergab. —

Der Temperaturgegensatz zwischen Land und Meer nimmt mit der Höhe ab, deshalb müssen die durchschnittlichen Gradienten der Monatskarten auch mit der Höhe abnehmen, besonders im Sommer und im Winter. Bestimmte Aussagen über die Grösse dieser Abnahme kann nicht gemacht werden ohne gute Höhenkarten herzustellen; eine Konstruktion von hinreichend guten Höhenkarten ist aber zur Zeit unmöglich. Die untersuchten Monatskarten repräsentieren deshalb nur die Verhältnisse der Bodenschicht. Im Jahresdurchschnitt können wir aber damit rechnen, dass die Temperatur überall in derselben Weise mit der Höhe abnimmt, so dass die Jahreskarten (und die Dezennienkarte) auch die Gradienten im Gradientwindniveau wiedergeben.

E. ÜBER DEN WÄRMEUMSATZ DER HORIZONTALLEN LUFTSTRÖME.

I. Definition und Berechnungsweise des Wärmeumsatzes.

Wir stellen uns jetzt die Aufgabe den durchschnittlichen Wärmeumsatz der horizontalen Luftströme zu berechnen und wollen hierunter die Summe der mittleren Abkühlung und der mittleren Erwärmung verstehen, welche dadurch stattfindet, dass sich die Luft zwischen den durchschnittlich warmen und den durchschnittlich kalten Gebieten bewegen.

Wir betrachten einen längeren Zeitraum, τ , und ein bestimmtes Gebiet, A , und bestimmen die mittleren Isothermen für τ und A . In Abb. 23

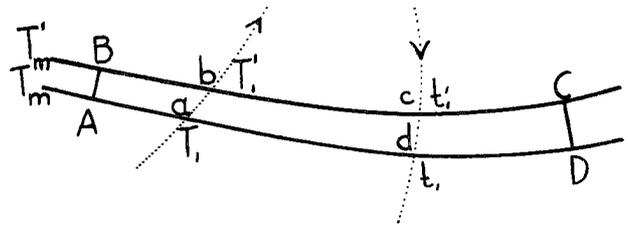


Abb. 23.

sind zwei von den mittleren Isothermen, T_m und T_m' , herausgeriffen, wo $T_m - T_m' = \Delta T$. Der Abstand zwischen den beiden Isothermen soll im Verhältnis zu deren Länge klein sein. Wir begrenzen T_m und T_m' durch die Linien AB und CD , beide senkrecht zu den Isothermen. Wir betrachten eine Einheitsschicht, setzen Geostrophwind voraus und ausserdem, dass beide Isothermen von denselben Partikeln gekreuzt werden. Jetzt betrachten wir eine Masseneinheit, m , welche AD in a durchquert, wo die Temperatur T_1 sein kann, und BC in b , wo die Temperatur T_1' ist. Der Wärmeverlust der Partikel, ΔQ_1 , wird

$$\Delta Q_1 = c_p m (T_1 - T_1') \quad (14)$$

In Einzelfällen kann T_1 kleiner als T_1' sein, so dass ΔQ_1 negatives Vorzeichen bekommt.

Eine Masseneinheit, welche die Isothermen in entgegengesetzter Richtung durchquert, hat die Temperatur t_1' in c und t_1 in d . Dann wird die Wärmezunahme

$$\Delta q_1 = c_p m (t_1 - t_1') \quad (15)$$

Im Zeitraum τ sollen N Masseneinheiten von AD bis BC gehen und n Masseneinheiten von BC bis AD . Der gesamte Wärmeumsatz in der betrachteten Einheitsschicht zwischen AD und BC wird dann

$$\begin{aligned} Q &= \sum \Delta Q_1 + \sum \Delta q_1 = c_p m [(T_1 - T_1') + \\ &+ (T_2 - T_2') + \dots + (T_N - T_N')] + \\ &+ c_p m [(t_1 - t_1') + (t_2 - t_2') + \dots + (t_n - t_n')] \\ &= c_p m [(T_1 + T_2 + \dots + T_N + t_1 + t_2 + \dots + t_n) - \\ &- (T_1' + T_2' + \dots + T_N' + t_1' + t_2' + \dots + t_n')] \\ &= c_p m (N + n) \\ &\left[\frac{T_1 + T_2 + \dots + T_N + t_1 + t_2 + \dots + t_n}{N + n} \right. \\ &\left. - \frac{T_1' + T_2' + \dots + T_N' + t_1' + t_2' + \dots + t_n'}{N + n} \right] \quad (16) \end{aligned}$$

Hier können wir mit grosser Annäherung schreiben

$$\frac{T_1 + T_2 + \dots + T_N + t_1 + t_2 + \dots + t_n}{N + n} = T_m \quad 17)$$

und

$$\frac{T_1' + T_2' + \dots + T_N' + t_1' + t_2' + \dots + t_n'}{N + n} = T_m' \quad 18)$$

indem wir die Mitteltemperatur durch die Temperatur der wandernden Partikeln bestimmen. (Bekanntlich kann man sich ein brauchbares Tagesmittel der Temperatur allein durch zwei Beobachtungen pro Tag schaffen; man kann sich also damit begnügen pro Tag die Temperatur von zwei passend gewählten Partikeln zu bestimmen um dadurch das Tagesmittel an einer bestimmten Stelle zu finden.) Folglich lässt sich Gl. 16) folgendermassen schreiben:

$$Q = c_p m (N + n) \cdot (T_m - T_m') = c_p m (N + n) \cdot \Delta T \quad 19)$$

Diese Gleichung ist für zwei beliebigen, dichtliegenden, mittleren Isothermen hergeleitet. Denken wir uns das Areal von vielen mittleren Isothermen durchgezogen, können wir Gl. 19) auf jedes Paar von Nachbarisothermen anwenden. Für den gesamten Wärmeumsatz über A , Q_A , erhalten wir eine Summe von gleichen Ausdrücken wie in Gl. 19) und können deshalb schreiben:

$$Q_A = \Sigma Q = \Sigma c_p m (N + n) \cdot \Delta T = c_p \Delta T \cdot M \quad 20)$$

indem wir $\Sigma m (N + n) = M$ setzen.

Für die betrachtete Einheitsschicht über A finden wir *den durchschnittlichen Wärmeumsatz pro Volumen- und Zeiteinheit:*

$$q = \frac{Q_A}{A \cdot \tau} = \frac{c_p \cdot M}{A \cdot \tau} \quad 21)$$

Hier können wir den mittleren Temperaturgradienten (als Flächenmittel) der Mitteltemperaturkarte einführen und weiter die mittlere Bewegungsgrösse quer über den Isothermen. Die Grösse der Windgeschwindigkeit senkrecht zu den Isothermen schreiben wir $|v_s|$, die Länge der Isothermen L ; weil $h = 1$ ist, repräsentiert L auch Flächeneinheiten. Dann wird:

$$M = |\rho v_s| \cdot \tau \cdot L \quad 22)$$

indem jede Flächeneinheit von L pro Zeiteinheit von $|\rho v_s|$ gekreuzt wird. Wir führen dies in Gl. 21) ein und erhalten:

$$q = c_p \frac{\Delta T \cdot L}{A} \cdot \frac{|\rho v_s| \cdot \tau}{\tau} \quad 23)$$

Unter Hinweis auf Gl. 1 b) ist $\frac{\Delta T \cdot L}{A}$ als der mittlere Temperaturgradient aufzufassen; wir setzen

$$\frac{\Delta T \cdot L}{A} = |\nabla T|_\tau$$

und hat dann:

$$q = c_p |\nabla T|_\tau \cdot |\rho v_s| \quad 24)$$

Für die praktische Bestimmung des Wärmeumsatzes pro Volumen- und Zeiteinheit können wir am leichtesten Gl. 21) verwenden. Hier verfügen wir selbst über die Grössen ΔT , A und τ , so dass wir nur M zu bestimmen haben. Bei dieser Bestimmung legen wir die Isothermenkarte für den Zeitraum τ auf ein «Lichttisch», legen nach und nach die aufeinanderfolgenden Wetterkarten darauf und zählen die Schnittpunkte zwischen Isothermen und (mittleren) Isothermen. Jeder Schnittpunkt gibt an, dass ein Rohr zwischen zwei Nachbarisothermen die Isothermen gekreuzt hat, und bei Geostrophwind geht pro Zeiteinheit immer dieselbe Masse durch jeden Querschnitt eines solchen Rohres. Die Druckkarte gilt in aller Strenge nur für den Beobachtungsaugenblick, aber über ein grösseres Gebiet wird sich der Massentransport quer über den Isothermen im allgemeinen nur wenig im Laufe von 6 Stunden ändern. In der folgenden Statistik hat man sich zwar mit den Morgenkarten allein begnügt. Jede Karte muss deshalb den mittleren Zustand in 24 Stunden darstellen. Der hierdurch entstandenen Fehler lässt sich abschätzen, man vergleiche weiter unten.

Die Anwendung der Gl. 24) ist nicht so bequem wie die Anwendung der Gl. 21). Allerdings lässt sich der mittlere Temperaturgradient $\frac{\Delta T \cdot L}{A}$ durch eine einzelne Ausmessung von L bestimmen. Aber $|\rho v_s|$ müssen wir mittels Gl. 22) berechnen, müssen also zunächst M bestimmen, und dann lässt sich doch M leichter unmittelbar in Gl. 21) einführen.

Es liegt vielleicht dem Gedanken nahe, dass die Wahl von ΔT die Grösse von q oder $|\nabla T|_\tau$ beeinflussen kann; dies ist aber nicht der Fall, wenn man davon absieht, dass sich der mittlere Fehler der Ausmessungen möglicherweise etwas ändern kann. Wählen wir z.B. $\frac{\Delta T}{2}$ statt ΔT ,

erhalten wir doppelt so viele Isothermen über A , d. h. L wird doppelt so gross. In Gl. 23) müssen wir $\frac{\Delta T}{2} \cdot 2L$ statt $\Delta T \cdot L$ schreiben, der Ausdruck für q wird deshalb unverändert. In ähnlicher Weise wird der mittlere Gradient, $\frac{\Delta T}{2} \cdot 2L$ — A , also auch unverändert.

Die Grösse des Wärmeumsatzes wird nicht davon beeinflusst, ob die mittleren Isothermen geschlossene Kurven sind. Denn an jedem Punkt der Karte wird nur die Grösse des Gradienten und nicht seine Richtung berücksichtigt. In Gl. 24) wird deshalb $[\Delta T]_\tau$ ein *arithmetisches* Mittel der Zahlenwerte des Gradienten über dem Gebiet A . Weil wir aber mittlere Isothermen für den Zeitraum τ benutzen, ist der Gradient an jedem Punkt der Karte ausserdem ein *vektorielles Zeitmittel* von den Temperaturgradienten jeder einzelnen Zeiteinheit. Wir müssen deshalb $[\nabla T]_\tau$ in zweifacher Weise als einen Mittelwert auffassen, was durch die Hinzufügung der Index τ angedeutet ist. Wählen wir z.B. τ gleich einem Jahr, müssen wir den Wärmeumsatz mittels der Jahresisothermen bestimmen. Wir können auch den Wärmeumsatz für das Sommer- und Winterhalbjahr getrennt bestimmen, müssen aber dann die entsprechenden Halbjahrisothermen verwenden und können im allgemeinen nicht die gefundenen Halbjahrswerte algebraisch addieren um den Wärmeumsatz des ganzen Jahres zu finden. Das lässt sich nur dann tun, wenn die Gradientrichtungen im

Sommer und im Winter an jedem Punkt der Karte zusammenfallen. Gewöhnlich ändern sich aber die Gradientrichtungen im Laufe des Jahres. Ist die Grösse des Temperaturgradienten dieselbe im Sommer und im Winter, aber entgegengesetzt gerichtet, finden wir einen Wärmeumsatz für jedes Halbjahr, aber für das ganze Jahr wird $[\nabla T]_\tau$ verschwinden, und der Wärmeumsatz wird deshalb gleich Null. Annähernd findet dies an der Küste von West-Norwegen statt, wo die Temperaturgradienten im Sommer und im Winter entgegengesetzt gerichtet sind ohne jedoch einander im Jahresmittel ganz aufzuheben. —

Nebenbei sei bemerkt, dass sich der Umsatzbegriff auf jede Luftmasseneigenschaft anwenden lässt, wenn es so viele Beobachtungen gibt, dass sich Isolinien ziehen lassen. —

Es kann von einem gewissen klimatologischen Interesse sein den Wärmeumsatz für verschiedene Gebiete der Erde zu untersuchen; denn der Wärmeumsatz ist überall kaum derselbe. Die folgende Statistik beschränkt sich aber auf Feld 1.

2. Statistische Untersuchungen hinsichtlich des Wärmeumsatzes über Feld 1.

Wir bestimmen zunächst q für das ganze Zehnjahr 1922—31. Die Arbeit besteht darin die Schnittpunkte zwischen den Zehnjahrisothermen (Abb. 16) und den Isobaren der einzelnen Morgenkarten auszuzählen. Die Mittelzahlen sind in Tab. 12 gegeben. Die einzelnen Monatswerte in

Tab. 12.
Mittlere Zahl der Schnittpunkte zwischen Morgenisobaren und Dezennienisothermen für 1922—31.

Jahr	J.	F.	M.	A.	M.	J.	J.	A.	S.	O.	N.	D.	Summe
1922.....	13	14	13	12	12	9	10	9	11	11	16	14	144
1923.....	17	12	9	9	11	10	8	11	13	12	15	15	142
1924.....	16	15	14	11	10	10	8	9	12	12	12	17	146
1925.....	17	16	13	11	9	11	8	8	11	15	12	14	145
1926.....	12	13	15	10	9	8	8	10	12	12	15	13	137
1927.....	18	15	11	12	11	9	7	9	10	15	13	13	143
1928.....	15	16	12	10	10	11	10	8	10	13	14	14	143
1929.....	15	11	13	12	11	10	10	11	13	15	15	19	155
1930.....	16	13	15	9	8	8	8	9	11	12	15	14	138
1931.....	15	16	13	11	9	10	10	9	12	16	13	17	151
Mittel	15,4	14,1	12,8	10,7	10,0	9,6	8,7	9,3	11,5	13,3	14,0	15,0	

Mittel für das ganze Dezennium ist 12 Schnittpunkte.

dieser Tabelle geben nur einen Ausdruck für den Massentransport des betreffenden Monats quer über die Zehnjahrisothermen. Will man den Wärmeumsatz innerhalb eines bestimmten Monats als einen abgeschlossenen Zeitraum untersuchen, muss man, wie oben hervorgehoben ist, die mittleren Isothermen des in Frage kommenden Monats verwenden.

Im Durchschnitt für das Zehnjahr 1922—31 zeigen die Zehnjahrisothermen in jedem Augenblick 12 Schnittpunkte mit den Isobaren. Jeder Schnittpunkt repräsentiert nach Gl. 2 c) einen Massentransport pro Sekunde über die Isothermen von

$$q v \Delta s h = \frac{\Delta p}{\lambda} h = 3,97 \cdot 10^7 \text{ g sec}^{-1} \quad 25)$$

Hier wurde $\Delta p = 5000 \text{ dyn cm}^{-2}$, $h = 1 \text{ cm}$ und $\lambda = 1,26 \cdot 10^{-4} \text{ sec}^{-1}$ gesetzt. Der Massentransport Im Zeitraum τ wird deshalb

$$M = 12 \cdot 3,97 \cdot 10^7 \cdot \tau \quad 26)$$

Diesen Ausdruck führen wir in Gl. 21) ein; hier setzen wir ausserdem $c_p = 0,24 \text{ cal g}^{-1} \text{ grad}^{-1}$, $\Delta T = I \text{ grad}$ und $A = 1,2316 \cdot 10^{16} \text{ cm}^3$; also wird

$$\underline{q} = \frac{0,24 \cdot 1 \cdot 12 \cdot 3,97 \cdot 10^7 \cdot \tau}{1,2316 \cdot 20^{16} \cdot \tau} = 9,3 \cdot 10^{-8} \text{ cal cm}^{-3} \text{ sec}^{-1} \quad 27)$$

Bei der Beurteilung der Genauigkeit von q sind wesentlich zwei Fehlerquellen in Betracht zu ziehen.

1) Die Isothermen können ungenau sein.

2) Die Bewegungsgrösse der Morgenkarte wird als Mittel für 24 Stunden angesehen.

Ad 1). Ändern sich die Längen der Isothermen, so ändern sich auch die Schnittpunktzahlen beinahe in derselben Weise. Es wurde im Abschnitt D erwähnt, dass man kaum mit einem grösseren Fehler als 5 % in den mittleren Isothermenlängen zu rechnen braucht. Berechnen wir den Wärmeumsatz für das Gradientwindniveau, kann der Fehler etwas grösser ausfallen, weil die Ausbuchtung der Isothermen über Süd-Norwegen von der kalten Bodenluft im Winter verursacht wird. Im Gradientwindniveau müssen die Isothermen etwas kleiner als am Boden sein; wahrscheinlich liegt deshalb die Unsicherheit der Isothermenlängen zwischen 5 und 10 %. Dass der Fehler 10 % nicht wesentlich übertreffen kann,

wurde durch Zeichnung und Ausmessung von mehr abgerundeten Isothermen über Süd-Norwegen wahrscheinlich gemacht.

Ad 2). Wir können den zufälligen Fehler der Monatsmittel in Tab. 12 abschätzen, indem wir die Schnittpunkte sowohl für Morgen- als Abendkarten bestimmen. (In beiden Fällen benutzen wir selbstverständlich die Zehnjahrisothermen). Die halbe Differenz zwischen den Werten der Morgen- und Abendkarten können wir als scheinbare Fehler betrachten. Nachstehende kleine Tabelle zeigt das Ergebnis der Auszählung im Zeitraum Januar bis Juni 1922. Die ganze Differenz

	Zahl der Schnittpunkte.					
	J.	F.	M.	A.	M.	J.
08 Uhr	416	400	418	353	361	268
19 Uhr	388	348	389	318	360	305
Differenz	28	52	29	35	1	37

macht rund 10 % des Mittelwerte aus, deshalb können wir etwa 5 % als Fehler des Monatsmittels ansehen. Dividieren wir mit $\sqrt{12}$ und $\sqrt{120}$ finden wir den Fehler des Jahresmittels zu etwa 1,5 % und den Fehler des Zehnjahresmittels zu etwa 0,5 %. Im Zehnjahresmittel von q wird dieser Fehler bedeutungslos, und es dominiert somit der Fehler der Isothermenlängen. Deshalb müssen wir annehmen, dass der Fehler von q 10 % nicht wesentlich überschreiten kann.

Der gefundene Wert von q gilt zwar nur für das untersuchte Dezennium. Es ist aber nicht anzunehmen, dass sich das Temperaturbild in Abb. 16 durch Hinzufügung von mehreren Jahren wesentlich ändern wird, und ähnliches gilt auch vom mittleren Massentransport. Das gefundene Resultat kann deshalb einigermaßen als «Normalwert» für Feld 1 gelten.

Eine Masse, welche sich der Isothermen entlang bewegt, spielt für den Wärmeumsatz keine Rolle. Weil aber die Luftströme über Feld 1 ständig wechseln, muss man annehmen, dass ausgeglichene Werte des gesamten Massentransportes über Feld 1 und ausgeglichene Werte des Massentransportes quer über die mittleren Isothermen einigermaßen in demselben Takt schwingen müssen. Das dies der Fall ist, geht aus Abb. 24 hervor, wo L (nach Tab. 1) den jährlichen Gang der

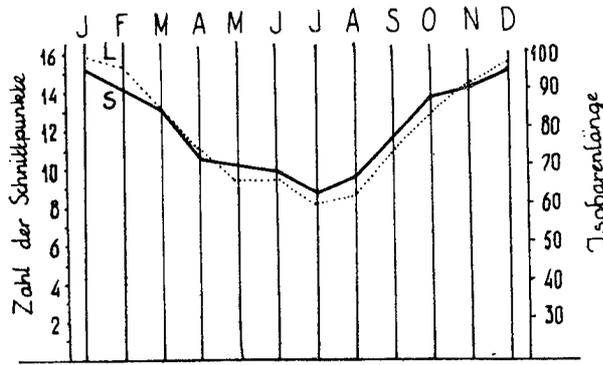


Abb. 24. Jährlicher Gang der Schnittpunktzahl S nach Tab. 12 und der Isobarenlänge L nach Tab. 1.

gesamten Bewegungsgrösse über Feld 1 repräsentiert und S (nach Tab. 12) den jährlichen Gang der Masse, welche die Zehnjahrisothermen passiert. Beide Kurven folgen einander ziemlich genau. —

Wir können auch den Wärmeumsatz für kleinere Zeiträume, z.B. für die einzelnen Monate, untersuchen. Weil aber die Monatsmittelkarten der Temperatur im Gradientwindniveau ziemlich unsicher werden, können wir nicht den Resultaten allzu grosses Gewicht beimessen. In Tab. 13

Tab. 13.

Mittlere Zahl der Schnittpunkte zwischen Morgenisobaren und Monatsisothermen.

Jahr	J.	F.	M.	A.	M.	J.	J.	A.	S.	O.	N.	D.
1922	56	47	25	20	30	22	18	11	12	16	40	48
1923	36	42	20	13	19	22	20	11	14	22	36	43
Mittel	46	45	23	17	26	22	19	11	13	19	38	46

sind die Ergebnisse der Auszählungen der Schnittpunkte für die einzelnen Monate in den Jahren 1922 und 1923 wiedergegeben. Es sind die Temperaturkarten der entsprechenden Monate verwendet worden; wie oben sind nur die Morgenisobaren für die Bestimmung der Schnittpunkte herangezogen. In Übereinstimmung mit dem jährlichen Gang des mittleren Temperaturgradienten (Abb. 19) kommt ein kleines Maximum im Sommer vor. Die Zahlen sind bedeutend höher als die entsprechenden in Tab. 12, weil die Monatsisothermen viel zusammengedrängter auftreten als die Dezennienisothermen.

Die Zahl der Schnittpunkte zwischen Isothermen und Isobaren muss unter sonst gleichen Umständen sowohl mit den Längen der Isothermen (Temperaturgradienten) als auch mit den Längen der Isobaren (Bewegungsgrösse) anwachsen. Wir müssen deshalb annehmen, dass der Massentransport quer zu den Isothermen (und damit auch der Wärmeumsatz) dem Produkt aus Isothermen- und Isobarenlängen annähernd proportional ist. Das Produkt aus den Monatswerten in Tab. 1 und Tab. 7, L_1 und L_7 , muss deshalb mit den Monatswerten der Zahl der Schnittpunkte, Z , in Tab. 13 proportional sein. Wir schreiben deshalb

$$\frac{Z}{L_1 \cdot L_7} = k \text{ (onstant)} \quad (28)$$

Um festzustellen wie weit dies zutrifft, berechnen wir k für die gefundenen Z -Werte in Tab. 13 und führen die berechneten Werte in Tab. 14 auf. Das Mittel der k -Werte ist 0,126 mit den Extremen 0,141 und 0,113, d. h. die grösste Ab-

Tab. 14.

Berechnung der k -Werte nach Gl. 28).

	J.	F.	M.	A.	M.	J.	J.	A.	S.	O.	N.	D.
1922												
z	56	47	25	20	30	22	18	11	12	16	40	48
$L_1 \cdot L_7$	458	368	186	151	213	178	156	91	94	138	284	347
k	0,122	0,128	0,134	0,133	0,141	0,127	0,116	0,121	0,127	0,116	0,141	0,138
1923												
z	36	42	20	13	19	22	20	11	14	22	36	43
$L_1 \cdot L_7$	264	371	176	115	149	173	159	94	114	173	303	365
k	0,136	0,113	0,114	0,113	0,127	0,127	0,125	0,117	0,123	0,127	0,119	0,118

Mittel von k in 1922—23 = 0,126.

weichung ist nur etwa 12 % des Mittelwertes. Wir können deshalb k mit guter Annäherung als eine Konstante betrachten. Mittels des gefundenen mittleren k -Wertes und der Tabellen 1 und 7 können wir nach Gl. 28) Tab. 13 mit den Jahren 1924 bis 1931 verlängern ohne eine Auszählung der Schnittpunkte durchzuführen. Weil wir nur Annäherungswerte finden, verzichten wir auf diese Berechnung und begnügen uns mit den zwei Jahren in Tab. 13.

Auch der Wärmeumsatz für die einzelnen Jahre müssen dem Produkt aus Isobaren- und Isothermenlängen annähernd proportional sein. Weil aber die Jahrewerte der Isobarenlängen nur wenig variieren (L in Abb. 3), können wir die Jahrewerte der Isobarenlängen als konstant ansehen. Das heisst: die Grösse der Jahrewerte des Wärmeumsatzes muss ungefähr wie die Isothermenlängen in Abb. 17 variieren.

Zusammenfassung.

In Abschnitt A wird besprochen wie man durch Ausmessung der Isobarenlängen die Grösse der horizontalen Luftdruckkräfte und die Bewegungsgrösse des Geostrophwindes bestimmen kann. Durch Projektion auf ein Achsenkreuz lassen sich die Komponenten der Druckkraft und der Bewegungsgrösse nach den vier Hauptrichtungen bestimmen, wodurch sich die Resultanten auch leicht konstruieren lassen. In dieser Weise sind sämtliche Morgenkarten des Dezenniums 1922—31

für ein bestimmtes Gebiet über Süd-Skandinavien behandelt worden. Es werden tägliche Extremwerte, Monats-, Jahres- und Dezennienwerte besprochen. Es sind auch Ausmessungen von einigen grösseren Gebieten für das Jahr 1935 ausgeführt. Bei allen Ausmessungen in diesem und in den folgenden Abschnitten sind Fehleruntersuchungen vorgenommen.

Abschnitt B gibt eine Methode zur Bestimmung der kinetischen Energie des Geostrophwindes nebst statistischen Untersuchungen derselben über Süd-Skandinavien für das Jahr 1931.

Im Abschnitt C wird eine angenäherte Methode zur Bestimmung der mittleren Reibungsarbeit mitgeteilt nebst einer Anwendung auf das gewählte Gebiet über Süd-Skandinavien für das Jahr 1931.

Im Abschnitt D werden Temperaturmittelkarten nach denselben Methoden wie im Abschnitt A behandelt. Untersucht sind Monats-, Jahres- und Dezennienkarten. Die durchschnittlichen Temperaturgradienten für jeden Monat werden in Abbildungen gegeben, wodurch man einen Überblick über die Änderungen im Laufe des Jahres bekommt.

Im Abschnitt E wird definiert, was man unter dem Wärmeumsatz der horizontalen Luftströme verstehen soll. Eine statistische Untersuchung dieser Grösse hinsichtlich des gewählten Gebietes wird für das Jahrzehnt 1922—31 durchgeführt.