



Berichte des Deutschen Wetterdienstes

194

**Ergebnisse methodischer
Untersuchungen zur Korrektur
des systematischen Meßfehlers
des Hellmann-Niederschlagsmessers**

von
Dieter Richter

Zur Herstellung dieses Buches wurde chlor- und säurefreies Papier verwendet.

ISSN 0072-4130

ISBN 3-88148-309-8

Alle Rechte vorbehalten. Nachdruck, auch auszugsweise, verboten. Kein Teil dieses Werkes darf ohne schriftliche Einwilligung des Deutschen Wetterdienstes in irgendeiner Form (Fotokopie, Mikrofilm oder ein anderes Verfahren), auch nicht für Zwecke der Unterrichtsgestaltung, reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden. Für den Inhalt ist der Autor verantwortlich.

Herausgeber und Verlag:
Deutscher Wetterdienst
Zentralamt
Frankfurter Str. 135
63067 Offenbach am Main

Anschrift des Autors:
Dr. Dieter Richter
Zentralstelle für Hydrometeorologische
Entwicklungen und Anwendungen
Lindenberger Weg 24
13125 Berlin

Inhaltsverzeichnis	Seite
Vorwort	5
Zusammenfassung/Abstract	7
1 Einleitung	9
2 Meßprogramme	10
3 Benetzungs- und Verdunstungsfehler	11
3.1 Benetzungsfehler des Auffangtrichters	12
3.1.1 Benetzungsverlust bei voller Benetzung	12
3.1.2 Benetzungsumfang bei Niederschlagsereignissen	13
3.1.3 Häufigkeit der Höhe von Niederschlagsereignissen	15
3.1.4 Benetzungsverluste des Auffangtrichters	16
3.2 Benetzungs- und Verdunstungsfehler der Sammelkanne	21
3.2.1 Benetzungsfehler der Sammelkanne	21
3.2.2 Verdunstungsverluste aus der Sammelkanne	21
3.3 Gesamtfehler durch Benetzung und Verdunstung	23
4 Windfehler	27
4.1 Untersuchungsgrundlagen	29
4.1.1 Vergleichsmessungen im Bodenniveau	29
4.1.2 Bestimmung der Windexposition einer Meßstelle	31
4.1.3 Zuordnung der Niederschlags-Vergleichsstationen	32
4.2 Ergebnisse der Vergleichsmessungen	36
4.2.1 Beschreibung der Datenbasis	36
4.2.2 Langjährige Mittelwerte der Windfehler	39
4.2.3 Mittlere Windfehler von Tageswerten der Niederschlagshöhe	43
4.2.3 Ergänzende Messungen zum Windfehler	51
5 Gesamtfehler der Niederschlagsmessung	58
5.1 Langjährige Mittelwerte des Niederschlagsmeßfehlers	58
5.2 Mittlere Tageswerte des Niederschlagsmeßfehlers	63
6 Anwendung des Korrekturverfahrens	66
6.1 Niederschlagsklimatologische Grundlagen	68
6.1.1 Mittlere Anzahl von Niederschlagstagen	68

6.1.2	Mittlere Niederschlagshöhe pro Niederschlagstag	71
6.1.3	Mittlere Anteile der Niederschlagsarten	75
6.2	Regionale und jahreszeitliche Unterteilung der Niederschlagsmeßfehler	77
6.2.1	Mittlerer Jahresgang des Niederschlagsmeßfehlers	78
6.2.2	Mittlere Jahreswerte der Niederschlagsmeßfehler	81
6.2.3	Regionalisierung des Meßfehlers nach niederschlagsklimatologischen Kriterien	84
7	Schlußbemerkungen	89
	Danksagung90
	Literaturverzeichnis91

Vorwort

Die Bestimmung der geräte- und aufstellungsbedingten systematischen Fehler konventioneller Niederschlagsmessungen ist seit langem Gegenstand hydrometeorologischer Untersuchungen im In- und Ausland. Anlaß hierzu bietet nicht zuletzt die ständig steigende Beanspruchung des natürlichen Wasserdargebots besonders in den Bereichen der Wirtschaft und der privaten Haushalte. Dies macht für die langfristige Bewirtschaftung der Wasserressourcen ebenso wie für wasserwirtschaftliche Rahmenplanungen oder die Steuerung und Bemessung wasserwirtschaftlicher Anlagen auch die genaue Kenntnis der tatsächlich aus dem Niederschlag verfügbaren Wassermengen erforderlich.

Speziell den bei der Messung des Niederschlags in einer nicht vernachlässigbaren Größenordnung entstehenden Fehlern und deren Beseitigung durch ein praktikables Korrekturverfahren sind die Ausführungen der vorliegenden Arbeit gewidmet. Aus der Analyse mehrjähriger Vergleichsmessungen wurden einfache Beziehungen zwischen der Niederschlagshöhe und den fehlerverursachenden Einflußfaktoren entwickelt und flächendeckend für das Gebiet der Bundesrepublik Deutschland erprobt. Das Ergebnis ermöglicht es, zunehmenden Anforderungen der Praxis nach korrigierten Niederschlagshöhen nachzukommen und diese in beliebiger zeitlicher Auflösung vom Tageswert bis zum langjährigen Mittelwert sowohl punktuell als auch als Gebietsmittel zur Verfügung zu stellen.

Zusammenfassung

Ausgehend von über 10jährigen Niederschlagsvergleichsmessungen im Bodenniveau und speziellen Untersuchungen zum Benetzungsverlust wurde ein Verfahren zur Korrektur der systematischen Fehler des Hellmann-Niederschlagsmessers in Standardaufstellung entwickelt. Primäre Grundlagen hierfür bildeten die deutlich ausgeprägten Zusammenhänge zwischen der Größe der Meßfehler und der täglichen Niederschlagshöhe. Der Einfluß der Windgeschwindigkeit wird durch die Unterteilung der Stationslagen nach der Windexposition von frei bis stark geschützt und durch eine differenzierte Auswertung der Meßfehler nach Niederschlagsarten berücksichtigt.

Das Korrekturverfahren wurde flächendeckend für die Bundesrepublik Deutschland getestet und zur Festlegung von Gebieten mit einheitlichem Fehlerverhalten der Niederschlagsmessungen genutzt. Die regionale Verteilung der wichtigsten beeinflussenden Niederschlagsparameter und die Größe des Fehlers bei mäßig geschützter Stationslage ist auf Übersichtskarten dargestellt. Eine Einteilung nach Gebieten mit vergleichbaren Niederschlagskorrekturverhalten wird angegeben.

Abstract

Basing on precipitation comparison measurements at ground level over 10 years and special investigations of wetting losses a method is developed for the correction of systematic errors of the Hellmann precipitation gauge in standard position. The main basis for this method is the good connection between the size of measuring errors and the daily precipitation amounts. The wind speed influence is taken into consideration by a classification ranging from free site positions to strongly sheltered ones and by a detailed analysis of the error dependence on the type of precipitation.

The correction method is tested for the complete area of the Federal Republic of Germany and used to define regions with the same precipitation errors. Views of the regional distribution of the most important influencing precipitation parameters and the error amounts in a moderately sheltered site position are presented on maps. A subdivision in regions with comparable correction factors for precipitation is given.

1 Einleitung

Eine wesentliche Grundlage für die bedarfsgerechte Steuerung und Bewirtschaftung der Naturressource Wasser bildet die genaue Kenntnis des aus dem Niederschlag verfügbaren Wasserdargebotes einschließlich seiner räumlichen und zeitlichen Verteilung. Die notwendigen Informationen hierüber werden hauptsächlich aus punktförmigen Messungen gewonnen, die in zunehmendem Maße Ergänzungen aus Radar- und Satellitenmessungen erfahren.

Die weltweit zur Niederschlagserfassung eingesetzten Niederschlagsmesser weisen in ihrer Konstruktion erhebliche Unterschiede auf, was zwangsläufig die Vergleichbarkeit der Meßergebnisse erschwert. Hinzu kommt, daß alle Meßgeräte je nach Bauart, Material und Aufstellungsbedingungen mehr oder weniger mit systematischen Meßfehlern behaftet sind. Forderungen nach weitgehend fehlerfreien Niederschlagsmeßwerten sind somit nur durch gezielte Untersuchungen zur genauen Bestimmung der einzelnen Fehlergrößen und deren Beseitigung mit Hilfe von Korrekturverfahren zu erfüllen. Hierzu gibt es in der Literatur eine große Anzahl von Mitteilungen, worüber besonders die von SEVRUK (1981, 1982, 1986) herausgegebenen Publikationen und Berichte und die darin enthaltenen Literaturzitate und Zusammenfassungen einen umfassenden Überblick vermitteln. Die Vielfalt der im Zusammenhang mit der Niederschlagsmessung zur Lösung anstehenden Probleme reicht dabei von der nationalen und internationalen Vergleichbarkeit der Meßergebnisse unterschiedlicher Meßgeräte und Meßmethoden über die systematischen Meßfehler der Meßgeräte bis hin zur Übertragbarkeit der punktuell gemessenen Niederschlagshöhen auf die Fläche.

Speziell zum systematischen Meßfehler ist festzustellen, daß die Mehrzahl der Untersuchungen jeweils nur auf einen Teil der zu berücksichtigenden Fehlerquellen, wie sie in ihrer Gesamtheit bei SEVRUK (1981) dargestellt werden, ausgerichtet sind. Umfassende Untersuchungen der meßmethodischen und aufstellungsbedingten Fehler und deren zusammenfassende Darlegung in einer praktikablen Methodik zur Korrektur gemessener Niederschlagshöhen sind u.a. von GOLUBEV (1980), KARBAUM (1969), MADSEN (1977), LEMMELÄ und SOLTANTIE (1977) und SEVRUK (1981) vorgestellt und in einer vergleichenden Untersuchung von GRAF (1984) getestet worden. Die Ergebnisse aller Untersuchungen zeigen, daß aufgrund der unterschiedlichen Meßgeräte und Aufstellungshöhen und der klimatisch bedingten Unterschiede im Niederschlagsregime die Entwicklung eines generell anwendbaren Verfahrens zur Korrektur der systematischen Meßfehler wohl nicht möglich sein wird. Viel-

mehr ist das Augenmerk auf den Einsatz von Referenzgeräten und ein vergleichbares methodisches Herangehen an die Untersuchung der einzelnen Meßfehler zu richten, wie es beispielsweise von der WMO mit dem sogenannten "Pit Gauge" (SEVRUK u. HAMON, 1984, DEBRUIN, 1986) oder den Vergleichsmessungen zum festen Niederschlag mit dem DFIR-Niederschlagsmesser (GOODISON u.a., 1989) angeregt wurde. Verfahrensweise und Ergebnisse können dann optimal auf die jeweils netzmäßig betriebenen Niederschlagsmesser bezogen und zu einer zumindest im nationalen Rahmen nutzbaren Methodik weiterentwickelt werden.

Dieser Zielsetzung dienten auch die nachfolgend beschriebenen Untersuchungen zum systematischen Meßfehler des Hellmann-Niederschlagsmessers, die im wesentlichen auf die genaue Bestimmung der bei diesem Gerät insgesamt dominierenden Benetzungs- und Windverluste gerichtet waren. Dabei wurde das Hauptaugenmerk auf die Ermittlung der Meßfehler in Abhängigkeit von ihren bestimmenden Einflußgrößen und deren Zusammenfassung zu einer auf alle netzmäßig erfaßten Niederschlagsdaten anwendbaren Korrekturmethode gelegt. Ein solches Verfahren muß somit von vornherein auf Eingangsinformationen aufbauen, die routinemäßig zur Verfügung stehen oder ohne größeren Aufwand zu gewinnen sind. Hierin besteht wohl das größte Problem bei der Entwicklung allgemeingültiger Korrekturverfahren. Zwar sind mit Hilfe spezieller Untersuchungen die einzelnen Meßfehler in Abhängigkeit von anderen meteorologischen Größen physikalisch begründet darzustellen, die Nutzung entsprechender Korrekturfunktionen erfordert jedoch Meßdaten, die aus dem nebenamtlichen Niederschlagsmeßnetz generell nicht zur Verfügung stehen und an hauptamtlichen Stationen auch nur zum Teil routinemäßig erfaßt werden. Als Beispiel sei hier nur der Windfehler als Funktion der Windgeschwindigkeit in Aufstellungshöhe des Niederschlagsmessers genannt.

2 Meßprogramme

Aufbauend auf den Ergebnissen von KARBAUM (1969) wurden 1982 im Rahmen eines Forschungsprojektes des damaligen Forschungsinstitutes für Hydrometeorologie des Meteorologischen Dienstes der DDR weitere Untersuchungen zum Niederschlagsmeßfehler in Angriff genommen. Schwerpunkte waren die Gewinnung von Meßwerten zum Benetzungsfehler des Auffangtrichters und der Sammelkanne unter Feldbedingungen, die Durchführung von Beobachtungen zum Benetzungsumfang des Auffangtrichters bei Niederschlagsereignissen

und der Aufbau eines Meßnetzes von Niederschlagsmessern im Bodenniveau zur Erfassung des Windfehlers.

Die Messungen zum Benetzungsverlust erfolgten an der Hydrometeorologischen Forschungsstation Neuglobsow und die visuellen Beobachtungen des Benetzungsumfanges an vier weiteren Stationen. Erste Vergleichsmessungen im Bodenniveau wurden in Neuglobsow, Harzgerode und Putbus bereits 1977 aufgenommen. Zur Gewinnung der notwendigen Grundlagen für eine differenzierte Analyse des Einflusses der örtlichen Lagebedingungen auf den Windmeßfehler kamen im Zeitraum 1982/84 weitere 19 Stationen und 1988 bzw. 1992 nochmals 4 Stationen hinzu, so daß insgesamt Vergleichsmessungen von 26 Stationen vorliegen. Ergänzende Meßergebnisse zum Windfehler konnten mit je einer 3,0m²- und 0,3m²- Niederschlagswanne mit Registriereinrichtung in Neuglobsow sowie mit 0,3m²-Wannen in Harzgerode und Grünow gewonnen werden. Fernerhin wurden die von der WMO veranlaßten Vergleichsmessungen mit dem Tretjakov-Niederschlagsmesser mit Doppelzaun-Windschutz (Double Fence International Referenz - DFIR) an der Station Harzgerode zur Beurteilung der Windfehler herangezogen.

Ebenfalls zum Meßprogramm, wenn auch nicht mit unmittelbarem Bezug zur Niederschlagskorrektur, gehören die 1988 aufgenommenen komplexen Niederschlagsvergleichsmessungen an den Stationen Grünow, Neuglobsow, Harzgerode, Marienberg und Goldberg, letztere 1992 nach Boltenhagen verlegt. Die Aufgaben dieser Stationen umfassen neben den Messungen im Bodenniveau auch den Einsatz aller weiteren im nationalen Rahmen üblichen Niederschlagsmesser mit dem Schwerpunkt eines Vergleichs automatischer und konventioneller Meßtechnik. Harzgerode ist darüber hinaus mit einem umfangreichen internationalen Vergleichsprogramm ausgestattet.

3 Benetzungs- und Verdunstungsfehler

Eine dominierende Rolle für das Entstehen des systematischen Fehlers bei der Niederschlagsmessung spielen die Benetzungs- und Verdunstungsverluste. Zur Benetzung zählen hierbei die Verluste infolge der Befeuchtung des Auffangtrichters durch das Niederschlagsereignis und durch die nach der Niederschlagsmessung feucht bleibende Innenwandung der Sammelkanne und deren nachfolgende Abtrocknung. Der Verdunstungsverlust entsteht durch das Verweilen des Niederschlagswassers in der Sammelkanne bis zur nächsten Messung.

3.1 Benetzungsfehler des Auffangtrichters

Die Benetzung des Auffangtrichters ist als unvermeidbarer Fehler eines jeden Niederschlagsmessers konventioneller Bauart anzusehen. Bestimmend für seine Höhe sind die Hafteigenschaften der Auffangfläche und der dadurch bedingte maximal mögliche Verlust bei vollständiger Benetzung, der Umfang der Benetzung durch das jeweilige Niederschlagsereignis und die Häufigkeit von Ereignissen mit nachfolgender vollständiger Abtrocknung. Damit sind auch die erforderlichen Untersuchungspunkte zur Bestimmung des Benetzungsfehlers der Sammelkanne genannt.

3.1.1 Benetzungsverlust bei vollständiger Benetzung

Die Größe des Verlustes ist für die gesamte Innenfläche des Auffangtrichters experimentell durch Simulation eines Niederschlagsereignisses von definierter Höhe bei gleichzeitiger vollständiger Benetzung dieser Fläche zu bestimmen. Entsprechende Laboruntersuchungen von KARBAUM (1969) an 30 bereits im Feldeinsatz gewesenen Hellmann-Meßgeräten ergaben hierfür einen mittleren Benetzungsverlust von 0,15mm. Die unter Feldbedingungen in Neuglobsow durchgeführten Untersuchungen von je 99 Benetzungstests an 3 im Einsatz befindlichen Niederschlagsmessern lieferten mit 0,146 sowie 0,151 und 0,156mm im Mittel hiermit übereinstimmende Werte. Die Ergebnisse der Einzeltests bewegten sich zwischen 0,07 und 0,28mm, die Streuung um die Mittelwerte liegt bei 0,04mm. Gleichzeitig durchgeführte Aufzeichnungen des Witterungscharakters zum Zeitpunkt der Benetzung belegen, daß bei feucht-kühlem Wetter und bedecktem Himmel im Mittel deutlich kleinere Verluste auftraten als bei warmem und trocknerem Wetter und wechselnder Bewölkung. Eine dementsprechend getrennte Auswertung ergab Benetzungsverluste von $0,12 \pm 0,03$ und $0,18 \pm 0,04$ mm Höhe. Unter der Annahme, daß beim Auftreten von Niederschlagsereignissen die feucht-kühlen Witterungsbedingungen im gesamten Winterhalbjahr und ca. zur Hälfte auch im Sommerhalbjahr vorliegen, sind demnach bei voller Benetzung im Winterhalbjahr 0,12mm und im Sommerhalbjahr 0,15mm als mittlerer Benetzungsverlust pro abtrocknendem Niederschlagsereignis für den Hellmann anzusetzen.

Vergleichsuntersuchungen an weiteren in Neuglobsow im Einsatz befindlichen Niederschlagsmessern zeigen, daß diese Benetzungsverluste relativ hoch sind. Das liegt an dem

beim Hellmann sehr ungünstigen Verhältnis (R) zwischen der benetzbaren Innenfläche (F_B) des Trichters von 1510cm^2 und der Auffangfläche (F_A) von 200cm^2 , das mit $R = F_B / F_A = 7,55$ erheblich über dem anderer Meßgeräte liegt. Angaben zu den verglichenen Meßgeräten und den ermittelten Benetzungsverlusten enthält Tab.1. Dabei wurde auch die mittlere Haftwasserschichtdicke mitberechnet. Für den Hellmann ergibt sich beispielsweise aus dem Niederschlagsverlust von $0,15\text{mm}$ und der Auffangfläche von 200cm^2 eine Haftwassermenge von 3cm^3 , was bezogen auf die benetzbare Fläche einer Schichtdicke des Haftwassers von $0,020\text{mm}$ entspricht. In dieser Hinsicht weist der Hellmann somit die günstigsten Meßbedingungen auf. Im Vergleich hierzu hat die aus Eisenblech gefertigte und mit Silberbronze gestrichene $3,0\text{m}^2$ -Wanne entsprechend ihrer hohen Rauigkeit der Oberfläche die größte Haftwasserschichtdicke. Trotzdem tritt mit $0,055\text{mm}$ der geringste Verlust pro voller Benetzung auf, da die benetzbare Trichterfläche nur um das 1,5 fache größer als die Auffangfläche ist. Das Verhältnis zwischen Auffangfläche und Trichterfläche ist somit im gleichen Maße wie die Hafteigenschaften des Auffangtrichters für einen möglichst geringen Benetzungsverlust wichtig.

3.1.2 Benetzungsumfang bei Niederschlagsereignissen

Visuelle Beobachtungen zeigen, daß insbesondere bei kleineren Niederschlagsereignissen nur ein Teil der Innenfläche des Auffangtrichters naß wird. Danach ergibt eine einfache Berechnung der Benetzungshöhe aus der Anzahl der abtrocknenden Niederschlagsereignisse und dem Verlust bei voller Benetzung (KARBAUM, 1970 a,b) einen zu hohen Betrag. Vielmehr ist zur Bestimmung des tatsächlichen Benetzungsverlustes auch der jeweilige Benetzungsumfang mit zu berücksichtigen. Zu seiner Erfassung diente ein an mehreren Stationen (Harzgerode, Neuglobsow, Grünow, Aue und Zehdenik) durchgeführtes Beobachtungsprogramm, bei dem jeweils unmittelbar nach den Niederschlagsereignissen Schätzungen der prozentualen Benetzung des Auffangtrichters in 10%-Stufen erfolgten. Weiterhin wurden die Höhe und Andauer des Niederschlagsereignisses und die Windgeschwindigkeit mitbestimmt und zur weiteren Auswertung herangezogen.

Dabei ergaben sich nur zur Höhe der Niederschlagsereignisse gut erkennbare Zusammenhänge. Trotz großer Streuung der Einzelbeobachtungen und der aus den subjektiven Schätzungen bedingten Unsicherheiten läßt sich bei klassenweiser Mittelung der rund 200 Beob-

Tab.1: Aufstellungshöhe (h), Größe der Auffangfläche (F_A) und der benetzbaren Innenfläche (F_B), Benetzungsverhältnis (R), Anzahl der Benetzungstests (n), Benetzungsverlust (B) und Haftwasserschichtdicke (D) der untersuchten Niederschlagsmeßgeräte an der Forschungsstation Neuglobsow

	h m	F_A cm ²	F_B cm ²	R -	n -	B mm	D mm
Hellmann Standard	1,0	200	1510	7,55	99	0,151	0,020
Hellmann mit Nipherschuttring	1,0	200	1510	7,55	99	0,156	0,021
Hellmann im Bodenniveau	0,0	200	1510	7,55	99	0,146	0,019
Hellmann-Regenschreiber	1,15	200	865	4,33	50	0,121	0,028
Gebirgsregennmesser	1,0	500	1980	3,96	61	0,124	0,031
Gebirgsregennmesser im Bodenniveau	0,0	500	1980	3,96	61	0,099	0,025
0,3 m ² -Niederschlagswanne	0,0	3000	7120	2,37	80	0,058	0,025
3,0 m ² -Niederschlagswanne	0,0	30000	45000	1,50	28	0,055	0,037

achtungen eine deutliche Zunahme der prozentualen Benetzung mit der Niederschlagshöhe erkennen. Der auf Abb.1 dargestellte Kurvenverlauf wurde graphisch interpoliert. Danach liegt die Benetzung bei Niederschlagsereignissen von 0,0mm Höhe (<0,05mm) im Durchschnitt nur bei 20%, steigt bis 0,5mm Höhe auf rund 50% an und erreicht erst bei 3 bis 4mm Höhe 100%. Die Streuung der Einzelbeobachtungen um die Bezugskurve beträgt $\pm 15\%$, womit auch gleichzeitig eine Aussage über die statistische Sicherheit einer weiteren Anwendung der Beobachtungsergebnisse gegeben ist.

3.1.3 Häufigkeit der Höhe von Niederschlagsereignissen

Zur Bestimmung des tatsächlichen Benetzungsverlustes in Abhängigkeit vom Benetzungsumfang ist somit neben der Anzahl auch die Häufigkeitsverteilung der Höhe der abtrocknenden Niederschlagsereignisse zu berücksichtigen. Hierzu bedarf es ereignisbezogener Auswertungen von Niederschlagsregistrierungen, die routinemäßig nicht vorliegen und im Falle spezieller Regenschreiberauswertungen wegen der hohen Verdunstungsverluste bei der Beheizung im Winter auch nur für die wärmere Jahreszeit zuverlässige Ergebnisse liefern.

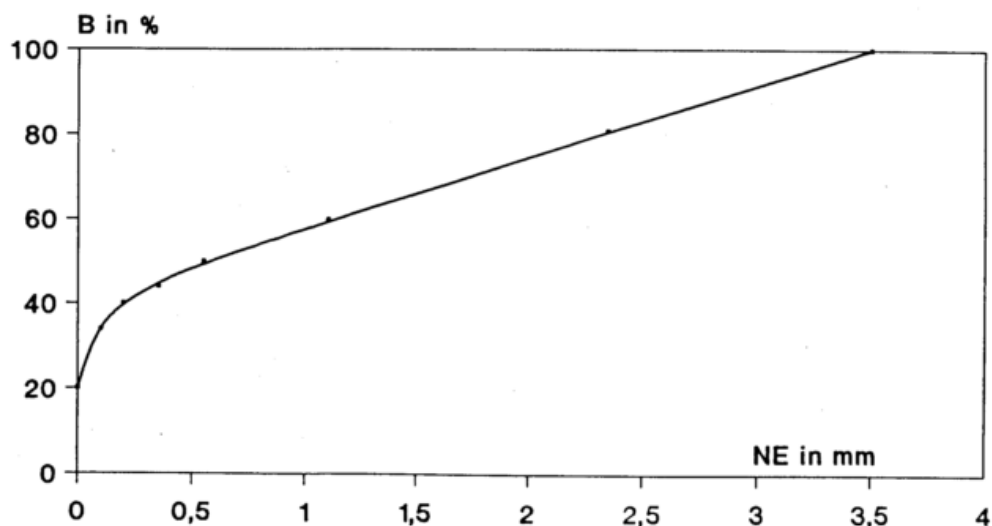


Abb.1: Mittlere Zunahme der prozentualen Benetzung (B) des Auffangtrichters mit der Höhe des Niederschlagsereignisses (NE)

Nach den Untersuchungen von KARBAUM (1969) kann von einer abtrocknenden Benetzung ausgegangen werden, wenn im Sommerhalbjahr 20 Minuten und im Winterhalbjahr 1,5 Stunden Zeitdifferenz zwischen zwei Niederschlagsereignissen liegen. Zur Gewinnung bedarfsgerechter Informationen konnte auf eine umfassende Auswertung der langjährigen Registrierungen der 3m²-Niederschlagswanne an der Forschungsstation Neuglobsow zurückgegriffen werden. Diese trichterförmige, im Bodenniveau installierte Wanne ist unterkellert und mit einer Registriervorrichtung mit Waldaipegel zur Aufzeichnung der Niederschlagshöhe im Verhältnis 10:1 ausgerüstet (RICHTER, 1975). Sie wird ganzjährig betrieben, wobei das Abtauen von Schneefällen durch Erwärmung der Niederschlagswanne mittels Infrarotstrahlern von der Unterkellerung her erfolgt. Der hochempfindliche Schwimmerschreibpegel spricht bereits auf Niederschlagshöhen <0,05mm an und liefert sehr saubere und für spezielle Untersuchungen gut geeignete Aufzeichnungen des Niederschlagsverlaufs (RICHTER, 1989). Eine sowohl für das ganze Jahr als auch für das Sommer- und Winterhalbjahr getrennt durchgeführte Häufigkeitsauszählung der Höhe der Niederschlagsereignisse unter Berücksichtigung der jeweiligen Abtrocknungszeiten führte zu der auf Abb.2 dargestellten Verteilung in Form relativer Summenhäufigkeiten. Danach sind beispielsweise 51% aller meßbaren Niederschlagsereignisse nicht größer als 0,5mm und 84% betragen $\leq 3,0$ mm.

Das bedeutet gemäß Abb.1, daß für die Hälfte aller Niederschlagsereignisse auch der Auffangtrichter im Durchschnitt nur bis zu 50% benetzt wird und wahrscheinlich nur in weniger als 16% aller Fälle eine völlige Benetzung des Auffangtrichters erfolgt. Die Unterschiede zwischen Sommer- und Winterhalbjahr sind dabei relativ gering und machen sich nur bei Niederschlagshöhen bis 0,2mm mit größeren Häufigkeiten im Winterhalbjahr und ab über 5,0mm mit größeren Häufigkeiten im Sommerhalbjahr etwas stärker bemerkbar. Im dazwischen gelegenen Bereich ist ein nahezu paralleler Verlauf der Summenhäufigkeiten gegeben.

3.1.4 Benetzungsverluste des Auffangtrichters

Aus der Häufigkeitsverteilung der Höhe von Niederschlagsereignissen und des dabei auftretenden wahrscheinlichen Benetzungsumfanges gemäß Abb.1 und 2 ist nun in Form einer gewichteten Mittelung zu berechnen, daß für alle Niederschlagsereignisse $\geq 0,1$ mm der Auffangtrichter wahrscheinlich nur zu durchschnittlich 58% benetzt wird. Die Unterschiede

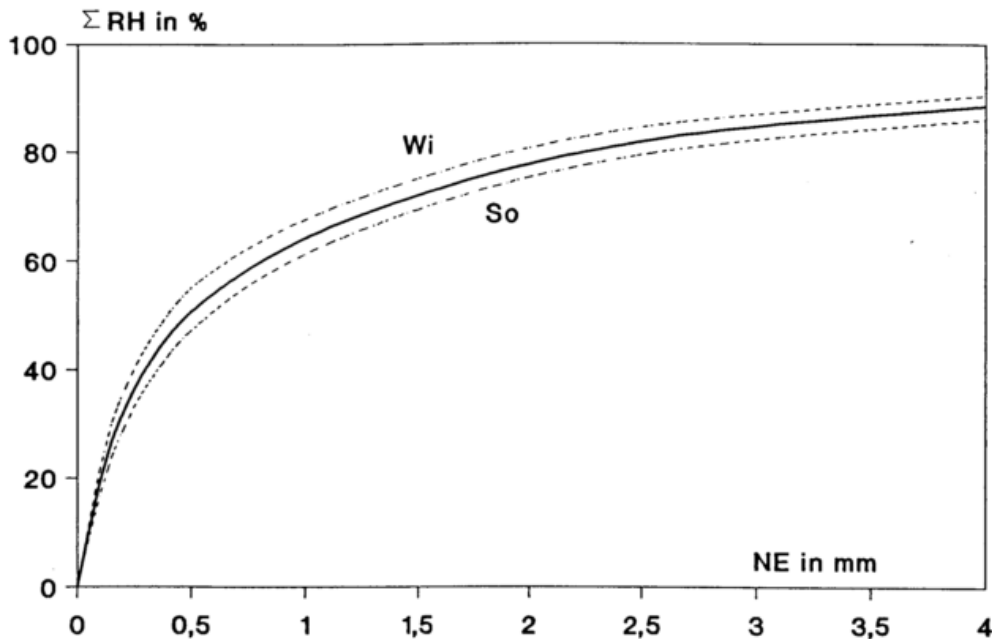


Abb. 2: Relative Summenhäufigkeit (ΣRH) der Höhe von Niederschlagsereignissen (NE) Neuglobsow 1969/1981: Jahresmittel sowie Sommerhalfjahr (So) und Winterhalfjahr (Wi)

zwischen Sommer- und Winterhalfjahr sind dabei mit 60 bzw. 56% nur gering. Bezogen auf den ermittelten Niederschlagsverlust von 0,15mm bzw. 0,12mm bei voller Benetzung ist somit im Sommerhalfjahr mit 0,090mm und im Winterhalfjahr mit 0,067mm Niederschlagsverlust pro abtrocknendem Niederschlagsereignis zu rechnen.

Mit diesem Ergebnis sind zumindest Anhaltswerte für eine Korrektur des Benetzungsfehlers gegeben. Nicht berücksichtigt sind hierbei die Verluste, die bei Ereignissen von 0,0mm Höhe entstehen. Über die Häufigkeit dieser Ereignisse gibt es keine direkt auswertbaren Aufzeichnungen, da diese auf Niederschlagsregistrierungen nicht erkennbar sind und die täglichen Messungen auch keine Rückschlüsse auf die Ereignishäufigkeit zulassen. So wurde versucht, entsprechende Informationen auf indirektem Wege zu gewinnen. Eine gute Grundlage hierfür lieferten die von BAUER u.a. (1978) mitgeteilten Auswertungen zur Häufigkeit von Niederschlagsereignissen aus Aufzeichnungen zum täglichen Witterungsverlauf, durchgeführt für insgesamt 37 hauptamtliche Meteorologische Stationen der DDR für den 10jährigen Zeitraum 1956/65. Diese unter Beachtung der Abtrocknungszeiten vorgenommenen Auszählungen umfassen alle vermerkten Niederschlagsereignisse unabhängig von ihrer Höhe und Intensität, also einschließlich der Ereignisse von 0,0mm. Verglichen mit den von Neuglobsow und einigen weiteren Stationen für das Sommerhalfjahr vorliegenden Auswertungen

von Regenschreiberstreifen mit Ereignissen $\geq 0,1\text{mm}$ (Tab.2) ist die Anzahl der alle Ereignisse umfassenden Auszählung um etwa die Hälfte größer. Vorausgesetzt die Stichproben sind annähernd repräsentativ, hat somit ca. ein Drittel aller Niederschlagsereignisse nur eine Höhe von $0,0\text{mm}$.

Ein vergleichbares Ergebnis kann aus der Darstellung der mittleren jährlichen Häufigkeitsverteilung der Höhe der Niederschlagsereignisse von Neuglobsow (Abb.3) abgeleitet werden. Durch Extrapolation der Verteilungskurve ist für eine Niederschlagshöhe von $0,0\text{mm}$ auf eine wahrscheinliche Anzahl von 150 bis 170 Ereignisse pro Jahr zu schließen. Bei durchschnittlich 350 gemessenen Ereignissen $\geq 0,1\text{mm}$ und damit einer Gesamtzahl von 500 bis 520 Ereignissen pro Jahr liegt somit der Anteil der Ereignisse mit $0,0\text{mm}$ bei 30 bis 33%. Das Ergebnis wird auch dadurch gestützt, daß die Auszählungen für die bereits genannten 37 Stationen ebenfalls mittlere Jahressummen zwischen 450 und 600 Ereignissen ergaben, deren Mittel über alle Stationen bei 507 pro Jahr liegt.

Eine Annahme von $0,0\text{mm}$ für rund ein Drittel aller Niederschlagsereignisse erscheint demnach gerechtfertigt. Ihre Berücksichtigung zu jeweils 20% Benetzung des Auffangtrichters

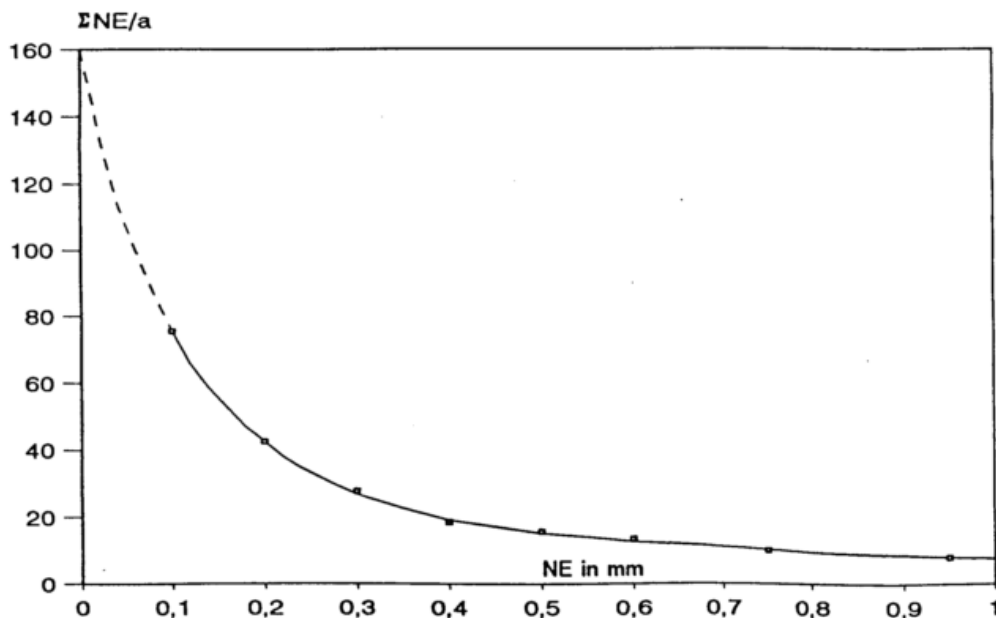


Abb.3: Mittlere jährliche Anzahl der Niederschlagsereignisse ($\Sigma NE/a$) für Niederschlagshöhen von $0,1$ bis $1,0$ mm (--- extrapolierte Bereich)

Tab.2: Mittlere Häufigkeit abtrocknender Niederschlagsereignisse, Mai bis Oktober,

a) für $N \geq 0,1$ mm, b) einschließlich 0,0 mm Niederschlagshöhe (nach BAUER u.a., 1978)

a)Stationen	Reihe	Mai	Juni	Juli	Aug.	Sept.	Okt.	Summe
Neuglobsow	1968/84	29,3	28,5	26,5	21,4	22,1	25,8	153,6
Schwerin	1956/65	31,1	30,6	44,4	44,4	29,9	30,8	211,2
Neustrelitz	1956/65	40,2	26,5	41,9	40,1	27,3	29,0	205,0
Trebbin	1973/83	31,1	33,3	29,3	27,0	26,2	32,1	179,0
Görlitz	1972/81	29,9	35,5	44,5	31,8	31,7	30,4	203,8
Chemnitz	1972/81	38,2	36,9	42,5	30,7	30,2	28,4	206,9
Harzgerode	1976/84	35,6	36,6	33,9	31,0	31,1	29,4	197,6
Mittel		33,6	32,6	37,6	32,3	28,4	29,4	193,9
b)Gebietsmittel								
DDR-Tiefland	1956/65	53,3	44,3	57,4	53,4	39,4	35,7	283,5

gemäß Abb.1 führt zu einer Verringerung des gewichteten Mittels der Benetzung von 58% bei Ereignissen $\geq 0,1\text{mm}$ auf 46% für alle Ereignisse.

Ausgehend von den jeweils für die volle Benetzung festgestellten Verlusten von 0,15mm im Sommerhalbjahr und 0,12mm im Winterhalbjahr und annähernd gleichen Ereignishäufigkeiten in beiden Halbjahren (Abb.2) ergibt sich aus 350 Ereignissen $\geq 0,1\text{mm}$ und 58% mittlerer Benetzung ein Jahresverlust von 27,4mm Niederschlagshöhe. Bei einer Gesamtzahl von rund 500 Ereignissen und 46% mittlerer Benetzung sind es 31,1mm, was dem zu erwartenden höheren Verlust von 4,0mm aus 150 Ereignissen mit 20% Benetzung entspricht.

In bezug auf die durchschnittlichen Jahressummen der Niederschlagshöhe der untersuchten 37 Stationen des Nordostdeutschen Tieflandes und der nach Süden hin anschließenden Mittelgebirge bedeutet dieses Ergebnis einen Niederschlagsverlust durch die Benetzung des Auffangtrichters zwischen 6,6 und 4,7%, der in den höheren Lagen der Mittelgebirge auf unter 3% zurückgeht. Letzteres wird durch die erheblich zunehmende Niederschlagshöhe bei relativ geringem Anstieg der Ereignishäufigkeit bewirkt. Der mittlere Jahresgang des prozentualen Verlustes ist getrennt für 31 Tiefland- und 6 Mittelgebirgsstationen auf Abb.4 dargestellt. Bemerkenswert ist der Verlauf in den Sommermonaten, in denen trotz einer größeren

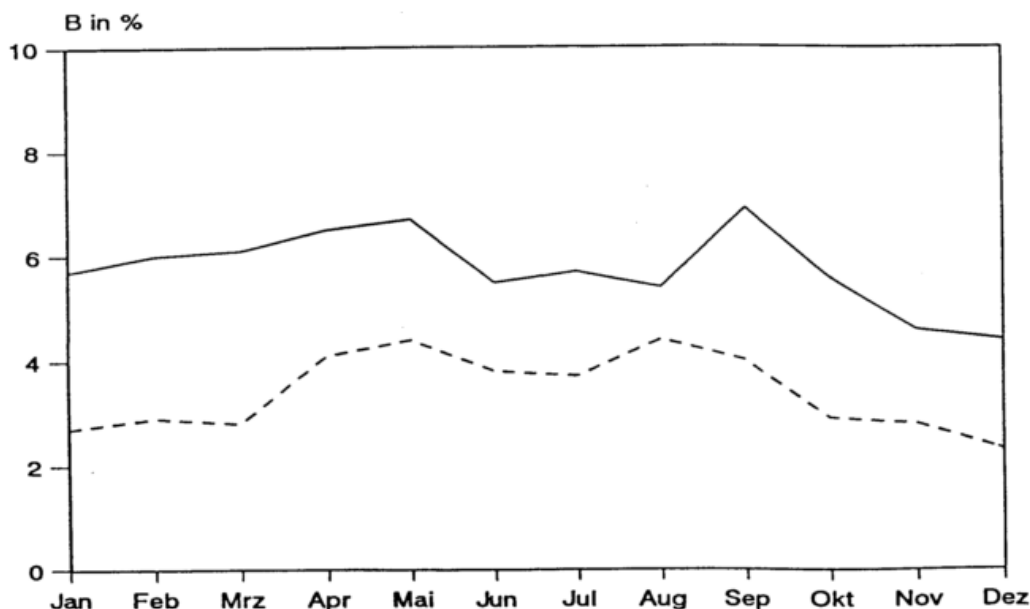


Abb.4: Mittlerer Jahresgang der prozentualen Benetzungsverluste (B) des Auffangtrichters für Tiefland- (—) und Mittelgebirgsstationen (- -)

Anzahl von Ereignissen auf Grund der dabei fallenden höheren Niederschläge der prozentuale Fehler zurückgeht, während im September bei nur durchschnittlicher Niederschlagshäufigkeit und geringerer Niederschlagshöhe bei den Tieflandstationen der relativ größte Verlust auftritt.

3.2 Benetzungs- und Verdunstungsfehler der Sammelkanne

3.2.1 Benetzungsfehler der Sammelkanne

Neben dem Auffangtrichter ist auch die Sammelkanne mit einem geringen Benetzungsfehler behaftet. Diesbezügliche Untersuchungen durch Eingabe definierter Niederschlagshöhen in vorher völlig ausgetrocknete Sammelkannen und anschließender Messung ergaben mittlere Verluste von 0,022mm pro Messung. Da bei der Größe der Sammelkanne mit einer Grundfläche von 112cm² und einer durchschnittlichen Höhe der Tagessummen des Niederschlages von ca.3mm einschließlich der beim Entleeren benetzten Kannenwandung nur zwischen 150 und 200 cm² der Innenfläche der Kanne naß werden, steht dieser Betrag in einem übereinstimmenden Verhältnis zum Benetzungsverlust des 1510cm² großen Auffangtrichters. Die wahrscheinliche Haftwasserschichtdicke berechnet sich danach zu 0,017 bis 0,022mm und paßt sich gut in die in Tab.1 mitgeteilten Ergebnisse ein.

Voll wirksam wird dieser Verlust allerdings nur dann, wenn nach der Kannenentleerung bis hin zum nächsten Niederschlagsereignis auch tatsächlich eine völlige Austrocknung der Kanne stattfindet. Dies ist in den Wintermonaten nicht gegeben und trifft auch in den Sommermonaten nur für Abtrocknungszeiten von wenigstens einem Tag zu. Unter Berücksichtigung dieser Aspekte und der durchschnittlichen Anzahl von 15 Niederschlagstagen pro Monat ergeben sich nur sehr geringe Verluste, deren prozentuale Beträge in Tab.3 zusammen mit der Benetzung des Auffangtrichters und der Verdunstung aus der Sammelkanne angegeben sind.

3.2.2 Verdunstungsverluste aus der Sammelkanne

Da der Niederschlag bis zur nächsten Messung in der Sammelkanne verbleibt, entsteht besonders in den Sommermonaten auch ein gewisser Verdunstungsverlust. Zu seiner Berücksichtigung dienen die Einschätzungen von SEVRUK (1981), der für den Hellmann von

Tab.3: Mittlerer Jahresgang der Benetzungs- und Verdunstungsfehler des Hellmann-Niederschlagsmessers (in %) für Tiefland- (T) und Mittelgebirgsstationen (M)

	Verlustgröße	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr
T	Benetzung Trichter	5,1	5,4	5,5	6,5	6,7	5,5	5,7	5,4	6,9	5,6	4,6	4,0	5,6
	Benetzung Kanne	-	-	0,2	0,3	0,4	0,4	0,4	0,4	0,3	0,2	-	-	0,3
	Verdunstung Kanne	-	-	0,1	0,5	1,0	1,3	1,4	1,4	1,3	0,6	-	-	0,8
	Gesamtverlust	5,1	5,4	5,8	7,3	8,1	7,2	7,5	7,2	8,5	6,4	4,6	4,0	6,7
M	Benetzung Trichter	2,4	2,6	2,5	3,9	4,3	3,8	3,7	4,4	4,0	2,9	2,7	2,1	3,3
	Benetzung Kanne	-	-	0,2	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,2	-	-	0,2
	Verdunstung Kanne	-	-	-	0,1	0,3	0,6	0,7	0,6	0,5	0,1	-	-	0,2
	Gesamtverlust	2,4	2,6	2,7	4,3	4,9	4,7	4,7	5,3	4,8	3,2	2,7	2,1	3,7

einem vernachlässigbar kleinen mittleren Jahresbetrag von unter 1% ausgeht, und die von KARBAUM (1979) angegebenen Beziehungen zum Sättigungsdefizit. Letztere bildeten die Grundlage für Berechnungen, bei denen entsprechend der tageszeitlichen Verteilung des Auftretens von Niederschlag davon ausgegangen wurde, daß das Niederschlagswasser eine mittlere Verweildauer von 17 Stunden in der Sammelkanne hat. Da der größte Teil davon Nachtstunden sind, also eine Zeit mit geringerem Sättigungsdefizit, muß bei der Berechnung auch ein entsprechend reduzierter Tagesmittelwert des Sättigungsdefizits zum Ansatz gebracht werden. Dies führte zu den in Tab.3 mit angegebenen Verdunstungsverlusten, deren Prozentangabe sich ebenfalls auf die mittlere Niederschlagshöhe der weiter oben genannten 37 Stationen bezieht. Der mittlere Jahresbetrag von 0,8% entspricht dabei den Ergebnissen von SEVRUK und HAMON (1984).

3.3 Gesamtfehler durch Benetzung und Verdunstung

Durch Zusammenfassung der Teilfehler (Tab.3) ergibt sich nun der wahrscheinliche Gesamtverlust durch Benetzung und Verdunstung im Gebiet des Nordostdeutschen Tieflandes und der südlich anschließenden Mittelgebirge. Die Ergebnisse sind allerdings wegen des prozentualen Bezuges zu den hier fallenden Niederschlagshöhen nicht direkt auf andere Gebiete übertragbar.

Bessere Möglichkeiten einer weitergehenden Nutzung ergeben sich, wenn nicht von den prozentualen, sondern von den realen Verlustbeträgen ausgegangen wird und diese beispielsweise in Beziehung zur jeweiligen Anzahl von Niederschlagstagen mit $N \geq 0,1\text{mm}$ gebracht werden. Die Häufigkeit solcher Tage wurde ebenfalls aus Daten von 38 gleichmäßig über das Nordostdeutsche Tiefland verteilten Stationen der Reihe 1951/80 bestimmt, die nicht in jedem Falle identisch mit den Stationen sind, die der Bestimmung der prozentualen Verluste zugrunde liegen. Werden beide Ergebnisse als annähernd repräsentativ angenommen, so ergeben sich aus den mittleren Monatssummen der Niederschlagshöhe (N), den prozentualen Benetzungs- und Verdunstungsverlusten (ΔB) und der Anzahl der Niederschlagstage (n) die mittleren Verluste (ΔN) pro Niederschlagstag (d_N) in mm gemäß Tab.4:

$$\Delta N = N(\Delta B/100)/n \quad \text{in mm}/d_N.$$

Tab.4: Mittlerer Jahresgang der Niederschlagshöhe (N) für 38 Stationen des Nordostdeutschen Tieflandes, mittlere Benetzungs- und Verdunstungsverluste (ΔB) in %, mittlere Anzahl der Niederschlagstage n ($N \geq 0,1$ mm) und mittlerer Fehler ΔN in mm pro Niederschlagstag

	Jan	Feb	März	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr
N	38,9	30,9	35,2	42,3	53,2	66,8	67,4	63,5	46,9	42,4	43,6	45,4	576,5
ΔB	5,1	5,4	5,8	7,3	8,1	7,2	7,5	7,2	8,5	6,4	4,6	4,0	6,7
$n(N \geq 0,1)$	17,2	14,8	13,9	14,3	14,0	13,5	14,3	13,8	13,2	13,4	16,0	17,3	175,7
ΔN	0,12	0,11	0,15	0,22	0,31	0,36	0,35	0,33	0,30	0,20	0,13	0,10	0,22

Es besteht ein gut ausgeprägter Jahresgang mit erheblich höheren Verlusten im Sommerhalbjahr entsprechend der größeren Niederschlagshäufigkeit bei gleichzeitig geringerer Abtrocknungsdauer und der zusätzlichen Benetzungs- und Verdunstungsverluste aus der Sammelkanne. Im Mittel ist im Winter mit 0,14mm, im Sommer mit 0,31mm und im Jahresdurchschnitt mit 0,22mm Gesamtverlust pro Niederschlagstag zu rechnen.

Das Ergebnis bezieht sich auf langjährige Mittelwerte und ist auch nur dementsprechend nutzbar. Eine Anwendung auf konkrete Einzeltage sollte damit nicht erfolgen, da für diesen Fall auch die Anzahl und Höhe der Niederschlagsereignisse und der damit in Zusammenhang stehende Benetzungsumfang des Auffangtrichters und der Sammelkanne des betreffenden Tages mit zu beachten sind.

Zu dieser Problematik wurden ebenfalls Untersuchungen durchgeführt. Als Grundlage dienten die speziellen Auswertungen der 3m²-Niederschlagswanne von Neuglobsow, aus denen auch Informationen über die Zusammenhänge zwischen Häufigkeit und Höhe von Niederschlagsereignissen pro Niederschlagstag abgeleitet werden konnten. Die Ergebnisse einer Auszählung der Anzahl der Niederschlagsereignisse pro Niederschlagstag sind in Abhängigkeit von der Niederschlagshöhe getrennt für das Sommer- und Winterhalbjahr auf Abb.5 dargestellt. Sie zeigen, daß sich die größeren Tageswerte der Niederschlagshöhe im Mittel auch aus einer zunehmenden Anzahl von Ereignissen pro Tag zusammensetzen. Diese Zunahme reicht bis zu Tagessummen von ca. 5mm, während darüber hinaus ihre Anzahl mit 2,6 bis 2,7 pro Tag annähernd gleichbleibt.

Aus der mittleren Anzahl der Ereignisse pro Tag (Abb.5), der prozentualen Benetzung des Auffangtrichters pro Niederschlagsereignis (Abb.1), dem Benetzungsverlust bei voller Benetzung und der anteilmäßigen Berücksichtigung der sommerlichen Benetzungs- und Verdunstungsverluste der Sammelkanne (Tab.3) läßt sich nun auch ein auf die tägliche Niederschlagshöhe bezogener Gesamtverlust berechnen. Die Ergebnisse sind für vorgegebene Niederschlagshöhenstufen in Tab.5 enthalten, eine graphische Darstellung der Zusammenhänge zeigt Abb.6. Es ergeben sich deutliche Unterschiede zwischen Sommer- und Winterhalbjahr, wobei in beiden Fällen für Tageswerte ab ca. 9mm und mehr ein oberer Grenzwert erreicht wird, da dann im Mittel auch für die einzelnen Ereignisse dieses Tages der jeweils volle Benetzungs- und Verdunstungsverlust angenommen werden kann.

Der für das Sommer- und Winterhalbjahr über alle Niederschlagshöhen gemittelte Wert wurde entsprechend der relativen Häufigkeit der einzelnen Niederschlagshöhen gewichtet

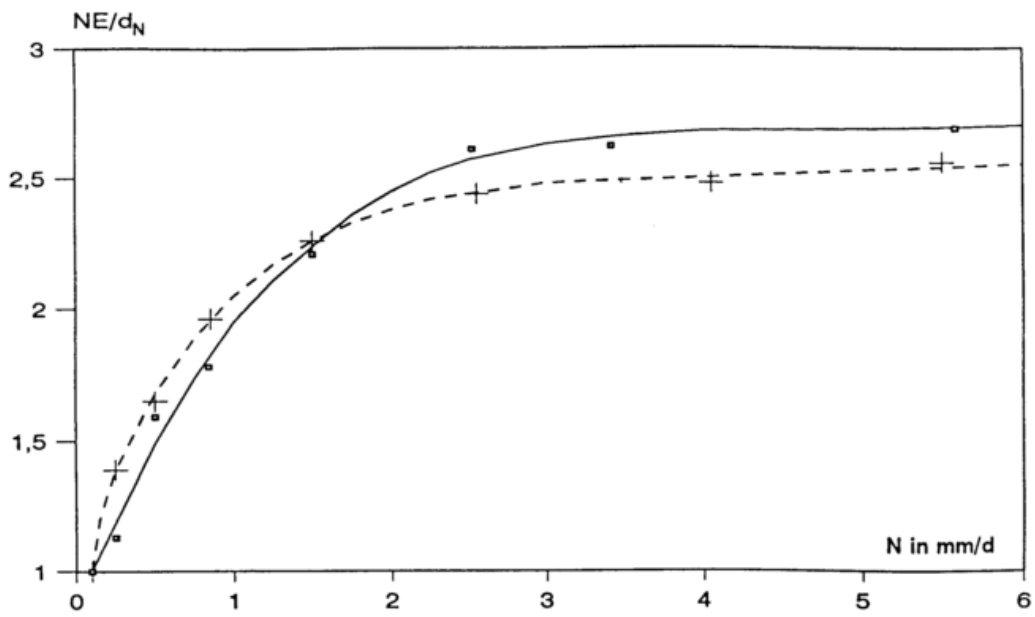


Abb.5: Mittlere Anzahl der Niederschlagsereignisse pro Niederschlagstag (NE/d_N) in Abhängigkeit von der Niederschlagshöhe (N), — Sommerhalbjahr, - - Winterhalbjahr

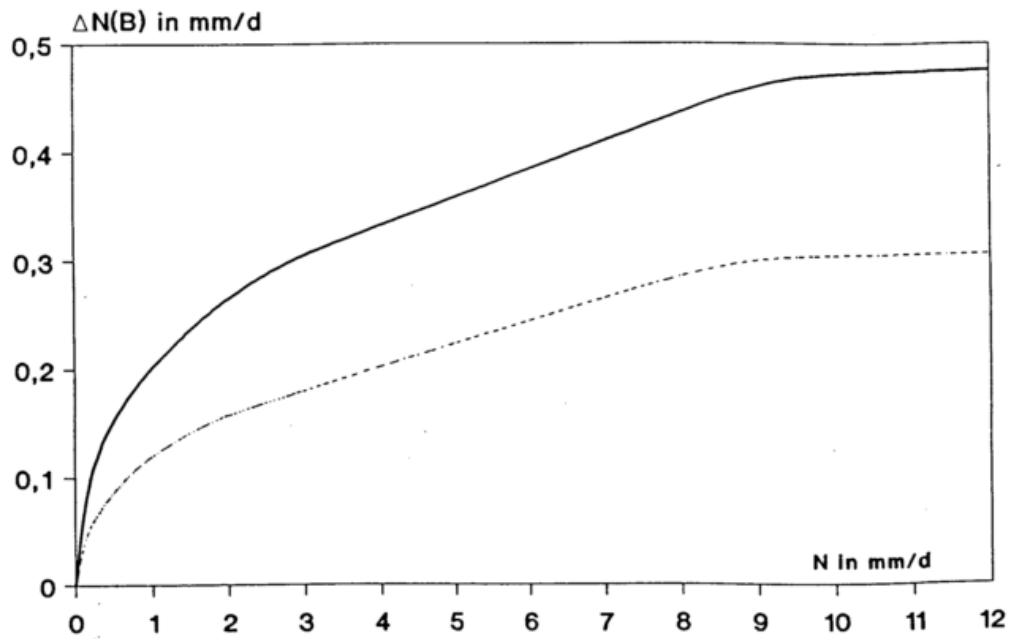


Abb.6: Mittlere Zunahme der Benetzungs- und Verdunstungsfehler $\Delta N(B)$ mit der täglichen Niederschlagshöhe (N), — Sommerhalbjahr, --- Winterhalbjahr

berechnet. Grundlage für die Auszählung der relativen Häufigkeiten bildeten die Daten der bereits genannten Tieflandstationen (1951/80) und die entsprechend der Niederschlagshöhe vorgegebenen Klassenbreiten. So ist beispielsweise der Niederschlagshöhe von 3,0mm die relative Häufigkeit aller Tagessummen zwischen 2,5 und 3,4mm zugeordnet.

Die berechneten mittleren Verluste des Sommer- und Winterhalbjahres (Tab.5) weichen mit 0,27 und 0,16mm nur geringfügig von den Werten ab, wie sie sich aus einer einfachen Mittelung der Angaben in Tab.4 ergeben, obwohl sie auf einem völlig anderen Wege gewonnen wurden. Im ganzjährigen Mittel besteht mit 0,22mm sogar eine völlige Übereinstimmung. Damit ist gewährleistet, daß auch bei einer Bestimmung des Benetzungs- und Verdunstungsverlustes aus täglichen Niederschlagshöhen gemäß Abb.6 letztlich ein mit langjährigen Mittelwertskorrekturen identisches Ergebnis erzielt wird.

Mit dieser Verfahrensweise ist ein Lösungsansatz gegeben, der, wie nachfolgend noch gezeigt wird, eine notwendige Voraussetzung für eine zusammengefaßte Betrachtung dieses Fehlers mit dem ebenfalls niederschlagshöhenabhängigen Windfehler darstellt. Der im Mittel zu 0,22mm pro Niederschlagstag festgestellte Verlust paßt sich gut in die Ergebnisse des von der WMO angeregten internationalen Vergleichs mit einem Referenzniederschlagsmesser im Bodenniveau ein, in dessen Rahmen an einigen Forschungsstationen Untersuchungen zum Benetzungs- und Verdunstungsfehler durchgeführt wurden (SEVRUK u. HAMON, 1984 Tab.18).

4 Windfehler

Durch die Aufstellung des Niederschlagsmessers in einer bestimmten Höhe über dem Bodenniveau stellt dieser ein Hindernis im Strömungsfeld des Windes dar und es entsteht beim Überströmen eine leichte Aufwärtskomponente in der Luftbewegung. Je nach Windgeschwindigkeit sowie Art und Struktur des Niederschlages wird dadurch ein Teil des Niederschlages über den Auffangtrichter hinweggeweht. Untersuchungen hierzu reichen bis in das 18te Jahrhundert zurück und sind in Form eines historischen Überblicks bei SEVRUK (1982) nachzulesen. Eine Betrachtung der physikalischen Ursachen des windbedingten Meßfehlers wurde von FOLLAND (1985) mitgeteilt.

Tab.5: Berechnung der Benetzungs- und Verdunstungsverluste (ΔB in mm) vom Hellmann-Niederschlagsmesser für das Sommer- und Winterhalbjahr in Abhängigkeit vom Tageswert der Niederschlagshöhe in mm, sowie der relativen Häufigkeit (RH) der Niederschlagshöhen in %

N-Klassen	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6-0,8	0,9-1,2	1,3-1,7	1,8-2,4	2,5-3,4	3,5-4,4	4,5-6,0	6,1-8,9	$\geq 9,0$	Mittel
$\Delta B(\text{So})$	0,07	0,11	0,13	0,15	0,16	0,18	0,20	0,24	0,27	0,31	0,34	0,36	0,41	0,47	0,27
$\Delta B(\text{Wi})$	0,04	0,06	0,07	0,08	0,09	0,10	0,12	0,14	0,16	0,18	0,20	0,22	0,26	0,30	0,16
RH	8	6	4	4	4	5	7	9	7	11	7	6	8	14	100

4.1 Untersuchungsgrundlagen

Die quantitative Bestimmung des Windfehlers erfolgt in der Regel durch Vergleichsmessungen, wobei mit dem Einsatz von Windschutzvorrichtungen oder der Aufstellung eines Vergleichs-Niederschlagsmessers im Bodenniveau zwei prinzipiell unterschiedliche Wege beschritten werden. Beide Maßnahmen haben zum Ziel, den Windeinfluß in Höhe des Auffangtrichters auf ein Minimum zu reduzieren und dadurch eine weitgehend unverfälschte Meßwerterfassung zu gewährleisten. Trotz vielfältiger technischer Verbesserungen der größtenteils eingesetzten Windschutzringe, auch durch Untersuchungen im Windkanal, sind die Meßergebnisse nicht mit denen im Bodenniveau identisch. Für flüssige Niederschläge ist die Aufstellung in einer Grube (Pit Gauge) zu bevorzugen, während für die Messungen von Mischniederschlägen und Schnee Windschutzvorrichtungen durchaus nützlich sind (SEVRUK,1982).

4.1.1 Vergleichsmessungen im Bodenniveau

Für die nachfolgend beschriebenen Untersuchungen zum Windfehler bildeten langjährige Vergleichsmessungen zwischen Hellmann-Niederschlagsmessern in Standardaufstellung und im Bodenniveau die Grundlage. Die Installation der Vergleichsgeräte erfolgte in einer runden, konusförmig ausgehobenen Grube von 0,55 m Tiefe, jeweils in möglichst 3 bis 4 m Entfernung vom Standardgerät, soweit dies die Meßfeldbedingungen zuließen. Eine Prinzipskizze hierzu zeigt Abb.7.

Die Messungen der Niederschlagshöhe wurden täglich um 7.00 Uhr MEZ durchgeführt und zur Kennzeichnung der Niederschlagsart mit einer Schlüsselziffer wie folgt versehen:

- 0 - kein Niederschlag gefallen
- 1 - Niederschlagshöhe $< 0,05$ mm (0,0 mm)
- 4 - flüssiger Niederschlag
- 7 - Schnee
- 8 - Mischniederschlag (Schnee und Regen zeitgleich oder abwechselnd gefallen)

Weitere Niederschlagsarten wie Hagel, Graupel oder abgesetzte Niederschläge wurden der Niederschlagsart 4 zugeordnet, da sie wie Regen einer vergleichsweise geringen Windbeeinflussung unterliegen und außerdem anteilmäßig für die Vergleichsergebnisse von untergeord-

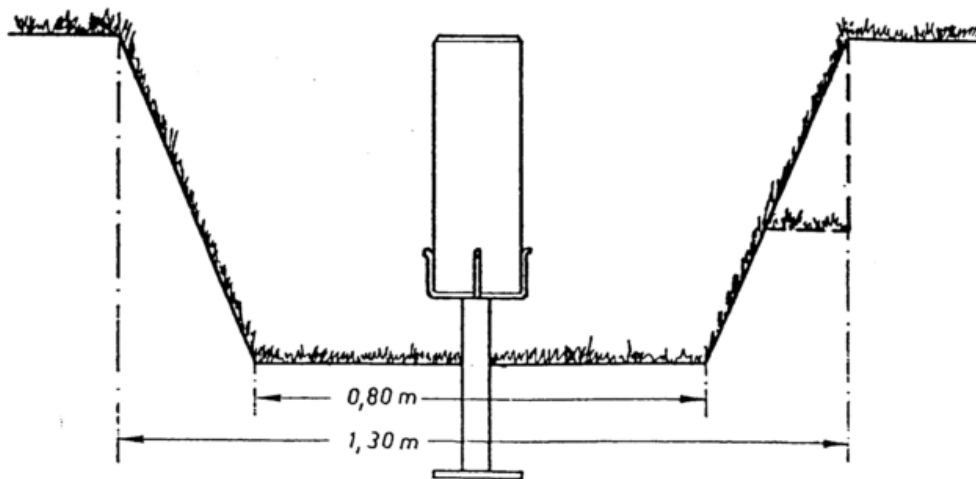


Abb.7: Aufbau eines Regenmessers im Bodenniveau (Prinzipskizze)

meter Bedeutung sind. Eine Einbeziehung der Windgeschwindigkeit oder weiterer meteorologischer Größen in die Untersuchungen erfolgte nicht, da, wie bereits einleitend hervorgehoben, das Auswertungskonzept eine mögliche Anwendung der Ergebnisse auch auf die Meßwerte aller nebenamtlichen Niederschlagsstationen vorsah und dementsprechende Informationen von diesen Stationen generell nicht zur Verfügung stehen.

Mit den 1977 in Putbus, Neuglobsow und Harzgerode aufgenommenen Vergleichsmessungen und dem zwischen 1982 und 1984 eingerichteten Netz weiterer 19 Stationen liegt inzwischen ein sehr umfangreiches Beobachtungsmaterial vor, dessen Auswertung eine gute Grundlage für die Analyse der Unterschiede zwischen Standardmessungen und Messungen im Bodenniveau bildet. Durch die Angabe der Niederschlagsarten konnten die Auswertungen getrennt nach Regen, Schnee und Mischniederschlag erfolgen. Die bestehenden Differenzen in den gemessenen Niederschlagshöhen sind dabei in guter Näherung als windbedingte Meßfehler des Standardgerätes anzusehen, obwohl auch bei der Aufstellung im Bodenniveau eine geringe Windbeeinflussung nicht in jedem Fall auszuschließen ist.

4.1.2 Bestimmung der Windexposition einer Meßstelle

Auf Grund der fehlenden Messungen der Windgeschwindigkeit war es erforderlich, den unterschiedlichen Windeinfluß an den einzelnen Stationen in indirekter Weise mit in die Untersuchungen einzubeziehen. Da das Netz der Vergleichsstationen entsprechend der historischen Entwicklung auf den nordost- und mitteldeutschen Raum begrenzt ist, kann zunächst davon ausgegangen werden, daß mit Ausnahme des unmittelbaren Ostsee-Küstenbereiches und der höheren Lagen der Mittelgebirge die Windgeschwindigkeiten im klimatologischen Mittel keine größeren regionalen Unterschiede aufweisen (DWD,1991). Demgegenüber werden die lokalen Windverhältnisse erheblich durch die unmittelbaren Umgebungsbedingungen des Niederschlagsmessers beeinflusst. Bereits in dem von BAUER u.a. (1978) entwickelten Verfahren zur Korrektur des Windfehlers bei Niederschlagsmessungen wurde aus diesem Grunde die mittlere Horizontabschirmung des Meßplatzes als charakteristische Größe eingeführt. Hierunter soll die durch Geländeerhebungen, Bewuchs und Bebauung bestehende, über den Horizont hinausragende Abdeckung des Himmelshalbraumes verstanden werden, die mit zunehmender Höhe eine Verringerung des Windeinflusses bewirkt. Als Maß kann die mittlere Höhe der Horizontabschirmung in Grad angegeben werden. Zu ihrer genauen Bestimmung ist eine nivellitische Rundumvermessung durchzuführen, aber auch durch eine einfache Peilung nach dem Prinzip des Försterdreiecks entsprechend den Empfehlungen für Betreiber von Niederschlagsstationen (DVWK,1993) kann eine angenäherte Aussage getroffen werden. In der Praxis dürfte es darüber hinaus auch erforderlich sein, in bestimmten Fällen auf visuelle Expositionseinschätzungen zurückgreifen zu müssen. Hierfür spricht die Tatsache, daß die Umgebungsbedingungen einer Meßstelle mehr oder weniger ständigen Veränderungen unterliegen und besonders bei längeren Meßreihen die weiter zurückliegenden Bedingungen nicht mehr exakt feststellbar sind. Insofern haben sowohl genaue Vermessungen als auch einfache Peilungen nur eine zeitlich begrenzte Gültigkeit.

Bei visuellen Einschätzungen ist es ausreichend, eine Unterscheidung in freie, sowie leicht, mäßig und stark geschützte Lage zu treffen. Die entsprechenden Umgebungsbedingungen lassen sich wie folgt charakterisieren:

- freie Stationslage: annähernd ebenes Gelände ohne wesentliche Horizontabschirmung, Bewuchs und Bebauung befinden sich im Mittel in einer Entfernung von mehr als das 10 bis 20fache ihrer Höhe

- leicht geschützte Stationslage: überwiegend durchbrochene Horizontabschirmung mit Bäumen und Gebäuden in durchschnittlich 5 bis 10facher Entfernung ihrer Höhe
- mäßig geschützte Stationslage: im wesentlichen geschlossene Horizontabschirmung durch Bewuchs und Bebauung in einer durchschnittlich 5fachen Entfernung ihrer Höhe
- stark geschützte Stationslage: geschlossene Horizontabschirmung durch Bewuchs und Bebauung in 2 bis 5facher Entfernung ihrer Höhe

Mit diesen Unterscheidungsmerkmalen ist eine leicht handhabbare Grundlage für die Bewertung von Niederschlagsmeßstellen bezüglich ihrer windbedingten Meßfehler gegeben. Sie wurde in dieser Form auch für die Unterteilung der Meßergebnisse der Vergleichsstationen und deren weitere Bearbeitung mit herangezogen. Eine prinzipiell vergleichbare Definition von Stationslagen wurde im nachhinein auch in den Erläuterungen zur Niederschlagskorrektur im Hydrologischen Atlas der Schweiz (KIRCHHOFER u. SEVRUK, 1992) gefunden.

4.1.3 Zuordnung der Niederschlags-Vergleichsstationen

Zur genauen Erfassung der Umgebungsbedingungen aller Vergleichsstationen erfolgte jeweils vom Standpunkt des Standard-Niederschlagsmessers aus eine genaue Vermessung der Horizontabschirmung mit einem Präzisions-Nivelliergerät. Dabei wurde sowohl eine detaillierte Einmessung aller umgebenden Erhebungen vorgenommen als auch für die näher gelegenen Bäume, Sträucher, Gebäude und Meßeinrichtungen auf dem Meßfeld die Entfernung zum Niederschlagsmesser bestimmt. So konnten in den weiteren Untersuchungen neben der Gesamthorizontabschirmung auch die Abschirmungen in einzelnen Richtungssektoren sowie ggf. besonders nahe stehende Objekte hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf die Meßergebnisse mit in Betracht gezogen werden.

Als zweites Merkmal der Expositionszuordnung dienten für alle Stationen die jeweils getrennt nach den Niederschlagsarten Regen (N_4), Schnee (N_7) und Mischniederschlag (N_8) sowie zusammengefaßt für alle Arten (N) berechneten mittleren prozentualen Unterschiede (ΔN) zwischen den Meßwerten des Boden- und Standard-Niederschlagsmessers:

$$\Delta N = 100 (N_{\text{Boden}} / N_{\text{Standard}}) - 100 \quad \text{in \%}$$

Darüber hinaus wurde für die Niederschlagsart Regen auch noch eine nach Sommer- und Winterhalbjahr getrennte Auswertung vorgenommen.

Eine vollständige Übersicht der Horizontabschirmung aller Vergleichsstationen und der für die einzelnen Niederschlagsarten bestimmten mittleren prozentualen Windfehler enthält Tab.6. Die Stationen sind hierin nach ihrer in westlicher Richtung bestehenden Horizontabschirmung (H') geordnet, deren Höhe als gewichtetes Mittel für Himmelsrichtungen von Süd über West bis Nord errechnet wurde:

$$H' = 0,15H(S-SW) + 0,35H(SW-W) + 0,35H(W-NW) + 0,15H(NW-N)$$

Die Unterschiede zu den rundum vermessenen Horizontabschirmungen (H) betragen teilweise mehrere Grad und bedingen dadurch auch mehrfach eine andere Stationseinordnung. Die Auswahl einer auf den westlichen Halbkreis beschränkten Horizontabschirmung als bestimmendes Merkmal erfolgte, da sich für diesen Fall von allen untersuchten Varianten die besten Beziehungen zum Niederschlagsmeßfehler ergaben. Das ist insofern verständlich, als daß an den Vergleichsstationen auch der größte Teil der Niederschläge bei westlichen Windrichtungen fällt.

Aus der Einordnung der Stationen nach der Höhe der Horizontabschirmung wird deutlich, daß mit zunehmendem Windschutz die Fehler erwartungsgemäß abnehmen. Dies ist sowohl für den Gesamtfehler als auch für die Teilfehler der einzelnen Niederschlagsarten in der Tendenz gut erkennbar. Die geringsten Abweichungen bestehen bei Regen im Sommerhalbjahr mit Werten zwischen 7,1 und 1,6 %. Sie sind im Winterhalbjahr durchschnittlich doppelt so groß, was auch die Notwendigkeit einer jahreszeitlichen Unterteilung der flüssigen Niederschläge in Hinblick auf die Entwicklung von Korrekturverfahren unterstreicht. Für Mischniederschläge und Schnee ist eine weitere Zunahme zu verzeichnen, wobei in jedem Falle die Mischniederschläge gegenüber dem Regen im Winter und der Schnee gegenüber den Mischniederschlägen die größeren Fehler aufweisen. Besonders groß sind sie bei Schnee an frei gelegenen Stationen mit Werten von über 50 bis 80 %, was auch den Erfahrungen bei der Modellierung der Schneedeckenentwicklung (RACHNER, 1990) entspricht.

Eine graphische Darstellung der Zusammenhänge zwischen Horizontabschirmung (H') und Gesamtmeßfehler (ΔN) enthält Abb.8. Sie bildete auch die Grundlage für eine gruppenweise Zusammenfassung der Stationen mit vergleichbaren Expositionsmerkmalen gemäß einer

Tab.6: Mittlere Horizontabschirmung in Grad, insgesamt (H) und in westlicher Richtung (H'), sowie mittlere gemessene Windfehler in % für Regen im Sommerhalbjahr ($\Delta N_4(\text{So})$), im Winterhalbjahr ($\Delta N_4(\text{Wi})$) und ganzjährig (ΔN_4), für Mischniederschlag (ΔN_8), für Schnee (ΔN_7) und für alle Niederschlagsarten (ΔN)

Station	Meßzeit- raum	H	H'	$\Delta N_4(\text{So})$	$\Delta N_4(\text{Wi})$	ΔN_4	ΔN_8	ΔN_7	ΔN
Groß Lüsewitz	1982/91	0,8	0,3	7,1	17,0	10,6	26,7	50,2	13,1
Gera-Leumnitz	1982/93	3,4	0,5	5,8	9,7	6,9	17,6	41,6	11,0
Harzgerode	1977/93	2,3	1,6	4,5	13,3	7,0	30,8	79,6	14,5
Halle-Kröllwitz	1983/93	1,9	1,9	3,8	7,7	5,0	16,6	33,1	6,9
Erfurt-Bindersleben	1984/93	2,3	1,9	6,0	10,7	7,4	14,9	78,9	12,9
Meiningen	1982/93	3,1	1,9	5,1	8,3	6,3	19,7	63,5	12,2
Goldberg	1982/91	4,9	2,6	5,6	12,9	8,1	19,4	45,7	10,8
Grünow	1982/93	8,2	2,6	5,2	12,9	7,5	16,7	78,5	11,2
Buttelstedt	1984/93	3,4	2,8	7,1	13,7	9,3	20,7	21,9	10,7
Oschatz	1983/93	6,3	3,2	5,4	10,6	7,1	19,1	42,8	10,0
Putbus	1977/93	7,4	3,4	4,4	8,3	5,8	16,6	49,9	9,1
Leinefelde	1982/93	2,3	3,6	4,5	5,6	4,9	11,4	46,4	9,0
Gardelegen	1983/93	5,6	4,1	4,2	8,2	5,8	11,6	46,4	8,2
Cottbus	1983/93	5,1	4,2	5,4	10,2	7,0	14,7	35,4	9,1
Marienberg	1988/93	7,1	4,2	5,0	10,8	6,2	22,4	59,7	13,5
Boltenhagen	1983/93	2,4	5,0	5,2	11,5	7,5	18,1	48,9	9,3
Görlitz	1982/93	5,1	7,0	3,1	7,5	4,4	11,8	34,6	7,5
Müncheberg	1983/93	5,6	7,1	3,7	8,8	5,5	12,5	38,3	7,7
Aue	1982/93	8,2	9,4	3,6	7,4	4,6	9,4	15,6	6,3
Magdeburg	1983/93	14,4	9,6	2,7	6,0	3,9	8,7	19,3	5,2
Sonneberg	1982/93	6,9	9,9	3,4	4,6	3,8	12,9	62,1	12,0
Neuglobsow	1977/93	14,1	10,5	2,6	6,6	4,1	9,9	24,2	5,9
Berlin-Buch	1992/93	14,8	10,9	3,1	6,9	4,3	9,8	32,8	5,3
Marnitz	1992/93	9,4	12,5	1,7	4,3	3,1	4,5	48,7	3,6
Potsdam	1983/93	20,4	17,5	1,6	2,9	2,1	3,0	12,5	2,7

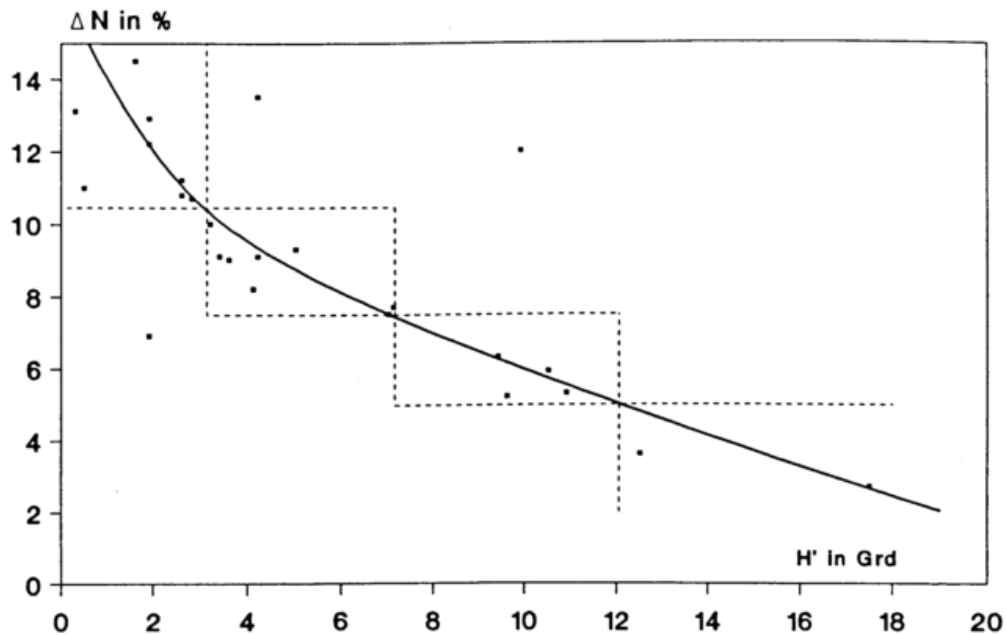


Abb.8: Mittlere Horizontabschirmung (H') im Sektor S bis N (gewichtet) und mittlerer gemessener Windfehler ΔN

freien bis stark geschützten Lage. Die entsprechend zugehörigen Bereiche der Horizontabschirmung und des Windfehlers sind als gestrichelt umrandete Felder markiert. So ist beispielsweise bei einer Horizontabschirmung von $H' \leq 3$ Grad und einem windbedingten Meßfehler von über 10,5 % von einer freien Stationslage auszugehen, während bei $H' \geq 12$ Grad und weniger als 5 % Meßfehler die Lage als stark geschützt zu definieren ist.

Bei dieser vorgegebenen Unterteilung lassen sich alle Stationen mit Ausnahme von Marienberg, Halle und Sonneberg eindeutig zuordnen. Als wahrscheinliche Ursache der Abweichungen ist bei Marienberg die gemäß der Höhenlage der Station auch höhere mittlere Windgeschwindigkeit (DWD, 1991) zu nennen. Die dadurch hauptsächlich im Winter entstehenden größeren Meßfehler entsprechen denen bei freier Stationslage im Tiefland, was ggf. bei einer Bewertung höher gelegener Bergstationen generell zu berücksichtigen ist.

Für die in gleicher Höhe gelegene Station Sonneberg ist außerdem noch zu beachten, daß diese Station an der Südwestabdachung des Thüringer Waldes in unmittelbarer Nähe eines relativ steil abfallenden Hanges eine bei entsprechenden Windrichtungen sehr windanfällige Lage hat. Das wirkt sich besonders bei Schneefall stark negativ aus, zumal im Winter auch die westlich des Meßplatzes stehenden Bäume entlaubt sind. So ist auch der zu hohe Wind-

fehler auf die Schnee- und Mischniederschläge beschränkt, während für flüssigen Niederschlag ein der mäßig geschützten Stationslage entsprechender Fehler gemessen wurde.

Für die Station Halle ist eine stichhaltige Erklärung des bei freier Stationslage relativ geringen Meßfehlers aus den verfügbaren Unterlagen nicht zu geben. Zu vermuten ist, daß im Bereich des Meßfeldes auf der Nordostseite einer leichten Erhebung ein geringer Lee-Effekt mit entsprechender Windminderung besteht.

Trotz der Abweichungen einzelner Stationen zeigen die Auswertungen, daß sich die windbedingten Meßfehler des Hellmann auch bereits aus einer einfachen Unterteilung der Umgebungsbedingungen in 4 Stationslagekategorien in guter Näherung bestimmen lassen. Das gilt sowohl hinsichtlich des Windfehlers insgesamt als auch in bezug auf die Teilfehler der einzelnen Niederschlagsarten.

Ausgehend von Tab.6 und Abb.8 lassen sich als Richtwerte der Horizontabschirmung und der zugehörigen Windfehler die in Tab.7 angegebenen Toleranzbereiche definieren. Sie dienen in dieser Form als Grundlage für eine gruppenweise Zusammenfassung der Stationen bei der detaillierten Auswertung der Vergleichsmessungen im Bodenniveau. Diese Zusammenfassungen waren erforderlich, um bei den statistischen Auswertungen auch für die anteilmäßig geringeren Niederschlagsmengen der Schnee- und Mischniederschläge hinreichend gesicherte Aussagen treffen zu können.

4.2 Ergebnisse der Vergleichsmessungen

4.2.1 Beschreibung der Datenbasis

Eine zusammenfassende Übersicht der bis einschließlich Juni 1993 zur Auswertung herangezogenen Daten enthält Tab.8. In ihr sind sowohl die Anzahl der Niederschlagstage als auch die Gesamtsumme der mit dem Hellmann-Standard gemessenen Niederschlagshöhen jeweils getrennt nach der Stationslage und der Niederschlagsart enthalten. Keine Berücksichtigung fanden die Meßergebnisse der nicht eindeutig zuzuordnenden Station Sonneberg. Weiterhin ist der Tabelle zu entnehmen, daß die Stationsgruppen der freien und der leicht bzw. mäßig geschützten Lage mit 9, 7 und 6 zugeordneten Stationen hinreichend gut belegt sind, während der Datenumfang für die stark geschützte Lage nur auf Potsdam und die erst 1992 eingerichtete Station Marnitz beruht und demzufolge wesentlich geringer ist. Die Ergebnisse für diese Stationslage sind somit besonders bei den anteilmäßig geringen Schnee- und Misch-

Tab.7: Horizontabschirmung (in °) und zugehöriger Bereich des Windfehlers (ΔN in %) für frei bis stark geschützte Stationslagen und einzelne Niederschlagsarten

Stationslage	Horizontabschirmung	ΔN_4 (So)	ΔN_4 (Wi)	ΔN_4	ΔN_8	ΔN_7	ΔN
frei	$\leq 3,0$	$> 5,0$	$> 11,0$	$> 7,0$	$> 18,0$	$> 50,0$	$> 10,5$
leicht geschützt	3,1... 7,0	3,6...5,0	8,1...11,0	5,1...7,0	12,1...18,0	30,1...50,0	7,6...10,5
mäßig geschützt	7,1...12,0	2,1...3,5	5,1... 8,0	3,6...5,0	7,1...12,0	15,1...30,0	5,1...7,5
stark geschützt	$> 12,0$	$\leq 2,0$	$\leq 5,0$	$\leq 3,5$	$\leq 7,0$	$\leq 15,0$	$\leq 5,0$

Tab.8: Anzahl der Tage (n) mit Niederschlag $\geq 0,1$ mm und gemessene Niederschlagshöhen (in mm), aufgeschlüsselt nach Stationslagen und Niederschlagsarten

Stationslage	Anzahl der Stationen	Niederschlagstage pro Niederschlagsart					%		
		n4	n7	n8	Σn	n4	n7	n8	
frei	9	12293	1479	1771	15543	79,1	9,5	11,4	
leicht geschützt	7	10864	1138	1380	13382	81,2	8,5	10,3	
mäßig geschützt	6	8621	1146	1178	10945	78,8	10,5	10,7	
stark geschützt	2	1589	173	231	1993	79,7	8,7	11,6	
Σ bzw. Mittel	24	33367	3936	4560	41836	79,7	9,4	10,9	

Stationslage	Anzahl der Stationen	Niederschlagssumme pro Niederschlagsart					%		
		N4	N7	N8	ΣN	N4	N7	N8	
frei	9	38772,7	2473,9	6527,2	47773,8	81,1	5,2	13,7	
leicht geschützt	7	35824,3	1836,4	5481,0	43141,7	83,0	4,3	12,7	
mäßig geschützt	6	29623,9	2360,0	4804,2	36788,1	80,5	6,4	13,1	
stark geschützt	2	5387,6	305,6	951,3	6644,5	81,1	4,6	14,3	
Σ bzw. Mittel	24	109603,5	6975,9	17763,7	134348,1	81,6	5,2	13,2	

niederschlägen noch mit einer erheblichen Unsicherheit behaftet, während sie für die anderen Stationslagen als weitestgehend stabil anzusehen sind. Das zeigt sich unter anderem aus den von Jahr zu Jahr durchgeführten Auswertungen, deren Ergebnisse nur noch geringen Veränderungen unterliegen.

Aus den in Tab.8 mit angegebenen prozentualen Anteilen der Niederschlagstage und Niederschlagshöhen am Gesamtniederschlag, jeweils aufgeschlüsselt nach der Niederschlagsart, geht hervor, daß der größte Teil der Niederschläge als Regen gefallen ist. So wurden an 79,7% der Tage mit Niederschlag 81,6% der Gesamtniederschlagshöhe gemessen. Die verbleibenden Anteile der Tage mit Schnee und Mischniederschlag sind mit 9,4% bzw. 10,9% annähernd gleich verteilt, während die dabei gemessenen Niederschlagshöhen für Schnee mit nur 5,2% gegenüber 13,2% beim Mischniederschlag anteilig erheblich geringer ausfallen. Die Ursache hierfür sind die im Mittel mit 1,8mm pro Niederschlagstag deutlich kleineren Tagessummen bei Schnee im Vergleich zu 3,3mm bei Regen und 3,9mm bei Mischniederschlag. Diese Relationen sind auch bei einer getrennten Betrachtung der einzelnen Stationen gegeben, wobei in jedem Falle die Tage mit Mischniederschlag die durchschnittlich höchsten und die Tage mit Schnee die durchschnittlich niedrigsten Tageswerte haben.

In einer Gesamteinschätzung ist das verfügbare Datenmaterial trotz der einschränkenden Bemerkungen hinsichtlich der geschützten Stationslage als sehr umfangreich zu bewerten, so daß die nachfolgend dargestellten Ergebnisse auch eine zuverlässige Aussagekraft besitzen.

4.2.2 Langjährige Mittelwerte der Windfehler

Bereits aus den in Tab.6 zusammengestellten Meßergebnissen ist die Abhängigkeit des Windfehlers von der Niederschlagsart und der Stationslage gut zu erkennen. Sie wird noch verdeutlicht, wenn eine Zusammenfassung der Stationen gemäß ihrer definierten Lageklassen erfolgt (Tab.9). Danach bestehen erhebliche Unterschiede in den windbedingten Meßfehlern der einzelnen Niederschlagsarten, die noch einmal die Notwendigkeit der Vergleichsmessungen unterstreichen.

Die geringste Windbeeinflussung hat erwartungsgemäß der flüssige Niederschlag, wobei allerdings auch hier schon erhebliche Unterschiede zwischen dem Sommer- und Winterhalbjahr festzustellen sind. So bewegen sich die mittleren Windfehler im Sommer je nach Stationslage zwischen 5,6% und 1,7%, während sie im Winter zwischen 12,3% und 3,1%

Tab.9: Mittlerer Windfehler (ΔN in %), aufgeschlüsselt nach Niederschlagsarten und Stationslagen

Stationslage	$\Delta N4(\text{So})$	$\Delta N4(\text{Wi})$	$\Delta N4$	$\Delta N8$	$\Delta N7$	ΔN
frei	5,6	12,3	7,7	22,5	58,4	12,4
leicht geschützt	4,8	8,9	6,2	15,3	44,6	9,0
mäßig geschützt	3,2	7,2	4,5	10,4	24,5	6,5
stark geschützt	1,8	3,3	2,4	4,7	13,0	3,2

durchschnittlich doppelt so groß sind. Als Ursache sind die bei den intensiven sommerlichen Schauern größeren Tropfen und die dadurch bedingte geringere Windbeeinflussung zu nennen. Noch deutlicher werden die jahreszeitlichen Unterschiede bei der Darstellung des mittleren Jahresganges auf Abb.9. Es zeigt sich, daß bei frei gelegenen Stationen selbst der flüssige Niederschlag in einigen Wintermonaten windbedingte Meßfehler von über 15% aufweist und im Februar sogar im Mittel annähernd 20% erreicht. Dagegen werden in den Hochsommermonaten 5% unterschritten. Bei leicht bis mäßig geschützter Lage sind die Fehler erheblich geringer, wobei ganzjährig zwischen den einzelnen Stationskategorien eindeutig ausgeprägte Unterschiede bestehen. Dies gilt auch für die geringer mit Daten belegte geschützte Stationslage, bei der die Windfehler durchgehend unter 5% bleiben und in den Sommermonaten teilweise nur zwischen 1 und 2% liegen.

Wesentlich größer als bei flüssigem Niederschlag sind die Windfehler bei Mischniederschlag und Schnee. Am stärksten ausgeprägt ist dies bei frei gelegenen Stationen, deren Meßergebnisse als Beispiel auf Abb.10 dargestellt sind.

Die Mischniederschläge haben unter diesen Bedingungen von November bis März Windfehler zwischen 25 und 30%, in den Monaten April, Mai und Oktober sind sie wahrschein-

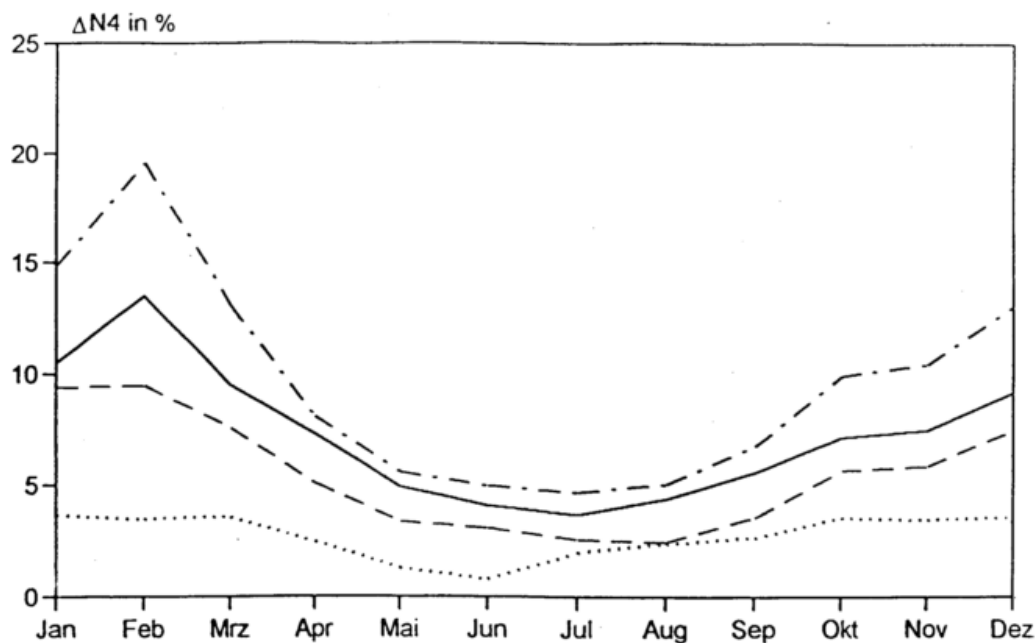


Abb.9: Mittlerer Jahresgang des Windfehlers bei flüssigem Niederschlag ΔN_4 , Reihe 1983/1993

--- freie Stationslage, — leicht geschützte Stationslage,
 - - - mäßig geschützte Stationslage, stark geschützte Stationslage

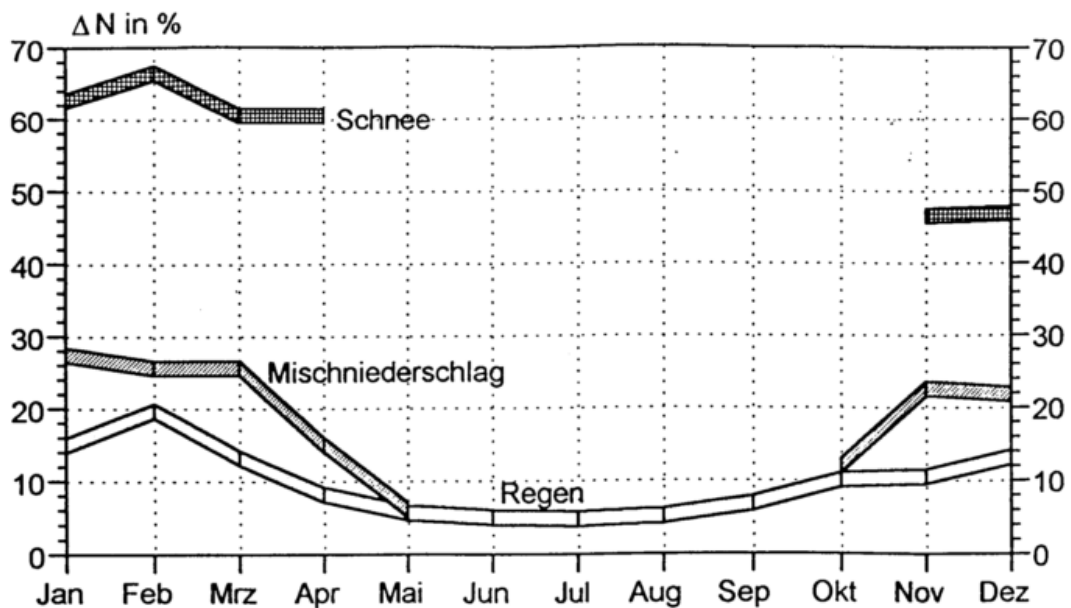


Abb.10: Mittlerer Jahresgang des Windfehlers ΔN bei freier Stationslage

lich auf Grund des geringeren Schneeanteils etwas kleiner. Bei reinem Schneeniederschlag ist eine weitere Zunahme des Fehlers bis über das Doppelte vom Mischniederschlag zu verzeichnen. Hier werden in freier Lage vielfach Monatsmittel des Windfehlers zwischen 45 und 70% gemessen, die in besonders exponierter Lage auch bis zu 100% erreichen können. Die Ergebnisse befinden sich damit in guter Übereinstimmung mit den Untersuchungen von RACHNER (1990), der Abschätzungen des Meßfehlers aus Vergleichsmessungen mit dem Wasseräquivalent der Schneedecke durchgeführt hat. In Übereinstimmung mit den dort getroffenen Festlegungen fanden auch bei den Vergleichsmessungen im Bodenniveau diejenigen Werte keine Berücksichtigung mehr, die das 5fache des Hellmann-Meßwertes überstiegen. In diesen Fällen können mit relativ großer Wahrscheinlichkeit Meßfehler durch Verwehungseffekte angenommen werden. Insgesamt werden dadurch ca. 10% der Schneefälle nicht berücksichtigt, deren gesonderte Auswertung eine im Mittel um das 12fache höhere Niederschlagsmenge im Bodenniveau ergab. Trotz der Aussonderung dieser fehlerhaften Meßwerte sind die Ergebnisse natürlich immer noch mit einer gewissen Unsicherheit behaftet, zumal bei Schneefall bereits lokale Bedingungen wie einzelne Bäume oder Gebäude einen besonders großen Einfluß auf das Meßergebnis haben können. Dies unterstreichen auch die großen

Unterschiede in den berechneten Meßfehlern zwischen den einzelnen Stationen, wie sie bereits aus Tab.6 zu entnehmen sind.

4.2.3 Mittlere Windfehler von Tageswerten der Niederschlagshöhe

Neben den langjährigen Mittelwerten gewinnen in zunehmendem Maße auch Kenntnisse über die Meßfehler kürzerer Zeiträume bis hin zu Tageswerten praktische Bedeutung. Zweifelsohne bilden für diesbezügliche Untersuchungen genaue Angaben zur Art und Intensität des Niederschlages sowie zu der am Meßplatz herrschenden Windgeschwindigkeit während der Zeit des Niederschlagsfalls die besten Voraussetzungen. Da diese Informationen aus routinemäßigen meteorologischen Messungen zum größten Teil nicht verfügbar sind, besteht nur die Möglichkeit, sie entweder gemäß dem für die Schweiz gehandhabten Verfahren abzuleiten (SEVRUK, 1986) oder von vornherein auf einfache Zusammenhänge mit den im Meßnetz erfaßten Standardgrößen zu orientieren. In Anbetracht der großen Unsicherheiten bei der notwendigen Übertragung und Umrechnung von Windmessungen auf den jeweiligen Standort des Niederschlagsmessers wurde die Entscheidung zugunsten verfügbarer Daten getroffen. So kann zur Abschätzung des Windfehlers neben der Niederschlagsart und der Windexposition der Station auch die tägliche Niederschlagshöhe herangezogen werden.

Eine wesentliche Grundlage für diese Entscheidung lieferten die Auswertungen der langjährigen Vergleichsmessungen von Harzgerode, da an dieser sehr frei gelegenen Station im Rahmen umfangreicher Vergleichsuntersuchungen mit weiteren Niederschlagsmeßgeräten auch die erforderlichen Windmessungen in der Aufstellungshöhe des Niederschlagsmessers durchgeführt wurden. Damit bestand die Möglichkeit, den Windfehler sowohl in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit als auch von der Niederschlagshöhe zu betrachten. Die Auswertungen erfolgten in Form einer differenzierten Bestimmung der Windfehler für je 5 vorgegebene Windgeschwindigkeits- und Niederschlagshöhenklassen. Als Beispiel sind in Tab.10 die Ergebnisse für die Niederschlagsart Regen angegeben, da bei dieser Niederschlagsart auf Grund des umfangreichen Datenmaterials die Zusammenhänge am besten erkennbar sind. Es zeigt sich die zu erwartende eindeutige Zunahme des Fehlers mit der Windgeschwindigkeit, aber ebenso deutlich ist auch in allen Windklassen eine Abnahme des prozentualen Fehlers mit der Niederschlagshöhe festzustellen. Im letzteren Falle ist sogar die relative Veränderlichkeit des Meßfehlers erheblich größer. Zu qualitativ gleichen Aussagen

Tab.10: Mittlerer Windfehler von Tageswerten der Niederschlagshöhe bei Regen (ΔN_4 in %), unterteilt nach Wind- und Niederschlagshöhenklassen, Harzgerode 1977/1993

Windgeschwindigkeit in m/s	Niederschlagshöhe in mm/d						gesamt
	0,0..0,5	0,6..2,0	2,1..5,0	5,1..10,0	$\geq 10,1$		
0,0 ... 2,0	24,5	8,9	3,8	2,2	1,3		3,1
2,1 ... 3,0	47,7	14,1	5,3	2,7	1,9		5,2
3,1 ... 4,0	63,7	17,1	7,6	5,2	2,8		8,4
4,1 ... 5,0	68,8	22,2	10,9	10,3	2,9		12,3
$\geq 5,1$	120,1	26,6	16,7	14,0	7,1		15,2
gesamt (ΔN_4)	51,9	16,4	7,6	5,3	2,5		7,0

fürten auch die Auswertungen für Mischniederschlag und Schnee, woraus insgesamt zu schlußfolgern ist, daß eine differenzierte Analyse des Windfehlers ebenso auf der Grundlage seiner Abhängigkeit von der Niederschlagshöhe vorgenommen werden kann. Gleiche Aussagen sind in den DVWK-Schriften zur Starkniederschlagshöhe nachzulesen (DVWK, 1991).

Eine entsprechende Umsetzung der Ergebnisse aus Tab.10 erfolgte, in dem die prozentualen Windfehler der einzelnen Wind- und Niederschlagshöhenklassen in reale Verluste in mmd^{-1} umgerechnet und durch graphische Interpolation miteinander verbunden wurden (Abb.11). Das Ergebnis zeigt, daß die bestehenden Zusammenhänge gut in Form von Funktionskurven dargestellt werden können, aus denen dann die mittleren Windfehler bei Regen direkt in Abhängigkeit von der Niederschlagshöhe und der Windgeschwindigkeit abzulesen sind. So ist aus der Abb.11 beispielsweise zu entnehmen, daß in Harzgerode bei einer mittleren Windgeschwindigkeit von $3,0\text{ms}^{-1}$ und einem Tageswert der Niederschlagshöhe von $0,1\text{mm}$ mit einem Meßfehler von ebenfalls $0,1\text{mm}$ bzw. 100% zu rechnen ist, während dieser bei einem Tageswert von $10,0\text{mm}$ mit $0,3\text{mm}$ nur noch 3% beträgt. Bei höheren Windgeschwindigkeiten steigt der Fehler stark an und erreicht bei $5,0\text{ms}^{-1}$ bereits das Doppelte. Im Einzel-

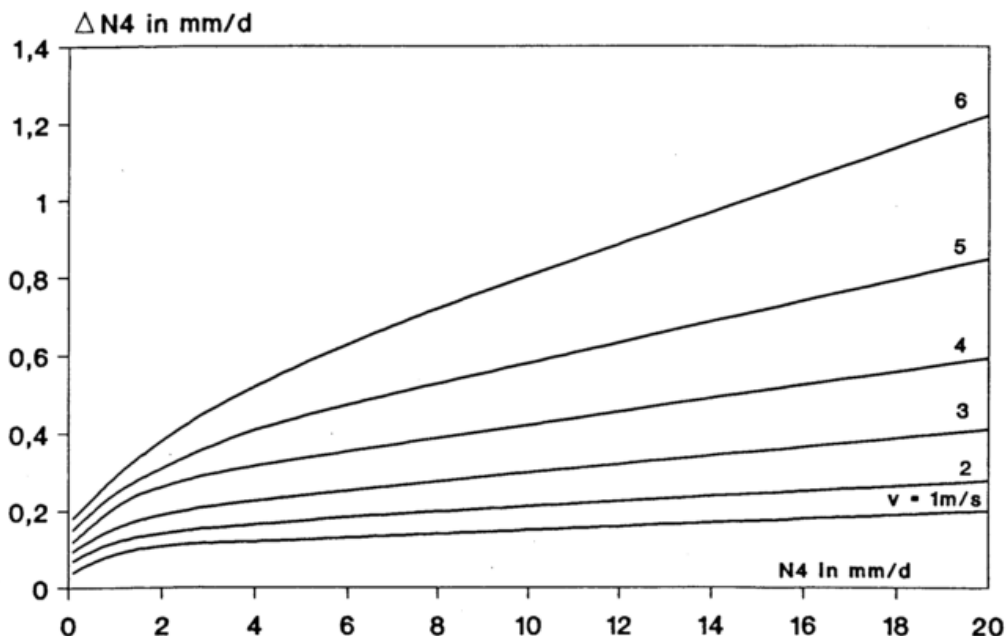


Abb.11: Mittlere Zunahme des Windfehlers bei Regen $\Delta N4$ in Abhängigkeit von der Niederschlagshöhe (N) und der Windgeschwindigkeit (v) in 1m Höhe, Harzgerode 1977/93

fall können somit die Fehler bei gleicher Niederschlagshöhe je nach Windgeschwindigkeit sehr unterschiedlich sein. Allerdings ist die Wahrscheinlichkeit hierfür relativ gering, da selbst an der sehr frei gelegenen Station Harzgerode rund 80% aller Regenfälle bei Windgeschwindigkeiten zwischen $1,0$ und $4,0\text{ms}^{-1}$ auftreten, also unter Bedingungen, bei denen die Streuung um den mittleren Fehler weitgehend unter $0,1\text{mm}$ bleibt.

In methodisch gleicher Weise erfolgten auch die für alle Stationen zusammengefaßten Untersuchungen zum Windfehler in alleiniger Abhängigkeit von der Niederschlagshöhe. Anstelle der fehlenden Windmessungen in Höhe des Hellmann-Niederschlagsmessers wurden die aus der Horizontabschirmung bestimmten Windexpositionen der einzelnen Stationen in Beziehung gesetzt, jeweils zusammengefaßt nach den 4 ermittelten Lagekategorien. Damit ist in indirekter Weise auch eine Unterteilung nach Windeinflüssen gegeben.

Da durch die Zusammenfassung in Stationsgruppen zumindest für die Kategorien der frei bis mäßig geschützten Lage ein jeweils sehr umfangreiches Datenmaterial zur Verfügung stand, konnte für die Bestimmung des Windfehlers als Funktion der Niederschlagshöhe von einer sehr differenzierten Unterteilung in Niederschlagshöhenklassen ausgegangen werden. Das ist besonders im Bereich der am häufigsten auftretenden kleinen Niederschlagshöhen von Bedeutung, da hier einerseits die größten relativen Meßfehler auftreten, andererseits auch eine sehr schnelle Abnahme des prozentualen Meßfehlers mit der Niederschlagshöhe zu verzeichnen ist.

Für alle 4 Stationslagekategorien lassen sich sehr deutliche Zusammenhänge zwischen der Niederschlagshöhe und den aus dem Vergleich zum Bodenniveau bestimmten Windfehlern nachweisen. Eine entsprechende Übersicht hierzu vermittelt Tab.11, in der wiederum als Beispiel für den flüssigen Niederschlag die gemessenen Windfehler für frei bis stark geschützt gelegene Stationen und jeweils 17 vorgegebene Niederschlagshöhenklassen zusammengefaßt sind. Die Angaben der mittleren Windfehler erfolgten einmal als Relativwerte in % und zum anderen als tatsächliche Meßfehler in mm, wobei zu letzteren auch noch die Streuungen der Einzelwerte um den mittleren Fehlerbetrag mit angegeben sind. Daraus ist abzuschätzen, mit welchen statistischen Fehlern Tageswerte der Niederschlagshöhe bei einer Korrektur des Windfehlers behaftet sind.

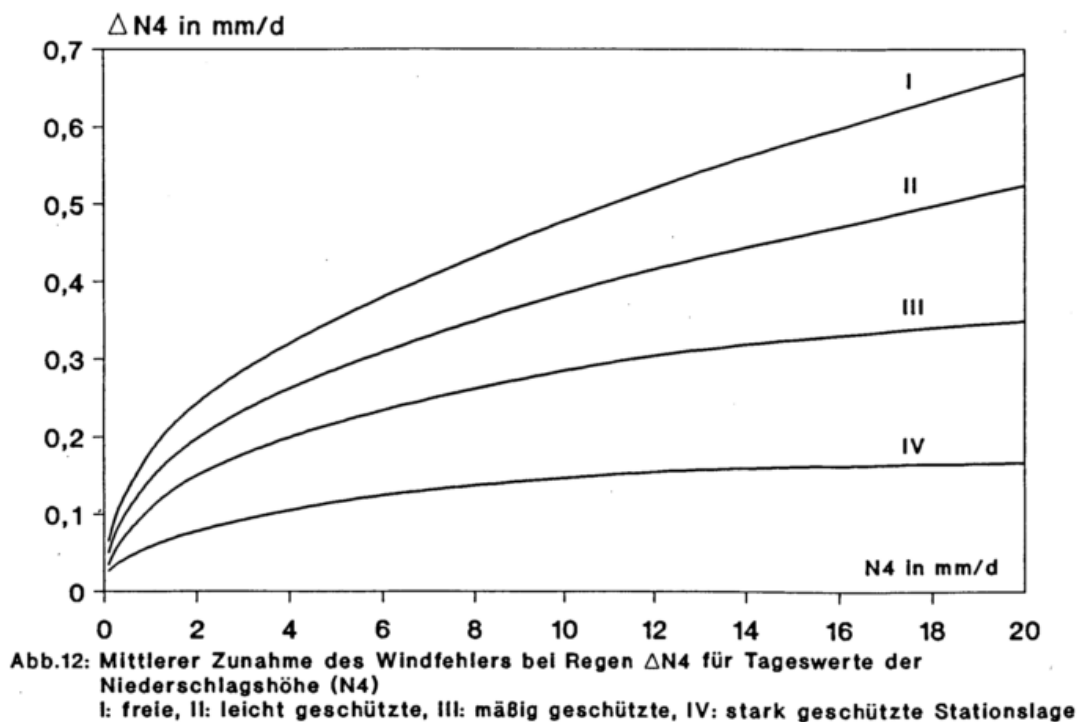
Als Faustregel läßt sich ableiten, daß bei Regen die Höhe des mittleren Windfehlers und die Streuung der Einzelwerte um diesen mittleren Fehler annähernd gleich groß sind. Lediglich bei den sehr kleinen Windfehlern der stark geschützt gelegenen Stationen ist die Streuung

Tab.11: Mittlere Windfehler der Tageswerte der Niederschlagshöhe für Regen (ΔN_4) in % und in mm sowie Streuung (s) der Einzelfehler um den Mittelwert, Stationslage frei bis stark geschützt

Stationslage ----- Niederschlagshöhe in mm/d	frei			leicht geschützt			mäßig geschützt			stark geschützt		
	ΔN_4 %	ΔN_4 mm	s mm	ΔN_4 %	ΔN_4 mm	s mm	ΔN_4 %	ΔN_4 mm	s mm	ΔN_4 %	ΔN_4 mm	s mm
0,2 ...	64,2	0,06	0,09	49,2	0,05	0,08	30,4	0,03	0,07	27,0	0,03	0,08
0,4 ...	42,2	0,10	0,15	33,4	0,08	0,10	25,5	0,06	0,09	19,5	0,05	0,09
0,7 ...	28,4	0,14	0,14	22,5	0,11	0,11	16,5	0,08	0,10	8,7	0,04	0,09
1,1 ...	21,3	0,18	0,20	16,0	0,14	0,14	11,1	0,09	0,13	7,3	0,06	0,13
1,6 ...	17,6	0,23	0,25	13,3	0,17	0,17	10,1	0,13	0,17	6,4	0,08	0,14
2,1 ...	13,3	0,24	0,27	11,7	0,21	0,23	8,1	0,15	0,14	4,7	0,08	0,19
2,6 ...	11,2	0,26	0,31	9,1	0,21	0,20	6,9	0,16	0,17	4,9	0,11	0,17
3,1 ...	9,4	0,26	0,26	8,4	0,24	0,24	6,3	0,18	0,16	2,5	0,07	0,19
4,1 ...	8,2	0,29	0,32	7,4	0,26	0,26	5,3	0,19	0,19	2,2	0,08	0,18
5,1 ...	7,5	0,34	0,37	5,6	0,25	0,32	4,4	0,20	0,20	1,2	0,05	0,21
7,1 ...	6,6	0,39	0,40	5,4	0,33	0,32	4,0	0,24	0,25	1,2	0,07	0,26
10,1 ...	5,1	0,43	0,46	3,9	0,33	0,38	3,4	0,29	0,34	0,8	0,07	0,35
15,1 ...	4,3	0,53	0,60	3,5	0,43	0,40	2,7	0,33	0,40	0,9	0,11	0,49
20,1 ...	3,7	0,63	0,67	2,7	0,47	0,49	1,7	0,29	0,46	0,9	0,15	0,53
30,1 ...	3,0	0,71	0,80	2,7	0,64	0,79	1,6	0,38	0,67	1,7	0,40	0,58
50,1 ...	2,3	0,86	1,14	2,2	0,78	0,87	1,6	0,57	1,29	1,2	0,46	0,52
$\geq 50,1$	0,7	0,54	0,66	2,6	1,93	1,19	0,8	0,53	0,52	0,0	0,00	0,92

erheblich größer. Hierzu ist allerdings aus den Erfahrungen langjähriger Vergleichsmessungen zu bemerken, daß auch zwischen zwei gleichen Niederschlagsmeßgeräten ohne aufstellungsbedingte systematische Unterschiede immer eine geringe Streuung der Einzelwerte besteht, ein Effekt, der wahrscheinlich bei den kleinen systematischen Fehlern in geschützter Lage mit zum tragen kommt.

Als ein weiteres Ergebnis ist aus Tab.11 zu entnehmen, daß selbst bei der Vorgabe sehr differenzierter Niederschlagshöhenklassen noch eine im wesentlichen gut ausgeprägte kontinuierliche Abnahme des prozentualen bzw. Zunahme des realen Windfehlers mit zunehmender Niederschlagshöhe besteht. Ebenso eindeutig ist die Abnahme des Windfehlers mit zunehmend geschützter Stationslage. In jedem Falle ist der Windfehler gut als Funktion der Niederschlagshöhe darstellbar, wenn auch sowohl bei den sehr hohen Niederschlagsklassen als auch bei der faktisch nur durch Potsdam repräsentierten stark geschützten Stationslage einzelne Unregelmäßigkeiten bestehen, deren Ursachen mit Sicherheit in dem noch nicht ausreichenden Datenumfang zu suchen sind. Die graphische Darstellung des zunehmenden Windfehlers als Funktion der Niederschlagshöhe für die 4 Stationslagen enthält Abb.12.



Bei den bisherigen Beispieldarstellungen wurde zunächst nur auf die Vergleichsmessungen für den flüssigen Niederschlag zurückgegriffen, da für diese Niederschlagsart die mit Abstand umfangreichsten Meßergebnisse vorliegen (vergl. Tab.8). Dadurch können die Beziehungen zu den beeinflussenden Größen am deutlichsten hervorgehoben werden, ohne daß sich die zufälligen Abweichungen einzelner Meßwerte in der statistischen Auswertung stärker bemerkbar machen. Prinzipiell gleiche Ergebnisse lassen sich für die Mischniederschläge und für Schnee ableiten, nur sind hier die funktionalen Zusammenhänge nicht immer so deutlich ausgeprägt und besonders bei den wenigen Daten für Tage mit großen Niederschlagshöhen auch mit größeren Unregelmäßigkeiten behaftet.

Einen entsprechenden Überblick hierzu liefert Tab.12, in der in Ergänzung zu Tab.11 die mittleren Windfehler einschließlich der Streuungen für die Niederschlagsart Schnee (N_7) zusammengefaßt sind. Trotz der bei Schneemessungen generell bestehenden Unsicherheiten sind die grundsätzlichen Zusammenhänge, wie sie bezüglich des flüssigen Niederschlages festgestellt wurden, auch in diesem Falle erkennbar. Für große Niederschlagshöhen beziehen sich die Aussagen allerdings nur noch auf wenige Meßdaten, was bei der Bewertung des Ergebnisses zu berücksichtigen ist. Gleiches gilt für die durch Potsdam repräsentierte geschützte Stationslage. Hier macht sich negativ bemerkbar, daß diese im Nordostdeutschen Tiefland gelegene Station im klimatologischen Mittel ohnehin nur einen geringen Schneean teil am Gesamtniederschlag hat und außerdem seit Beginn der Messungen in den letzten 10 Jahren eine ganze Folge schneearmer Winter aufgetreten ist. Eine angenäherte Aussage über das Anwachsen des realen Windfehlers ist in diesem Falle wie schon bei den flüssigen Niederschlagshöhen nur aus einer weitgehenden Zusammenfassung der Niederschlagshöhenklassen zu treffen.

Trotz dieser Probleme sind auch für den Schnee die Windfehler als Funktion von der Niederschlagshöhe darzustellen (Abb.13). Sie haben im Vergleich zum Regen einen wesentlich höheren Betrag und die Streuung der Einzelwerte liegt größtenteils über der Höhe des mittleren Windfehlers. Die Ergebnisse unterstreichen die weitgehend bekannten Unsicherheiten, mit denen insbesondere die Messungen des Schneeniederschlags behaftet sind. In abgeschwächter Form gilt diese Aussage auch für die hier nicht gesondert dargestellten Mischniederschläge, deren Meßfehler und Streuungen um den Mittelwert in ihrer Größenordnung dem langfristigen Verhalten (Abb.10) entsprechend zwischen den Ergebnissen für Regen und Schnee liegen.

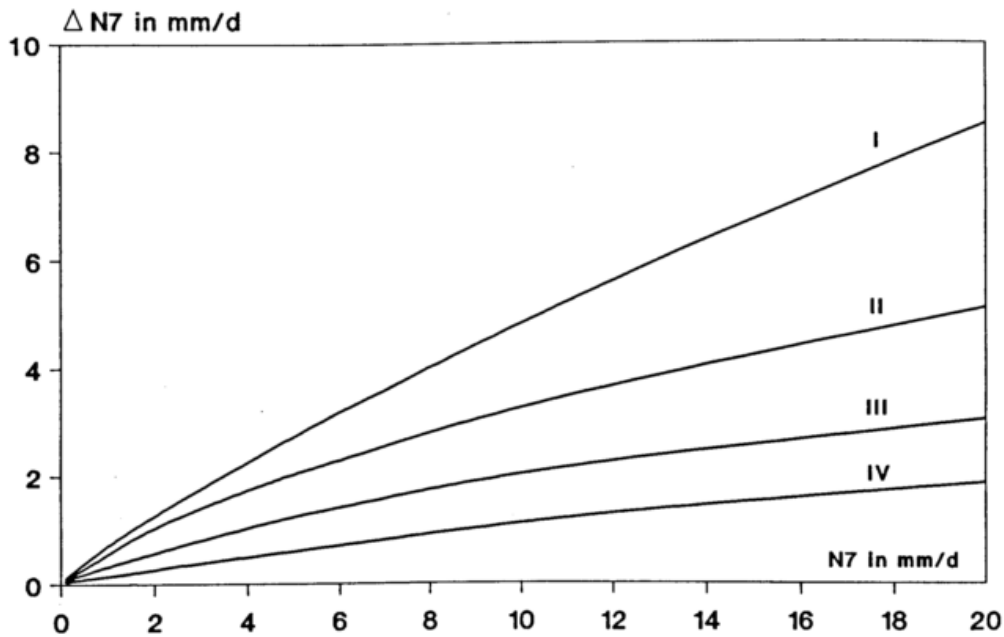


Abb.13: Mittlere Zunahme des Windfehlers bei Schneefall $\Delta N7$ für Tageswerte der Niederschlagshöhe (N7),
I: freie, II: leicht geschützte, III: mäßig geschützte, IV: stark geschützte Stationslage

Einen quantitativen Eindruck hiervon vermittelt Abb.14, auf der am Beispiel der freien Stationslage die Zunahme des Meßfehlers von Tageswerten für die einzelnen Niederschlagsarten dargestellt ist. Dabei wurde im Hinblick auf die weitere Nutzung der Ergebnisse für die Bestimmung des Gesamtfehlers der Niederschlagshöhe und eines darauf aufbauenden Korrekturverfahrens der flüssige Niederschlag wie in bereits vorangegangenen Analysen nach Sommer- und Winterniederschlag unterteilt.

Übereinstimmend mit den Ergebnissen für langjährige Mittelwerte gemäß Tab.9 bestehen für die Fehler der Tageswerte je nach Jahreszeit und Niederschlagsart erhebliche Unterschiede in ihrer Abhängigkeit von der Niederschlagshöhe. Sie unterstreichen, daß neben der Niederschlagshöhe ebenso die innerjährliche Verteilung des Niederschlages und der jeweilige Anteil von Schnee und Mischniederschlag einen entscheidenden Einfluß auf die Höhe des windbedingten Meßfehlers ausüben.

4.2.3 Ergänzende Messungen zum Windfehler

Bereits bei der Erläuterung der Vergleichsmessungen im Bodenniveau wurde darauf hinge-

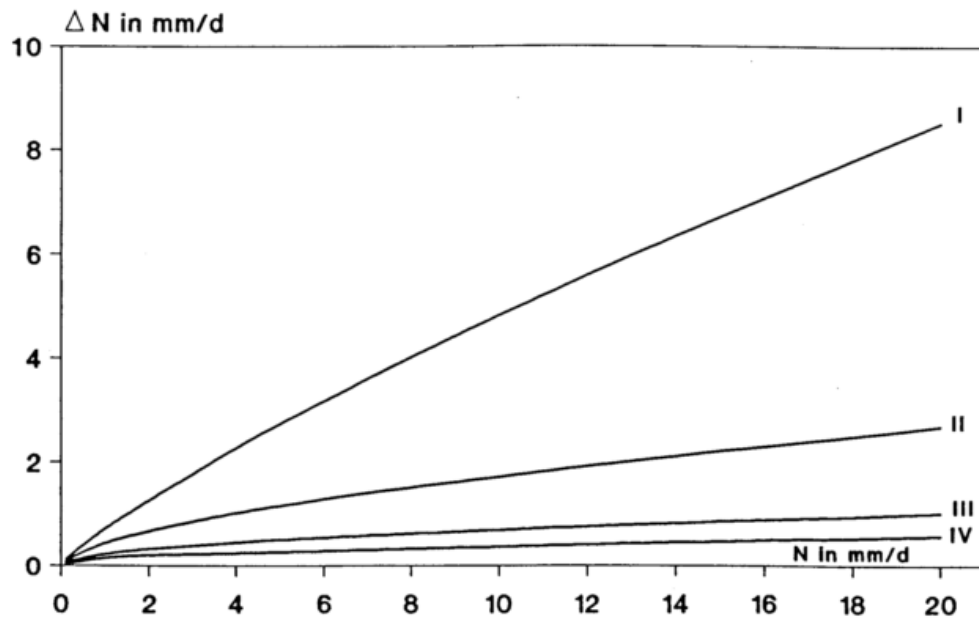


Abb.14: Mittlere Zunahme des Windfehlers ΔN für Tageswerte der Niederschlags-
höhe (N) bei freier Stationslage
I: Schnee, II: Mischniederschlag, III: Regen(Winter), IV: Regen(Sommer)

wiesen, daß die hier gewählte Aufstellung des Regenmessers in einer offenen Grube wahrscheinlich nicht unter allen Bedingungen ein durch den Windeinfluß völlig unbeeinflusstes Meßergebnis gewährleistet. Primär könnte dies für sehr frei gelegene Stationen und bei Schneefall zutreffen. Physikalisch denkbar ist, daß sich bei höheren Windgeschwindigkeiten in einer Grube eine Luftströmung in Form eines Leewirbels ausbildet, wodurch dann eine leicht zur Auffangfläche des Niederschlagsmessers hin geneigte Windkomponente entsteht. Die Folge hiervon wäre ein im Gegensatz zur Standardaufstellung zusätzliches Hineinwehen von Niederschlag, also ein etwas zu hoher Meßwert im Bodenniveau und demzufolge eine geringe Überschätzung des tatsächlichen Windfehlers aus den Vergleichsmessungen. Bei Schnee kommt hinzu, daß die Meßwerte noch zusätzlich durch das Aufwirbeln und Verwehen bereits abgelagerter Schneefälle erhöht werden können.

Als potentielle Schutzmaßnahme wurde bei dem von der WMO zur Messung flüssiger Niederschläge empfohlenen Pit Gauge versucht, erdbodengleiche Bedingungen durch das Abdecken der Grube mit einem Gitterrost zu erzielen und auf diese Weise die genannten Effekte weitgehend zu vermeiden. Allerdings können auch unter diesen Meßbedingungen ggf. entstehende Verwirbelungen infolge der sich verändernden Oberflächenrauigkeit nicht völlig

ausgeschlossen werden. Insofern bleibt bei Beachtung aller Aspekte immer eine geringe Unsicherheit hinsichtlich der tatsächlichen Größe des Windfehlers bestehen, obwohl die Vergleichsmessungen im Bodenniveau die sicherlich beste Lösungsvariante darstellen.

Gestützt werden kann diese Aussage durch den Vergleich der Bodenmessungen mit weiteren Meßgeräten, wie sie mit der 3,0m²- und der 0,3m²-Niederschlagswanne sowie dem DFIR-Meßgerät des WMO-Projektes zur Messung fester Niederschläge bereits bei der Beschreibung der Meßprogramme in Kap.2 genannt wurden. Ergänzend hierzu sind noch der zeitweilige Betrieb eines mit Öl bedeckten 3,0m²-Verdunstungskessels in Neuglobsow sowie je eines für Messungen bei Schneefall variabel einstellbarer Niederschlagsmessers im Bodenniveau an den Stationen Aue, Harzgerode und Marienberg zu zählen. Der experimentelle Einsatz aller Meßgeräte erfolgte letztlich mit dem Ziel einer vom Windeinfluß freien Niederschlagsmessung. Die hierbei gewonnenen Ergebnisse sind durchaus als eine weitgehende Bestätigung der Vergleichsmessungen im Bodenniveau zu bewerten.

Bereits 1967 wurde im Rahmen spezieller Vergleichsmessungen mit Verdunstungskesseln in Neuglobsow zur genauen Erfassung der zum Vergleich erforderlichen Niederschlagshöhen eine 3,0m²-Niederschlagswanne in Betrieb genommen (RICHTER, 1975). Diese ist trichterförmig ausgebildet, im Bodenniveau installiert und zum Betrieb einer Registriereinrichtung unterkellert. Gleichzeitig wird mittels Infrarotstrahlern von der Unterkellerung her das Abtauen von Schnee vorgenommen. Somit ist eine durchgehende Messung gewährleistet und eine gute Vergleichsmöglichkeit zu dem seit 1977 betriebenen Niederschlagsmesser im Bodenniveau gegeben.

Weiterhin ist in Neuglobsow seit 1981 eine 0,3m²-Niederschlagswanne im Einsatz, deren Niederschlagshöhe in der eisfreien Zeit über eine unterirdische Verbindungsleitung in einem Schwimmerschacht gesammelt und ebenfalls mittels Registrierpegel aufgezeichnet wird. Außerdem wurde für die Erfassung flüssiger Niederschläge von 1977 bis 1984 ein 3,0m²-Verdunstungskessel mit Registriereinrichtung genutzt, dessen Wasseroberfläche zur Verhinderung von Verdunstungsverlusten mit einer Paraffinölschicht bedeckt war.

Entsprechend der Aufstellung im Bodenniveau ist nun für alle vier Meßgeräte eine durch Wind unbeeinflusste Niederschlagsmessung zu erwarten, die weitestgehend übereinstimmen müßte und ggf. nur durch etwas unterschiedliche Benetzungsverluste geringe Differenzen aufweist. Inwieweit dies zutrifft, ist aus Tab.13a zu entnehmen, in der die Meßergebnisse für flüssigen Niederschlag als prozentualer Betrag der 3,0m²-Niederschlagswanne angegeben

Tab. 13a: Höhe der Niederschlagswerte im Bodenniveau (in %) in Bezug auf die 3,0m²-Niederschlagswanne von Neuglobsow, Niederschlagsart N₄

Meßgerät	Meßreihe	Niederschlagshöhenklasse (in mm/d)						gesamt
		0,0 - 0,5	0,6 - 2,0	2,1 - 5,0	5,1 -10,0	≥10,1		
Hellmann-Boden	1977/93	97,7	100,1	99,0	99,9	101,1	100,1	
3,0qm-Ölwanne	1977/84	119,1	101,1	100,4	98,3	97,9	99,2	
0,3qm-Niederschlagswanne	1981/93	78,6	89,1	95,9	99,0	99,0	96,8	

Tab. 13b: Höhe der Niederschlagswerte von der 0,3m²-Niederschlagswanne (in %) in Bezug auf den Hellmann im Bodenniveau, Niederschlagsart N₄

Station	Meßreihe	Niederschlagshöhenklasse (in mm/d)						gesamt
		0,0 - 0,5	0,6 - 2,0	2,1 - 5,0	5,1 -10,0	≥10,1		
Neuglobsow	1981/93	74,9	91,1	97,3	98,8	98,5	97,2	
Grünow	1988/93	86,6	90,2	95,6	98,9	97,2	96,4	
Harzgerode	1982/93	41,3	80,5	93,8	98,1	98,0	94,1	

sind. Ihre Auswahl als Bezugsgerät erfolgte, da hiermit von der gesamten Anlage her mit größter Wahrscheinlichkeit fehlerfreie Meßergebnisse zu erwarten sind.

Das Ergebnis zeigt eine nahezu 100prozentige Übereinstimmung mit dem Hellmann-Niederschlagsmesser im Bodenniveau. Lediglich bei den sehr geringen Niederschlagshöhen bis $0,5\text{mm d}^{-1}$ bleibt dieser mit 97,7% geringfügig zurück, was jedoch entsprechend dem mit 1,8% nur sehr geringen Anteil dieser Niederschlagshöhen an der Gesamtsumme nicht ins Gewicht fällt. Eine systematische Veränderung mit der Niederschlagshöhe ist nicht erkennbar.

Im Mittel sind auch zum ölbedeckten $3,0\text{m}^2$ -Kessel keine nennenswerten Unterschiede gegeben. Allerdings ist hier ein leichter Rückgang mit zunehmender Niederschlagshöhe und ein bedeutend höherer Betrag von 119,1% bei den geringen Niederschlagshöhen zu verzeichnen. Dieser Unterschied resultiert aus 177 Meßwerten mit insgesamt 36,7 bzw. 43,7 mm Niederschlagshöhe. Möglicherweise machen sich hier die Benetzungsverluste der $3,0\text{m}^2$ -Niederschlagswanne stärker bemerkbar, indem bei sehr geringen Niederschlagshöhen im Gegensatz zum ölbedeckten Kessel noch kein meßbarer Anstieg angezeigt wird.

Etwas größer sind die Unterschiede zur $0,3\text{m}^2$ -Niederschlagswanne, deren mittlere Abweichung von 97,2% auch primär von den kleineren Niederschlagshöhen hervorgerufen wird. Als Ursache hierfür kommt neben den Benetzungsunterschieden eine offenbar geringere Ansprechempfindlichkeit des gesamten Meßsystems in Frage. Demzufolge erscheint dieses Meßgerät für die Bewertung der Niederschlagsmessungen des Hellmann im Bodenniveau weniger geeignet.

Unter diesem Aspekt sind auch die Abweichungen an den Stationen Grünow und Harzgerode zu sehen (Tab.13b), die im Vergleich zu Neuglobsow mit 96,4% und 94,1% im Mittel sogar noch etwas größer ausfallen, aber ebenso primär von den kleineren Niederschlagshöhen verursacht werden. Insgesamt sprechen die Vergleichswerte von der $3,0\text{m}^2$ -Niederschlagswanne, dem ölbedeckten $3,0\text{m}^2$ -Kessel und den $0,3\text{m}^2$ -Niederschlagswannen bei höheren Niederschlägen dafür, daß die mit dem Hellmann im Bodenniveau gemessenen flüssigen Niederschläge weitgehend nicht durch Windeinfluß verfälscht sind. Die Abweichungen bei geringen Niederschlagshöhen unterstreichen allerdings auch, daß es meßtechnisch schwierig ist, in jedem Falle absolut fehlerfreie Meßwerte zu gewinnen.

Speziell auf Vergleichsuntersuchungen für Schneeniederschläge sind die Messungen im Bodenniveau mit einem Hellmann in variabler Aufstellungshöhe und die mit der DFIR-Meß-

anlage ausgerichtet. Dabei dient der variable Hellmann dem Ziel, seine Aufstellungshöhe bei der Ablagerung einer Schneedecke jeweils so verändern zu können, daß sich die Auffangfläche in Höhe der Schneeoberfläche befindet. So wird verhindert, daß bei einer höheren Schneedecke die Auffangfläche erheblich tiefer liegt und damit das Hineinwehen von Schnee begünstigt wird. Mit dieser Meßmethode konnten bei Schneehöhen bis ca. 30cm gute Vergleichswerte erzielt werden, während darüber hinaus der fest im Boden installierte Hellmann in der Regel zuwehte. Die Vergleichsergebnisse enthält Tab.14. In Anbetracht der generellen Unsicherheiten bei Schnee- und Mischniederschlag besteht eine gute Übereinstimmung beider Geräte, obwohl im Falle des Schnees die kleineren Werte im variablen Hellmann auf einen geringen Verwehungseffekt im Bodenniveau hindeuten. Eine weitere Differenzierung des Meßergebnisses erfolgte nicht, da signifikante Unterschiede in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit und der Niederschlagshöhe nicht nachzuweisen waren. Somit kann für die stationär eingerichteten Meßstellen davon ausgegangen werden, daß die Ablagerungen einer Schneedecke geringer Höhe ohne größeren Einfluß auf das Meßergebnis bleiben, zumal Schneehöhen über 30cm an den Tieflandstationen ohnehin selten auftreten.

Bei der DFIR-Meßanlage handelt es sich um ein von der WMO empfohlenes Meßsystem (WMO/CIMO,1985), bei dem ein Niederschlagsmesser vom Typ Tretjakow in 3,0m Höhe aufgestellt und von einem doppelten Zaunsystem zum Windschutz umgeben wird. Damit sollen Bedingungen simuliert werden, wie sie optimal für Schneemessungen bestehen, wenn der Niederschlagsmesser in Normalaufstellung mit einer gleich hohen geschlossenen Hecke umgeben ist. Eine entsprechende Meßanlage befindet sich an der Station Harzgerode.

Für den Vergleich mit dem Hellmann im Bodenniveau wurden die DFIR-Messungen entsprechend den Angaben von YANG u.a. (1992) korrigiert. Danach ergeben sich für Schnee mit 98,7% und für Mischniederschlag mit 101,0% nur sehr geringe Abweichungen, die praktisch mit den Ergebnissen vom variablen Hellmann identisch sind. Sie unterstreichen die Brauchbarkeit der Messungen im Bodenniveau, sofern diese entsprechend dem gehandhabten Prinzip der Vernachlässigung wahrscheinlicher Fehlermessungen bereinigt werden.

Im Gegensatz zu dieser guten Übereinstimmung sind die ebenfalls für den Winter vorhandenen Meßwerte der 3,0m²-Niederschlagswanne von Neuglobsow mit 94,6% beim Mischniederschlag und 88,0% beim Schnee erheblich schlechter. Hier macht sich bemerkbar, daß bei dieser Form der Meßwerterfassung ebenso wie bei den beheizten Niederschlagsschreibern er-

Tab.14: Niederschlagshöhe im variabel einstellbaren Hellmann-Niederschlagsmesser (in %), bezogen auf den Hellmann Boden

Station	Meßreihe	Niederschlagsart	
		Mischniederschlag (N8)	Schnee (N7)
Harzgerode	1987/93	101,3	95,9
Marientberg	1988/93	104,9	98,6
Aue	1984/87	99,5	95,7

hebliche Verdunstungsverluste entstehen, die einen unmittelbaren Vergleich der Meßergebnisse nicht zulassen.

5 Gesamtfehler der Niederschlagsmessung

Mit der Bestimmung der einzelnen Teilfehler von Niederschlagsmeßwerten sind die Voraussetzungen für eine zusammengefaßte Darstellung des Gesamtfehlers standardmäßiger Niederschlagsmessungen gegeben. Die hieraus resultierenden Ergebnisse können gleichzeitig als Grundlage für die Korrektur von Niederschlagshöhen dienen. Diese sind sowohl auf langjährige Mittelwerte als auch auf Niederschlagssummen kürzerer Zeiträume bis hin zu Tageswerten anzuwenden. Im folgenden sollen die Gesamtfehler langjähriger Mittelwerte und von Tageswerten der Niederschlagshöhe einer detaillierten Betrachtung unterzogen werden.

5.1 Langjährige Mittelwerte des Niederschlagsmeßfehlers

Einen ersten Überblick über die Größe des Meßfehlers langjähriger Mittelwerte vermittelt die Abb.15. Auf ihr sind die für alle Niederschlagsarten zusammengefaßten mittleren Jahresgänge des gemessenen Windfehlers der vier Stationslagekategorien und der Benetzungs- und Verdunstungsfehler gemäß Tab.3 für Tiefland- und Mittelgebirgsstationen dargestellt. Hierbei bleibt zunächst unberücksichtigt, daß in der Zusammenfassung der Windfehler sowohl tiefer als auch höher gelegene Stationen enthalten sind und somit besonders in den Wintermonaten wegen der unterschiedlichen Schneeanteile noch eine weitere Differenzierung erforderlich wäre. Was gezeigt werden soll, ist das Größenverhältnis der Teilfehler untereinander, insbesondere die Relationen zwischen den Windfehlern einerseits und den Benetzungs- und Verdunstungsfehlern andererseits. Bemerkenswert erscheint in dieser Hinsicht, daß von Mai bis September die prozentualen Benetzungs- und Verdunstungsverluste für Tieflandstationen höher als die Windfehler aller Stationslagen sind und auch die prozentual geringeren Verluste für Mittelgebirgsstationen noch die Windfehler geschützterer Lagen übertreffen. Dagegen überwiegt in den Wintermonaten mit Ausnahme von stark geschützten Stationen der Windfehler erheblich. Hier wirken sich die weitaus größeren Meßfehler bei Schnee und feintropfigem Niederschlag aus.

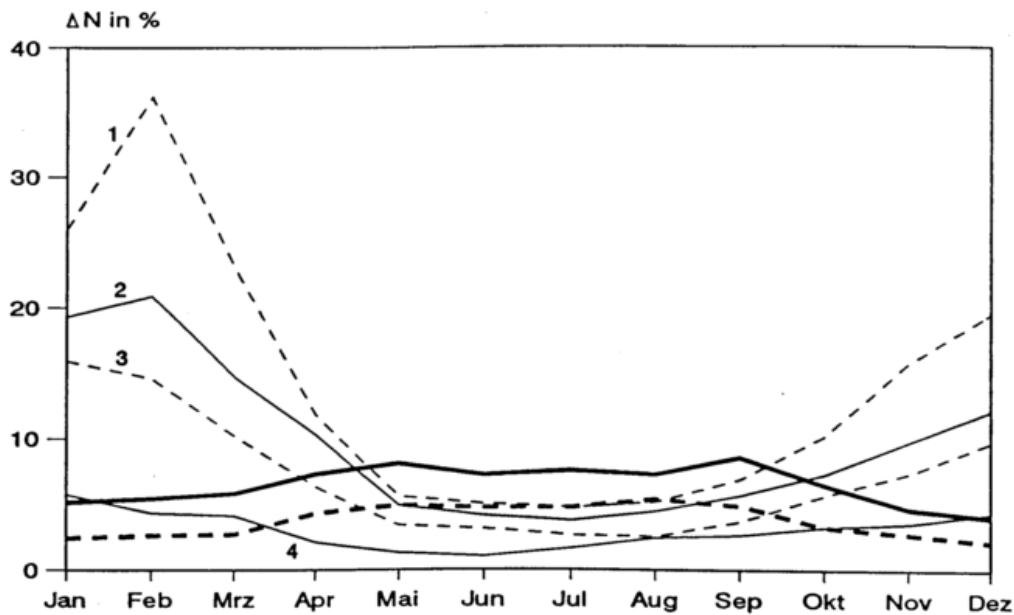


Abb.15: Mittlerer Jahresgang des gemessenen Windfehlers für 1. --- freie, 2. — leicht geschützte 3. --- mäßig geschützte und 4. — stark geschützte Stationslagen sowie des Benetzungs- und Verdunstungsfehlers für Tiefland (—) und Mittelgebirgsstationen (---)

Zur Repräsentanz der auf Abb.15 dargestellten Meßfehler ist zu bemerken, daß diese natürlich sowohl durch die Höhe und Häufigkeit des Niederschlages als auch durch die jeweiligen Anteile von Schnee und Mischniederschlag der zugrundeliegenden Meßperiode geprägt sind. Damit ist zunächst anzunehmen, daß auf Grund der relativ schneearmen Winter der letzten Jahre die gemessenen Windfehler dieser Jahreszeit im Vergleich zum langjährigen klimatologischen Mittel noch etwas zu gering ausfallen.

Eine einfache pauschale Bestimmung des langjährigen mittleren Gesamtfehlers kann durch Zusammenfassung der prozentualen Benetzungs- und Verdunstungsverluste aus Tab.3 und der nach Tab.9 zu berechnenden mittleren Windfehler vorgenommen werden. Neben einer Einschätzung der Windexposition für die richtige Stationszuordnung sind hierzu aus den Angaben der Niederschlagsart die mittleren prozentualen Anteile des Schnee- und Mischniederschlages zu bestimmen. Ergibt sich beispielsweise für den Monat Januar ein Anteil von 20% Schnee, 30% Mischniederschlag und 50% Regen, so ist der mittlere Windfehler für eine mäßig geschützt gelegene Station gemäß Tab.9 als gewichtetes Mittel zu 11,6% zu berechnen. Damit hat der Gesamtfehler einschließlich der 5,1% Benetzungs- und Verdunstungsverlust aus Tab.3 ein Betrag von 16,7%.

Bei dieser Berechnung wird nicht berücksichtigt, daß der prozentuale Benetzungs- und Verdunstungsverlust in einem hohen Maße von der Niederschlagshöhe selbst abhängt und außerdem besonders der Windfehler des flüssigen Niederschlages einen ausgeprägten Jahresgang hat. Eine entsprechend differenzierte Berechnung des Gesamtfehlers ist möglich, wenn neben den Anteilen der Niederschlagsart auch die Anzahl der Tage mit Niederschlag $\geq 0,1$ mm ausgewertet werden und die Windfehler der Niederschlagsart Regen gemäß Abb.9 monatsweise zum Ansatz kommen. Dabei empfiehlt es sich, aus der mittleren Anzahl der Niederschlagstage und dem mittleren Meßfehler pro Niederschlagstag gemäß Tab.4 den Benetzungs- und Verdunstungsverlust direkt in mm Niederschlagshöhe zu bestimmen und ebenso den prozentualen Windfehler in Bezug zur monatlichen Niederschlagshöhe in mm umzurechnen. Aus der Zusammenfassung der Teilfehler mit der gemessenen Niederschlagshöhe ergeben sich so die korrigierten Monatswerte gleich in mm Niederschlagshöhe.

Ein Beispiel dieser differenzierten Berechnungsvariante enthält Tab.15 anhand der Daten von Neuglobsow. Dies ist eine Station des Nordostdeutschen Tieflandes in mäßig geschützter Lage mit der angegebenen Häufigkeit der Niederschlagstage und den prozentualen Anteilen der Niederschlagsart. Die Zuordnung des monatlichen prozentualen Windfehlers für Regen entspricht Abb.9, für Schnee und Mischniederschlag sind nach Tab.9 jeweils 24,5 bzw. 10,4% zur Bestimmung des gewichteten Mittels anzusetzen. Daraus lassen sich nun die Teilfehler $\Delta N(B)$ und $\Delta N(W)$ und die korrigierten mittleren Niederschlagshöhen berechnen. Im vorliegenden Falle erhöht sich die mittlere Jahressumme von 584,4 auf 659,1 mm, was einem Korrekturbetrag von 12,8% entspricht. Die gleiche Berechnung für eine angenommene freie bzw. leicht oder stark geschützte Lage würde zu Korrekturwerten von 19,1%, 15,9% oder 9,5% führen. Mit diesen relativ großen Unterschieden wird nochmals die erhebliche Bedeutung einer richtigen Einschätzung der Stationslage unterstrichen.

Eine weitere Möglichkeit zur detaillierten Fehlerberechnung ergibt sich, wenn die Angaben der Tab.9 in Verbindung mit der mittleren Horizontabschirmung (Tab.6) der zugehörigen Stationskategorien in Form einer Graphik als Abnahme des prozentualen Windfehlers mit zunehmender Horizontabschirmung dargestellt werden (Abb.16). Hieraus kann bei genauer Bestimmung der Horizontabschirmung H' einer Station, wie in Kap. 4.1.3 beschrieben, der jeweilige prozentuale Windfehler der einzelnen Niederschlagsarten abgelesen werden. Auf eine monatliche Bewertung des Windfehlers für Regen ist dann allerdings zu verzichten, was jedoch nur zu relativ geringen Korrekturunterschieden in den einzelnen Monatswerten führt.

Tab.15: Berechnung des langjährigen Mittels des Niederschlagsmeßfehlers am Beispiel der Station Neuglobsow

Größe	Dimension	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr
N-gemessen	mm	45,4	32,4	42,2	38,8	55,9	66,6	61,1	50,5	48,0	40,4	49,8	53,3	584,4
Anzahl N-Tage	-	16,7	13,2	15,3	13,5	13,2	14,3	12,3	11,8	13,3	13,5	17,0	18,1	172,1
$\Delta N(B)$ - Tab.4	mm/d _N	0,12	0,11	0,15	0,22	0,31	0,36	0,35	0,33	0,30	0,20	0,13	0,10	0,22
Anteil N ₄	%	44,5	38,6	64,0	77,0	99,6	100,0	100,0	100,0	100,0	99,5	76,5	55,4	82,0
Anteil N ₆	%	39,0	34,6	22,7	20,4	0,4	-	-	-	-	0,3	16,9	28,1	12,0
Anteil N ₇	%	16,5	26,8	13,3	2,6	-	-	-	-	-	0,2	6,6	16,5	6,0
$\Delta N_4(W)$	%	9,4	9,5	7,6	5,1	3,4	3,1	2,6	2,5	3,6	5,7	5,9	7,5	4,5
$\Delta N(W)$ gesamt	%	12,3	13,8	10,5	6,7	3,4	3,1	2,6	2,5	3,6	5,8	7,9	11,1	6,4
$\Delta N(B)$ -gesamt	mm	2,0	1,5	2,3	3,0	4,1	5,1	4,3	3,9	4,0	2,7	2,2	1,8	36,9
$\Delta N(W)$ -gesamt	mm	5,6	4,5	4,4	2,6	1,9	2,1	1,6	1,3	1,7	2,3	3,9	5,9	37,8
N-korrigiert	mm	53,0	38,4	48,9	44,4	61,9	73,8	67,0	55,7	53,7	45,4	55,9	61,0	659,1

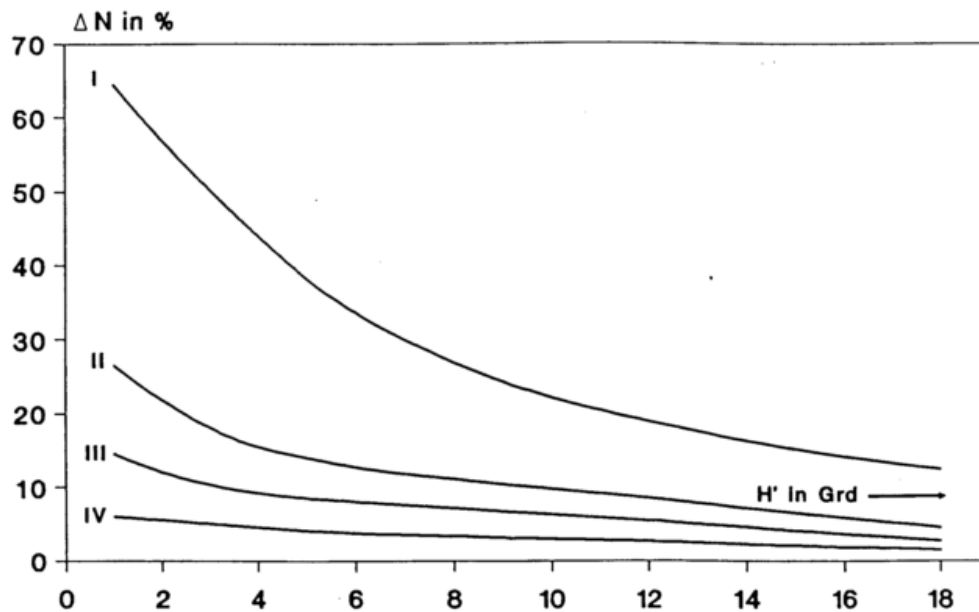


Abb.16: Abnahme des mittleren Windfehlers ΔN mit der Horizontabschirmung H'
 I: Schnee, II: Mischniederschlag, III: Regen(Winter), IV: Regen(Sommer)

Als Grundlage einer ersten Einschätzung regionaler Unterschiede des Niederschlagsmeßfehlers erfolgte gemäß Tab.15 eine gleiche Berechnung auch für die Station Neuhaus in höherer Lage des Thüringer Waldes (845 m ü.NN). Sie ergab für die Annahme einer freien Stationslage 25,3%, für eine leicht geschützte Lage 20,0% und für eine mäßig bzw. stark geschützte Lage 13,6 und 8,8% als potentielle Meßfehler. Die Auswirkungen des bei freieren Lagen stark ansteigenden Windfehlers von Schnee- und Mischniederschlägen (Abb.16) sind somit erheblich, zumal für Neuhaus die Anteile von 17% Mischniederschlag und 23 % Schnee zusammengenommen doppelt so hoch sind wie im Tiefland. Bei den geschützteren Lagen wird dagegen der Anstieg des Windfehlers zunehmend durch den geringer werdenden Benetzungs- und Verdunstungsfehler kompensiert, was bei stark geschützter Lage sogar zu einem etwas kleineren prozentualen Gesamtfehler im Vergleich zur Tieflandstation führt. Die absoluten Verluste sind natürlich bei der Bergstation trotzdem weitaus größer, da die Niederschlagshöhen gegenüber dem Tiefland stark ansteigen.

Mit den Angaben zu den mittleren Benetzungs- und Windfehlern sind somit hinreichende Voraussetzungen für eine näherungsweise Bestimmung des Gesamtfehlers langjähriger Mittelwerte gegeben. In einer kritischen Einschätzung ist allerdings zu bemerken, daß trotz der

Berücksichtigung der möglichen Unterschiede der Niederschlagshäufigkeit und der Niederschlagsarten bei der Anwendung des Verfahrens immer noch von einer gleichbleibenden Häufigkeitsverteilung der Niederschlagshöhen ausgegangen wird, wie sie definitiv dem Ergebnis gemessener mittlerer prozentualer Windfehler zugrunde liegen. Die Auswertungen der Tageswerte in Kap. 4.2.3 haben aber gezeigt, daß gerade die Niederschlagshöhe einen großen Einfluß auf den Windfehler hat. Eine Veränderung in den Anteilen kleinerer und größerer Tageswerte der Niederschlagshöhe zieht folglich auch eine Veränderung des mittleren prozentualen Windfehlers insgesamt nach sich. Von entsprechenden Gegebenheiten muß vor allem bei der Zunahme der Niederschlagshöhe mit der geographischen Höhenlage ausgegangen werden, da sich diese weniger aus einer Zunahme der Niederschlagshäufigkeit ergibt, sondern primär auf durchschnittlich höhere Niederschlagswerte zurückzuführen ist. Das bedeutet eine Abnahme des relativen Windfehlers und somit für die pauschale Übertragung der Ergebnisse auf Mittelgebirgsbedingungen auch eine zu hoch ausfallende Einschätzung des Gesamtfehlers. Eine umfassende Lösung des Problems ist nur durch die Berechnung der Meßfehler täglicher Niederschlagshöhen zu erzielen. Sie hat den Vorteil, daß von vornherein alle beeinflussenden Parameter des Niederschlagsregimes entsprechend ihres jeweiligen Auftretens berücksichtigt werden.

5.2 Mittlere Tageswerte des Niederschlagsmeßfehlers

In prinzipiell gleicher Weise, wie für die langjährigen Mittelwerte, sind auch die mittleren Korrekturen für die Tageswerte der Niederschlagshöhe aus der Zusammenfassung der Teilfehler zu bestimmen. Grundlage hierfür bilden die jeweiligen Abhängigkeiten dieser Teilfehler von der Niederschlagshöhe, wie sie einmal für den Benetzungs- und Verdunstungsverlust in Tab.5 und zum anderen für den Windfehler als Beispiel auf Abb.14 angegeben sind.

Aus der Addition dieser Teilfehler ergibt sich dann der Gesamtfehler der Niederschlagsmessung, wiederum als abhängige Größe von der täglichen Niederschlagshöhe. Eine Darstellung der Teilfehler und der daraus resultierenden Gesamtfehler für die nach Sommer- und Winterhalbjahr unterteilten flüssigen Niederschläge zeigt Abb.17 am Beispiel einer freien Stationslage. Bei dieser Niederschlagsart führen die einerseits größeren Benetzungs- und Verdunstungsverluste im Sommer und die andererseits größeren Windfehler im Winter zu

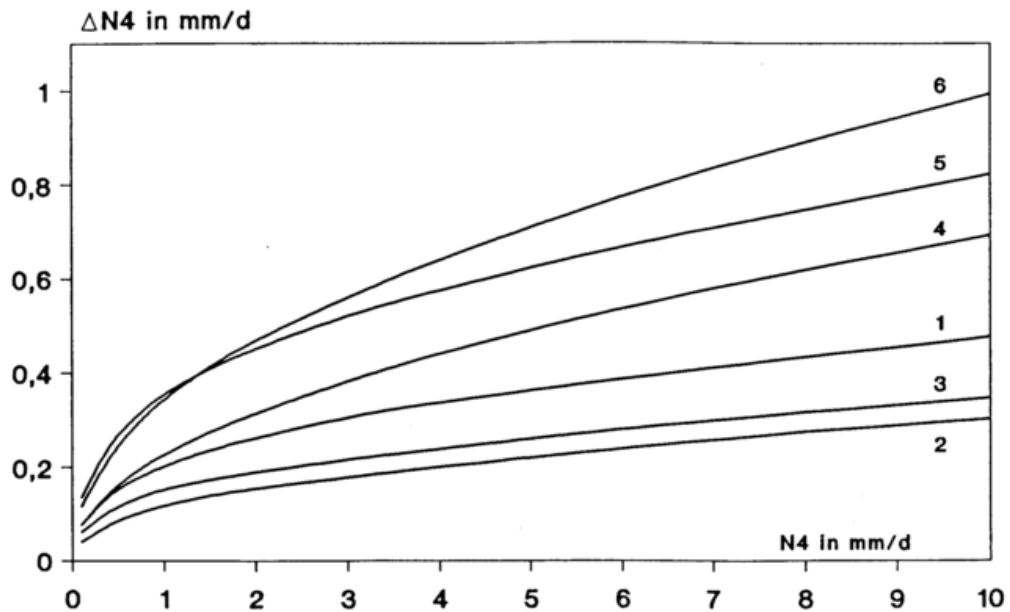


Abb.17: Mittlere Zunahme der Fehler mit der Niederschlagshöhe bei Regen, freie Stationslage: Benetzung und Verdunstung im Sommer(1) und Winter(2), Windfehler im Sommer(3) und Winter(4), Gesamtfehler im Sommer(5) und Winter(6)

einem insgesamt nur relativ geringen jahreszeitlichen Unterschied der Gesamtfehler. Dieser Unterschied fällt bei leicht bis stark geschützter Stationslage sogar noch geringer aus. Werden entsprechende Zusammenfassungen ebenso für den Schnee- und Mischniederschlag vorgenommen, so ergeben sich für jede der vier definierten Stationslagen auch je vier Funktionskurven der Fehlerzunahme mit der Niederschlagshöhe. Diese sind als Exponentialfunktion vom Typ

$$\Delta N = bN^\epsilon$$

optimal anzupassen. Dabei zeigt sich, daß die Exponenten ϵ lediglich zwischen den Niederschlagsarten bzw. zwischen Sommer- und Winterregen signifikant voneinander abweichen und die weitere Unterscheidung nach Stationslagen somit nur durch den jeweiligen Faktor b bestimmt wird. Für flüssigen Niederschlag im Sommerhalbjahr und freie Stationslage ist beispielsweise die beste Anpassung

$$\Delta N = 0,345 N_4^{0,38},$$

während für eine stark geschützte Lage bei gleichem Exponenten für $b = 0,245$ gilt. Insgesamt ergeben sich 16 Korrekturfunktionen mit vier unterschiedlichen Exponenten und 16 Koeffizienten, mit denen in sehr differenzierter Form der Einfluß von Niederschlagsart, Niederschlagshöhe und Windexposition auf den Niederschlagsmeßfehler zu bestimmen ist.

Zur genauen Festlegung der Koeffizienten b wurden die aus der Anpassung berechneten Werte zu den mittleren Horizontabschirmungen der nach Gruppen geordneten Stationen (Tab.6) in Beziehung gebracht. Es ergeben sich die auf Abb.18 dargestellten Zusammenhänge, woraus die Größe des Koeffizienten b für jede der vier Niederschlagsarten als Funktion der Horizontabschirmung ablesbar ist. Dies ist erforderlich, da die Mittel der Horizontabschirmungen der aus einer Lagekategorie verfügbaren Stationen nicht genau den hierfür definierten Mittelwerten entsprechen. So haben beispielsweise die zur leicht geschützten Lage zählenden Stationen (Tab.6) eine mittlere Horizontabschirmung von $3,9^\circ$, während nach Tab.7 das Mittel des hierfür geltenden Bereiches $5,0^\circ$ beträgt. Durch die Anpassung von b über Abb.18 wird dies berücksichtigt, womit auch die Relationen der Stationslagen untereinander definitionsgemäß zum Ansatz kommen.

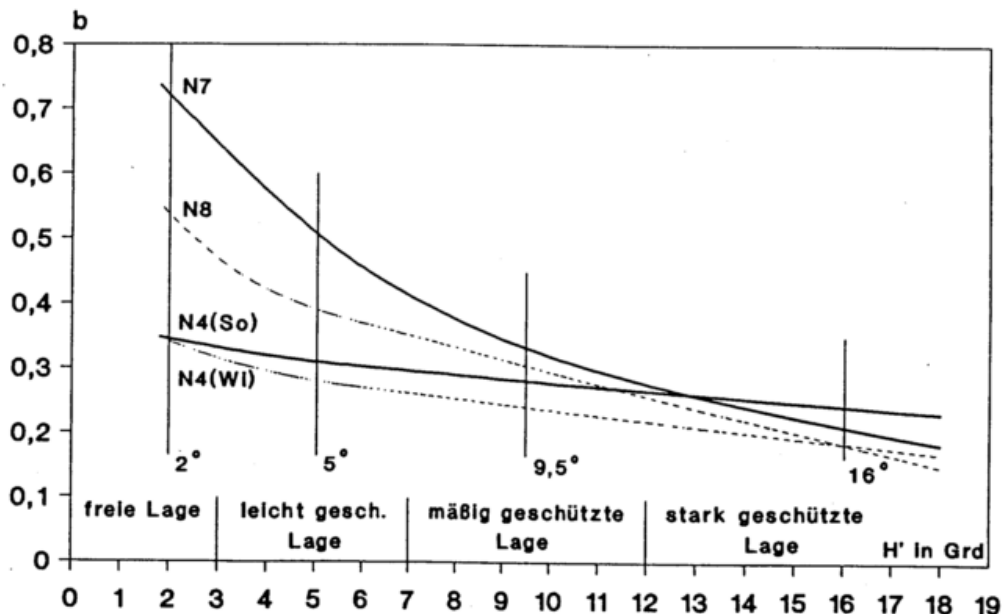


Abb.18: Abhängigkeit des Koeffizienten b der Niederschlagskorrekturfunktion $\Delta N = b \cdot N^c$ von der Horizontabschirmung (H') für die Niederschlagsarten N4(So,Wi), N8 und N7

Für die Korrektur von Tageswerten der Niederschlagshöhe N_{korr} gilt dann

$$N_{\text{korr}} = N + bN^c$$

mit den in Tab.16 zusammengefaßten Koeffizienten, wobei die Durchführung entsprechender Berechnungen auch für lange Niederschlagsreihen bei den heutigen rechentechnischen Möglichkeiten kein Problem darstellt. Wichtig ist lediglich eine genaue Einschätzung der Stationslage und die Verfügbarkeit eines entsprechend aufbereiteten Datenmaterials, das in jedem Falle eine eindeutige Zuordnung der Niederschlagsart erlaubt. Der Vorteil gegenüber einer pauschalen Niederschlagskorrektur ist dabei erheblich. Zum einen werden alle regional und orographisch bedingten Unterschiede in der Häufigkeit der Niederschlagsarten und der Niederschlagshöhen in ihrer Wirkung auf den Meßfehler entsprechend den tatsächlichen Niederschlagsbedingungen berücksichtigt, zum anderen sind so auch die mittleren Fehler beliebiger Zeitscalen zu bestimmen, was besonders in den Wintermonaten mit den stark variierenden Anteilen der einzelnen Niederschlagsarten zu wesentlich genaueren Ergebnissen führt.

6 Anwendung des Korrekturverfahrens

Mit der Ableitung spezifischer, von der Art und der Höhe des Niederschlages abhängiger Korrekturfunktionen für Tageswerte der Niederschlagshöhe wurden Anwendungsmöglichkeiten geschaffen, die weitgehend frei von einschränkenden Annahmen hinsichtlich der Gültigkeit und Übertragbarkeit des Korrekturverfahrens sind. Insofern bestehen die notwendigen Voraussetzungen für eine methodisch einheitliche flächendeckende Niederschlagskorrektur. Offen bleibt lediglich die Bestimmung der Windexposition der Niederschlagsstationen. Da die hierzu erforderlichen Informationen von den mehr als 4500 nebenamtlichen Stationen des Deutschen Wetterdienstes bisher zum größten Teil nicht erfaßt sind, wurden die weiteren Untersuchungen jeweils unter Vorgabe aller vier definierten Lagekategorien von frei bis stark geschützt durchgeführt. So ergeben sich regionale Verteilungen der Niederschlagskorrektur, die den Meßfehler jeweils unter einheitlichen Stationslagebedingungen charakterisieren. Die erzielten Ergebnisse werden in den nachfolgenden Darlegungen beschrieben, wobei den Ausführungen zur Niederschlagskorrektur zunächst eine kurze Analyse der korrekturbestimmenden Niederschlagsparameter vorangestellt wird.

Tab.16: Abhängigkeit der Koeffizienten ϵ und b der Niederschlagskorrekturfunktion $\Delta N = bN^\epsilon$ von der Niederschlagsart und der Horizontabschirmung

Niederschlagsart	ϵ	Horizontabschirmung*			
		2°	5°	9,5°	16°
N4 (Sommer)	0,38	0,345	0,310	0,280	0,245
N4 (Winter)	0,46	0,340	0,280	0,240	0,190
N8	0,55	0,535	0,390	0,305	0,185
N7	0,82	0,720	0,510	0,330	0,210

* freie Stationslage : $H' = 2^\circ$, leicht geschützte Stationslage : $H' = 5^\circ$,
 mäßig geschützte Stationslage : $H' = 9,5^\circ$, stark geschützte Stationslage : $H' = 16^\circ$

6.1 Niederschlagsklimatologische Grundlagen

Die Grundlage der Untersuchungen bilden die 30jährigen Niederschlagsreihen 1961/90 von rund 450 Klima- und Niederschlagsstationen, für deren Auswahl neben der Verfügbarkeit und Vollständigkeit auch eine möglichst gleichmäßige räumliche Verteilung mit einer etwas geringeren Stationsdichte im Norddeutschen Tiefland und einer etwas größeren Stationsdichte in den orographisch stärker gegliederten Gebieten des mittleren und südlichen Teils Deutschlands als Kriterien dienten. Von jeder Station wurden neben der Niederschlagshöhe auch die mittlere monatliche und jährliche Anzahl der Tage mit Niederschlag $\geq 0,1\text{mm}$, die durchschnittliche Niederschlagshöhe pro Niederschlagstag, die monatlichen und jährlichen prozentualen Anteile von Regen, Schnee und Mischniederschlag sowie der mittlere Jahresgang der korrigierten Niederschlagshöhe (in %) für die vier definierten Windexpositionen berechnet. Eine Übersicht hierzu enthält Tab.17 am Beispiel der Station Potsdam. Mit diesen Auswertungen waren hinreichende Informationen für eine erste großräumig generalisierte Einschätzung der korrekturbestimmenden niederschlagsklimatologischen Bedingungen gegeben, zumal es sich zeigen sollte, daß sowohl die untersuchten Parameter als auch die berechneten Niederschlagskorrekturen in geringeren räumlichen Entfernungen nicht so große Unterschiede aufweisen wie die Niederschlagshöhe selbst.

6.1.1 Mittlere Anzahl von Niederschlagstagen

Eine der Einflußgrößen auf die Höhe des Niederschlagsmeßfehlers ist die Anzahl der Niederschlagstage und die damit im Zusammenhang stehende Häufigkeit von Benetzungen des Niederschlagsmessers. Entsprechend der im Korrekturverfahren gehandhabten Praxis wurde bei der durchgeführten Auszählung ein Tag dann als Niederschlagstag bewertet, wenn eine meßbare Niederschlagshöhe von mindestens $0,1\text{mm}$ vorlag, womit die in der routinemäßigen Datenerfassung ebenfalls enthaltenen Tage mit $0,0\text{mm}$ nicht berücksichtigt wurden.

Die regionale Verteilung der mittleren jährlichen Anzahl von Niederschlagstagen ist als Übersichtskarte auf Abb.19 dargestellt. In großen Teilen Deutschlands ist danach an 170 bis 200 Tagen im Jahr mit Niederschlag zu rechnen, nur in den höheren Lagen der Mittelgebirge und der Alpen, im Gebiet von der Lüneburger Heide bis zur Elbe- und Wesermün-

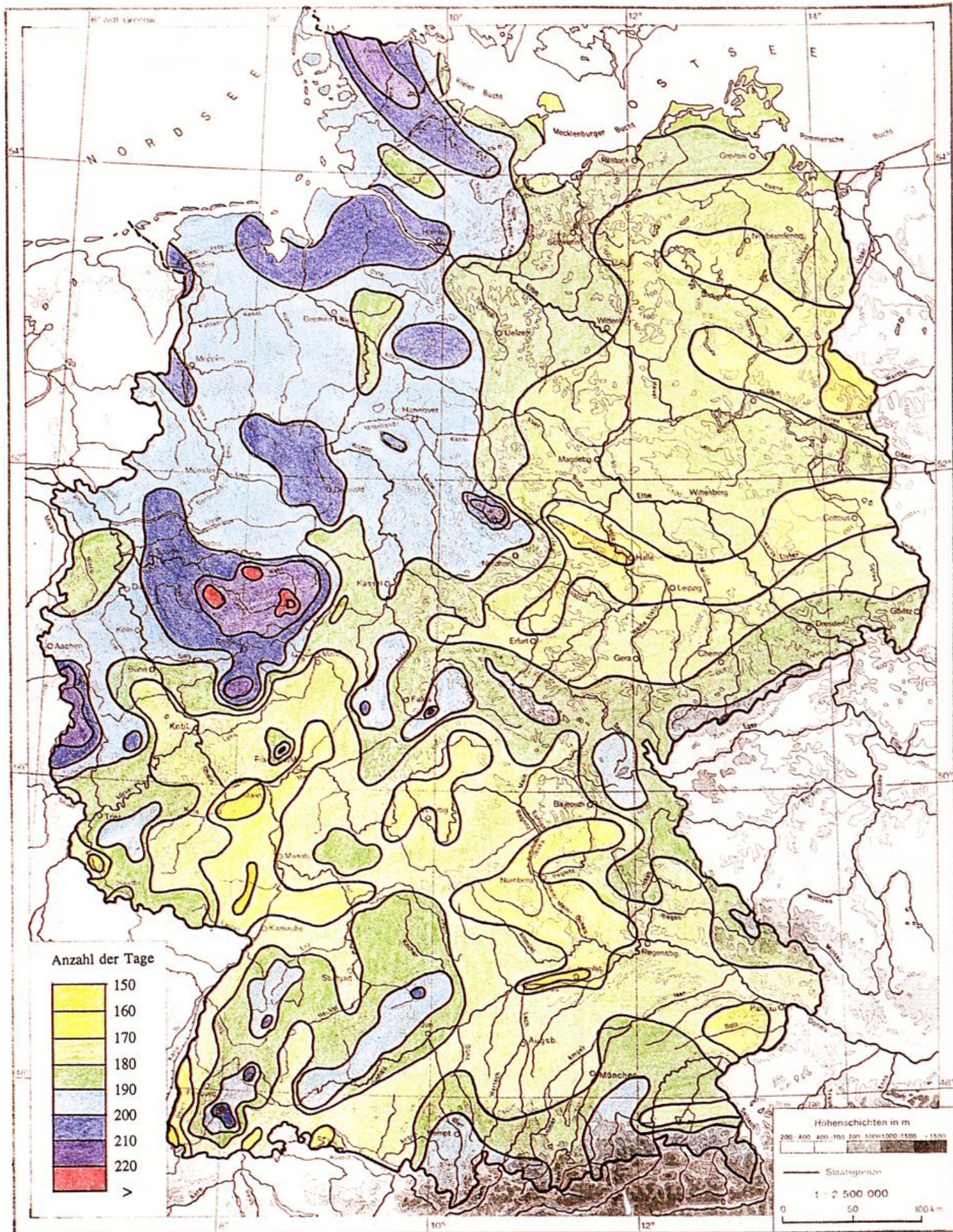


Abb.19: Mittlere Anzahl der Tage mit einer Niederschlagshöhe $N \geq 0,1$ mm (1961/90)

derung sowie im Norden Schlesiens treten mehr als 200 Niederschlagstage im Jahr auf. Maximalwerte werden in den Gipfellagen des Rothaargebirges und des Schwarzwaldes mit über 220 Tagen erreicht. Größere Bereiche mit einer jährlichen Anzahl von weniger als 170 Niederschlagstagen finden sich im Nordosten Deutschlands von der Mecklenburger Seenplatte bis zum Oderbruch und vom Thüringer Becken bis zur Niederlausitz, im Rhein-Main-Gebiet sowie in Teilen Frankens und des südwärts angrenzenden Donautals. In letzterem werden ebenso wie im Hessischen Ried, im Gebiet östlich des Harzes und im Oderbruch auch teilweise unter 160 Niederschlagstage gezählt.

Ganz allgemein läßt sich das Gebiet der Bundesrepublik in zwei Bereiche unterteilen. Dabei ist im Norddeutschen Tiefland etwa nördlich der Linie von Meppen bis Görlitz eine von West nach Ost verlaufende deutliche Abnahme der Anzahl der Niederschlagstage von z.T. 200 auf unter 170 Tage zu erkennen. Im Bereich der Mittelgebirge und weiter südlich bis zum Alpenrand ist diese durchschnittliche Abnahme von West nach Ost ebenfalls gegeben. Sie wird jedoch vielfach durch orographisch bedingte Effekte wie die Zunahme der Niederschlagstage mit der Höhe oder auch durch die Unterschiede in Luv- und Leelagen überlagert, wobei auf der nach Westen gerichteten Luvseite der Mittelgebirge infolge von Stauwirkungen jeweils eine deutlich höhere Anzahl von Niederschlagstagen auftritt. Dadurch ergeben sich einerseits auf relativ engem Raum markante Unterschiede wie beispielsweise der Abfall vom Hunsrück zum Hessischen Ried oder der von der West- zur Ostseite des Harzes, während andererseits große Gebiete wie der Nordwesten und der Nordosten Deutschlands und auch ein Großteil des bayerischen Raumes nur eine geringfügige Variabilität in der Anzahl der Niederschlagstage aufweisen.

6.1.2 Mittlere Niederschlagshöhe pro Niederschlagstag

Bereits mit der Ableitung der Korrekturfunktionen für Tageswerte ist der primäre Einfluß der Niederschlagshöhe auf die Niederschlagskorrektur festgelegt. Als charakteristische Größe hierfür kann die mittlere Niederschlagshöhe pro Niederschlagstag berechnet werden. Sie stellt ein Maß für die durchschnittliche Intensität des Niederschlages dar, wobei natürlich zu bedenken ist, daß die Tageswerte auch von der Niederschlagsandauer mitbestimmt werden. Ausschlaggebend für die Bedeutung der mittleren Niederschlagshöhe ist der enge Zusammenhang mit der Häufigkeitsverteilung der Tageswerte. Dabei ist davon auszugehen, daß mit

zunehmender Höhe der Tagesmittel auch der Anteil höherer Tageswerte anwächst, gleichbedeutend mit einer relativen Abnahme des prozentualen Niederschlagsfehlers (vergl. Tab.11). Entsprechende Untersuchungen ergaben, daß weitgehend unabhängig von regionalen Bedingungen in jedem Falle ein ganz eindeutiger Zusammenhang zwischen der mittleren Niederschlagshöhe pro Niederschlagstag und der Häufigkeitsverteilung der Tageswerte besteht. Auf Abb.20 sind für eine Anzahl von Stationen mit sehr unterschiedlichen durchschnittlichen Tageswerten die relativen Summenhäufigkeiten dargestellt. Ihre Anordnung von Artern (2,77mm/d) über Potsdam (3,36mm/d), Nürburg (4,23mm/d), Berleburg (5,53mm/d), Endorf (6,47mm/d), Bad Reichenhall (8,52mm/d) bis Todtmoos (10,28mm/d) entspricht exakt der Rangfolge der mittleren Niederschlagshöhen, obwohl gezielt regional weit voneinander entfernt gelegene Stationen ausgewählt wurden.

Mit Artern im Thüringer Becken und Todtmoos im Schwarzwald sind auch die beiden extremsten aller untersuchten Stationen in die Darstellung einbezogen. Sie haben dementsprechend auch die am weitesten voneinander abweichenden Häufigkeitsverteilungen. So weisen beispielsweise in Artern 48% der Tageswerte eine Höhe von $\leq 1,0$ mm auf und nur 5,5% liegen über 10,0mm. Dem gegenüber beträgt in Todtmoos der Anteil aller Tageswerte

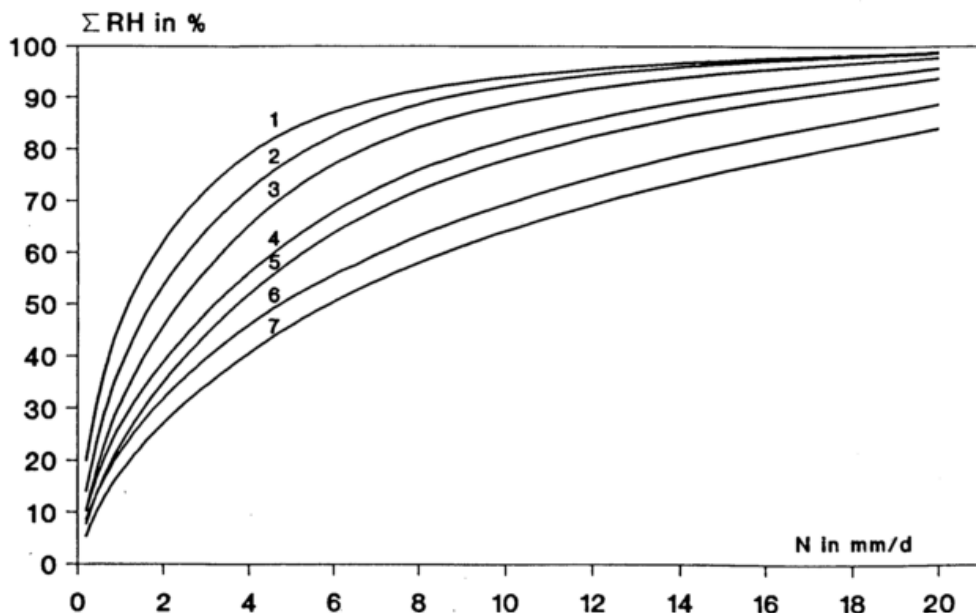


Abb.20: Relative Summenhäufigkeit (ΣRH) der Anzahl der Tage mit Niederschlagshöhen $\leq N$
 1-Artern, 2-Potsdam, 3-Nürburg, 4-Berleburg, 5-Endorf, 6-Bad Reichenhall, 7-Todtmoos

$\leq 1,0\text{mm}$ lediglich 18,1%, aber 35,0% sind höher als 10,0mm. Auch die Medianwerte sind mit 1,1mm und 5,7mm erheblich voneinander verschieden.

Als ebenso aufschlußreich erweisen sich die Unterschiede in den jeweiligen Anteilen der Niederschlagshöhe am Gesamtniederschlag. So ergeben in Artern alle Tageswerte $\leq 1,0\text{mm}$ insgesamt 7,0% und alle Tageswerte $\leq 10,0\text{mm}$ insgesamt 66,6% der mittleren Jahressumme von 455mm. Dagegen betragen in Todtmoos die jeweils entsprechenden Anteile nur 0,8 und 21,7% der mit 1742mm wesentlich höheren Jahressumme. In diesen Zusammenhängen ist auch die Bedeutung der mittleren Niederschlagshöhe pro Niederschlagstag als charakteristische korrekturbestimmende Größe begründet.

Eine Gesamtübersicht ihrer regionalen Verteilung zeigt Abb.21. Sie macht deutlich, daß sich in einem großen Teil Deutschlands die mittleren Tageswerte der Niederschlagshöhe zwischen 3 und 4mm bewegen und nur in den höheren Lagen der Mittelgebirge, im Schwarzwald und im Alpenraum Werte von 5mm und mehr überschritten werden. In ihren wesentlichen Grundzügen läßt sich die Verteilung wie folgt charakterisieren:

Relativ einheitlich sind die Bedingungen im Gebiet nördlich der Mittelgebirge, wobei ähnlich der Anzahl der Niederschlagstage ein in diesem Fall nordwest-südöstlich gerichtetes Gefälle besteht. Es erstreckt sich von mittleren Tageswerten mit etwas über 4mm im Bereich der Nordseeküste und der Ems abnehmend auf etwas über 3mm in Odernähe. Minimalwerte unter 3mm werden nur im Ostharz und Thüringer Becken sowie in einem kleinen Gebiet um Magdeburg gemessen.

Im Bereich der Mittelgebirge und weiter südlich bis zur Donau hin werden die mittleren Tageswerte stark durch die Orographie geprägt. Sie bewegen sich weitgehend zwischen 3,5mm in den tieferen Lagen und maximal etwas über 6mm in den Gipfellagen (Kahler Asten, Wasserkuppe, Brocken), mit einer allerdings ebenso wie bei der Anzahl der Niederschlagstage erheblich durch Luv- und Lee-Effekte überlagerten Höhenabhängigkeit.

Südlich der Donau steigt die durchschnittliche Niederschlagshöhe deutlich an. Sie erreicht im gesamten Voralpenraum bereits Tagesmittelwerte von mehr als 5 bis 6mm, um in den Alpen selbst weitgehend über 7 bis 8mm zu liegen und in den Gipfellagen auch teilweise 9mm zu überschreiten. Dabei ist die Abhängigkeit von der Höhenlage insgesamt etwas besser ausgeprägt, als in den Mittelgebirgen.

Eine markante Sonderstellung in der Höhe der mittleren Tageswerte nimmt der Schwarzwald ein. Hier wird das Niederschlagsregime offensichtlich durch einen großen Anteil hochintensi-

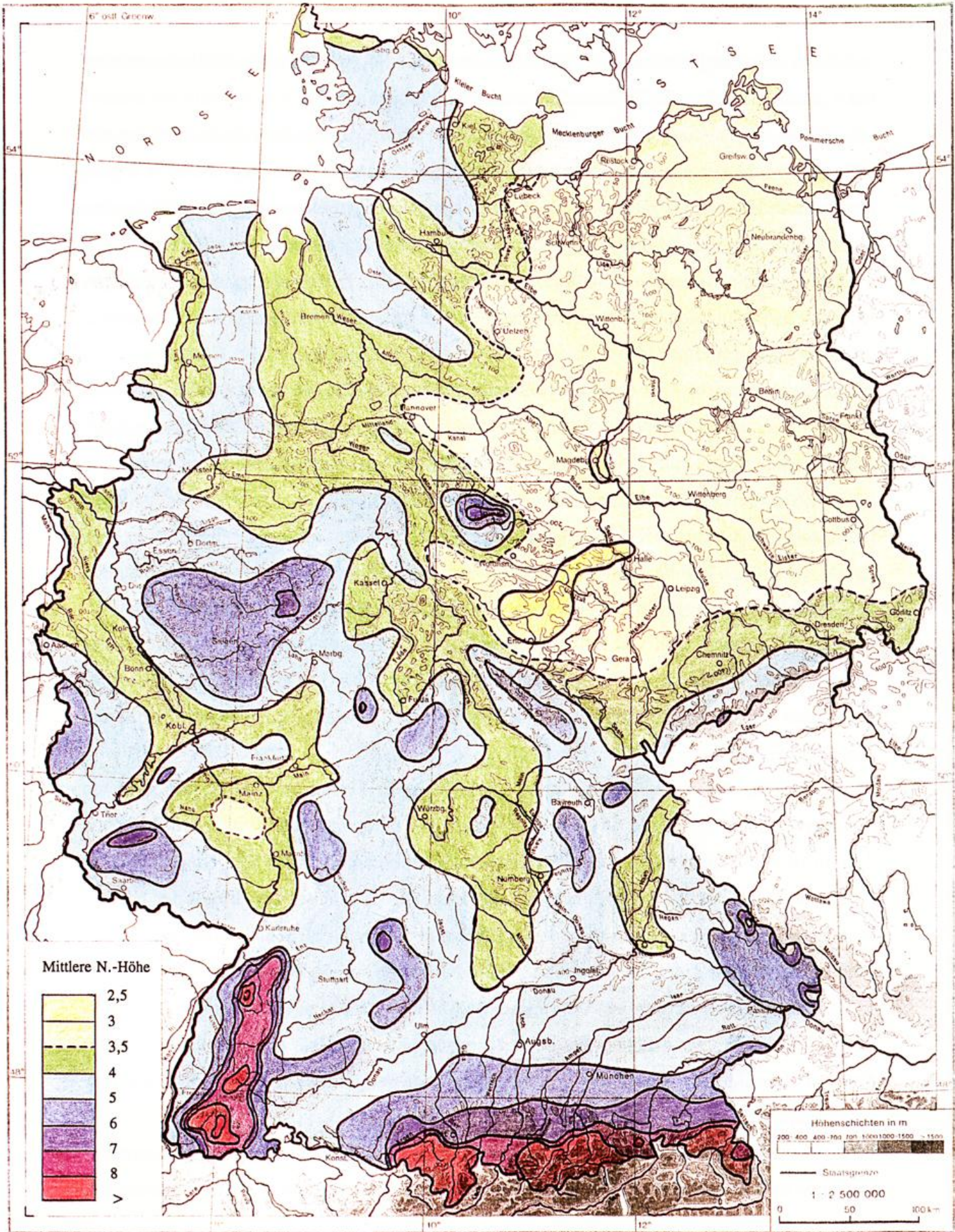


Abb.21: Mittlere Niederschlagshöhe pro Niederschlagstag mit $N \geq 0,1\text{mm}$ (1961/90)

ver Niederschläge geprägt. So werden im nördlichen Teil auch schon in den tieferen Lagen Tagesmittel von über 6 bis 7mm erreicht (Baden-Baden, 280m ü.NN, 6,18mm; Bad Herrenalb, 351m ü.NN, 7,34mm) und damit bereits die Höchstwerte der Gipfellagen der sonstigen Mittelgebirge übertroffen. In den größeren Höhen des Schwarzwaldes liegen die mittleren Tageswerte dann durchgehend über 8mm mit dem bereits genannten Höchstwert von 10,28mm in Todtmoos.

Generell ist festzustellen, daß auch die mittleren Niederschlagshöhen pro Niederschlagstag in weiten Teilen Deutschlands ein großflächig relativ einheitliches Verhalten aufweisen und nur in den hervorgehobenen Gebieten wie Schwarzwald, Alpen und Mittelgebirgsgipfel einige kleinräumig stärker ausgeprägte Variabilitäten zu verzeichnen sind.

6.1.3 Mittlere Anteile der Niederschlagsarten

Als dritter korrekturbestimmender Niederschlagsparameter ist der Anteil der Schnee- und Mischniederschläge am Gesamtniederschlag zu nennen. Hiermit wird die erheblich größere Überwehung des Niederschlagsmessers bei diesen Niederschlagsarten und somit das dementsprechende Anwachsen des Meßfehlers gekennzeichnet.

Für die Untersuchung der regionalen Verteilung der Schnee- und Mischniederschläge wurden die Beträge der beiden Niederschlagsarten zusammengefaßt und als prozentualer Anteil am Gesamtniederschlag auf Abb.22 dargestellt. Zu ihrer Erläuterung ist darauf hinzuweisen, daß im Tiefland dieser prozentuale Gesamtanteil nur zu einem Viertel bis maximal einem Drittel aus reinem Schneeniederschlag besteht. Dieses Verhältnis verändert sich mit zunehmender Höhenlage zugunsten des Schneeanteils, der in den östlichen Mittelgebirgen bereits ab Höhen über 700m größer als der Mischniederschlag werden kann. In den westlichen Mittelgebirgen und im Alpenland ist dies dagegen erst im Mittel bei über 1500m der Fall.

Zur Bewertung der regionalen Verteilung ist zunächst ganz allgemein festzustellen, daß die Anteile des Schnee- und Mischniederschlages hauptsächlich von der Höhenlage und außerdem noch etwas durch die von West nach Ost zunehmende Kontinentalität bestimmt werden. So weist der Westteil des Norddeutschen Tieflandes nur zwischen 10 und 15% Schnee- und Mischniederschlag auf und im äußersten Westen werden sogar 10% unterschritten. Im östlichen Tiefland liegen die Werte dagegen durchgehend über 15 bis nahe 20%.

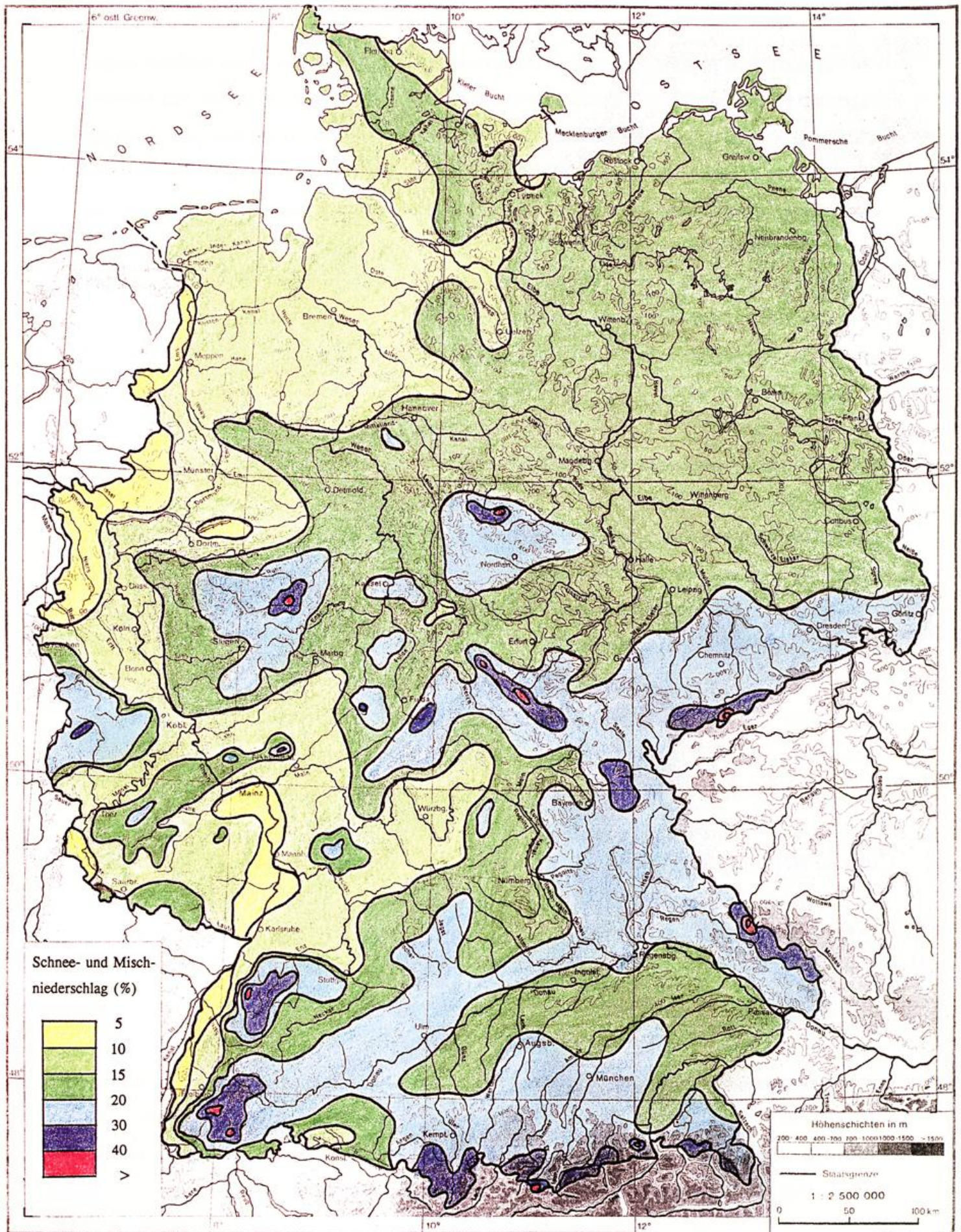


Abb.22: Mittlerer prozentualer Anteil von Schnee- und Mischniederschlag am Gesamtniederschlag (1961/90)

In den Grundzügen besteht diese Verteilung auch in den tieferen Lagen der Mittelgebirge und weiter südlich, wobei in Teilen des Rheingrabens ebenfalls 10% unterschritten werden. Bemerkenswert erscheint weiterhin, daß in großen Teilen des höhergelegenen Main-Neckar-Gebietes und im Raum südlich der Donau keine größeren Schneeanteile auftreten als im nordöstlichen Tiefland. Ansonsten dominiert der Einfluß der Höhenlage, der im Gegensatz zu den anderen korrekturbestimmenden Parametern etwas deutlicher zum Ausdruck kommt. Dementsprechend ist auch die regionale Verteilung mehr an die Höhenlagen angepaßt, wobei etwa ab 300 bis 400m über NN mehr als 20% und ab 600 bis 700m über NN mehr als 30% der Niederschläge als Schnee- oder Mischniederschlag fallen. Im Bereich der östlichen Mittelgebirge liegen diese Höhengrenzen sogar noch etwas tiefer. Diese Angaben sind allerdings wegen der ebenfalls auftretenden Luv- und Lee-Effekte nur als eine grobe Annäherung anzusehen.

Ebenso sollten auch die Darlegungen zu den einzelnen Niederschlagsparametern insgesamt nur einen allgemeinen Überblick gewähren, der lediglich die wesentlichen großräumigen Unterschiede hervorhebt und besonders in den orographisch stärker gegliederten Gebieten keinesfalls den Ansprüchen einer detaillierten regionalen Analyse genügt.

6.2 Regionale und jahreszeitliche Unterteilung der Niederschlagsmeßfehler

Das wichtigste Ergebnis der Anwendung des Korrekturverfahrens sind natürlich die berechneten systematischen Niederschlagsmeßfehler für die vier definierten Windexpositionen aller 400 Niederschlagsstationen. Sie wurden einer eingehenden Analyse unterzogen, die sich schwerpunktmäßig auf das Auffinden regionaler Übereinstimmungen bzw. eindeutiger Unterschiede richtete. Ziel dieser vergleichenden Betrachtungen war es, zu einer für praktische Zwecke nutzbaren Abgrenzung von Gebieten mit einer weitgehend einheitlichen Niederschlagskorrektur zu kommen. Als ausschlaggebende Kriterien hierfür erwiesen sich neben den Jahresmitteln vor allen Dingen die mittleren Jahrgänge der Niederschlagsmeßfehler. Sie sind als die eigentliche Grundlage für die letztlich getroffene Gebietseinteilung zu nennen.

6.2.1 Mittlerer Jahresgang der Niederschlagsmeßfehler

Ein Teil der charakteristischen Merkmale des mittleren Jahresganges der Niederschlagsmeßfehler ist bereits den Angaben in Tab.17 zu entnehmen. Dies betrifft sowohl den ausgeprägten Jahresgang mit hohen Meßfehlern in den Wintermonaten und geringeren in den Sommermonaten als auch die relativ großen Unterschiede in den Jahresmitteln zwischen den jeweiligen Stationslagen. So treten bei freier Lage insgesamt etwa doppelt so hohe Meßfehler auf wie bei stark geschützter Lage. Dies ergibt sich im wesentlichen für alle untersuchten Stationen und kann mithin allgemein als typisches Merkmal für den Einfluß der Windexposition gelten.

Weiterhin ist ersichtlich, daß die Unterschiede primär durch die Winterniederschläge geprägt werden, indem die Fehler bei freier Lage mit über 30% das Dreifache einer stark geschützten Stationslage erreichen können. In den Sommermonaten liegen dagegen die mittleren Differenzen zwischen den beiden Extremen der Windexposition nur bei rund 3 bis maximal 4%. Somit werden in freier Lage die Fehler einer stark geschützten Station nur höchstens um das 1,5fache übertroffen. Auch dieses Verhalten besitzt weitgehend Allgemeingültigkeit. Weitere charakteristische Merkmale lassen sich aus den regionalen Vergleichen der mittleren Jahresgänge ableiten. Als Grundlage hierfür wurde zunächst anhand einer ersten groben Gebietseinteilung eine gruppenweise Zusammenfassung solcher Stationen vorgenommen, von denen aus den Untersuchungsergebnissen ein weitgehend einheitliches Fehlerverhalten ersichtlich war. Diese jeweils für ein Gebiet als typisch anzunehmenden Jahresgänge zeigen nun untereinander sowohl markante Unterschiede, als auch mehrfach gute Übereinstimmungen. Auf letztere wird im Zusammenhang mit der Regionalisierung noch näher eingegangen. Die wesentlichsten regionalen Unterschiede in den Niederschlagsmeßfehlern lassen sich am besten anhand graphischer Darstellungen verdeutlichen. Zu diesem Zwecke wurden auf den Abb.23 bis 25 für mehrere Gebiete jeweils die mittleren Jahresgänge für freie und für mäßig geschützte Stationslagen untereinander verglichen. Die Auswahl dieser zwei Stationslagen erfolgte, da zum einen unter den Bedingungen einer freien Lage die regionalen Unterschiede am deutlichsten hervortreten und zum anderen mit der Einbeziehung der mäßig geschützten Lage sowohl die Abnahme dieser regionalen Unterschiede als auch die Verringerung der Meßfehler selbst gezeigt werden kann. Außerdem werden anhand dieser beiden Lagebedingungen sowohl die maximalen als auch die von der Stationslage her wahrscheinlich am

häufigsten zu erwartenden mittleren Fehlerbeträge dargestellt.

Abb.23 enthält den Vergleich der Stationen aus dem Gebiet des Norddeutschen Tieflandes. Durch die Unterteilung in drei Bereiche wird die Zunahme der prozentualen Meßfehler von Westen nach Osten verdeutlicht, die hauptsächlich auf die stark anwachsenden Werte in den Wintermonaten zurückzuführen ist.

Als klimatologische Ursache hierfür sind die mit zunehmender Kontinentalität anwachsenden Anteile von Schnee- und Mischniederschlag zu nennen. Weiterhin ist dieser Abbildung zu entnehmen, daß bei den mäßig geschützten Stationslagen die Meßfehler in den Wintermonaten erheblich stärker zurückgehen als dies in den Sommermonaten der Fall ist. Zu gleichen Aussagen führt auch ein Vergleich zwischen den Stationen der westlichen und östlichen Mittelgebirge, weshalb diese Ergebnisse hier nicht gesondert auf einer Abbildung dargestellt wurden.

Die insgesamt ausgeprägtesten Unterschiede im Jahrgang bestehen zwischen dem Nordwestdeutschen Tiefland und dem Gebiet des Alpenvorlandes einschließlich der tieferen Lagen der Alpen (Abb.24). So wird im Alpenraum durch mehr Schnee- und Mischniederschläge im Winter und höhere Niederschlagsintensitäten im Sommer bei freier Stationslage

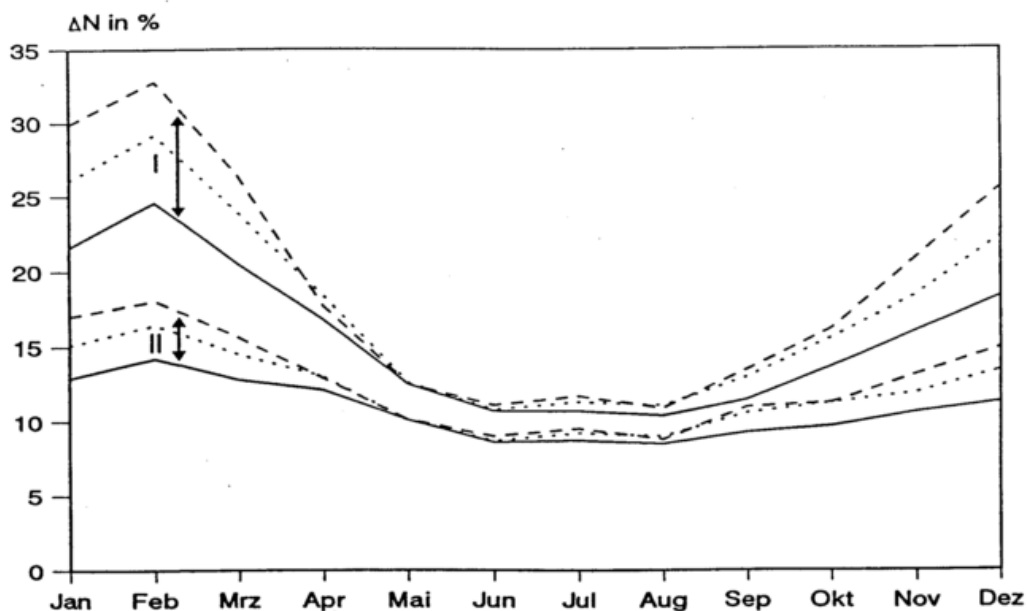


Abb.23: Mittlerer Jahresgang des Niederschlagsmeßfehlers ΔN im Norddeutschen Tiefland bei freier (I) und mäßig geschützter Stationslage (II) :
 — westlicher Bereich, mittlerer Bereich, - - - östlicher Bereich

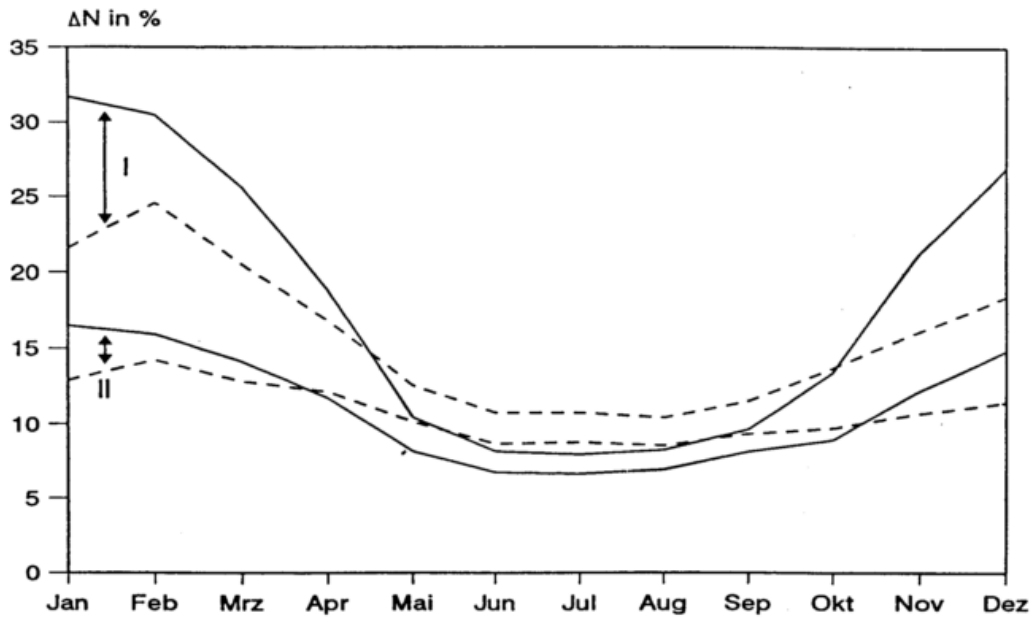


Abb.24: Mittlerer Jahresgang des Niederschlagsmeßfehlers ΔN bei freier (I) und mäßig geschützter Stationslage (II); — Alpenvorland, - - - Nordwestdeutsches Tiefland

eine weitaus größere Amplitude im Jahresgang der Meßfehler verursacht und auch der Rückgang der Fehler bei mäßig geschützter Stationslage ist noch ausgeprägter als im Norden. Mit 6 bis 8% in den Sommermonaten ist dabei der Alpenraum einerseits das Gebiet mit den relativ geringsten sommerlichen Meßfehlern, während andererseits die hohen Werte in den Wintermonaten nur noch im Gebiet der östlichen Mittelgebirge übertroffen werden.

Ein Beispiel für größere Unterschiede bei kleineren räumlichen Entfernungen liefert der Südwesten Deutschlands. Hiervon sind das Einzugsgebiet des Neckars, der Bereich des unteren Mains, der Rheingraben und der Pfälzer Wald zu einem Gebiet mit relativ einheitlichen Niederschlagsmeßfehlern zusammenzufassen. Größere Abweichungen hiervon haben das westliche Saarland mit besonders geringen Fehlern in den Wintermonaten und der Schwarzwald, dessen Gebiet bis zu einer Höhe um ca. 700m ganzjährig geringere Fehlerprozent im Vergleich zum Umland aufweist (Abb.25). In den höheren Lagen trifft dies allerdings nur noch für das Sommerhalbjahr zu, während die Fehler in den Wintermonaten etwa mit denen des gesamten südwestdeutschen Raumes vergleichbar sind und im Frühjahr teilweise auch deutlich darüber liegen.

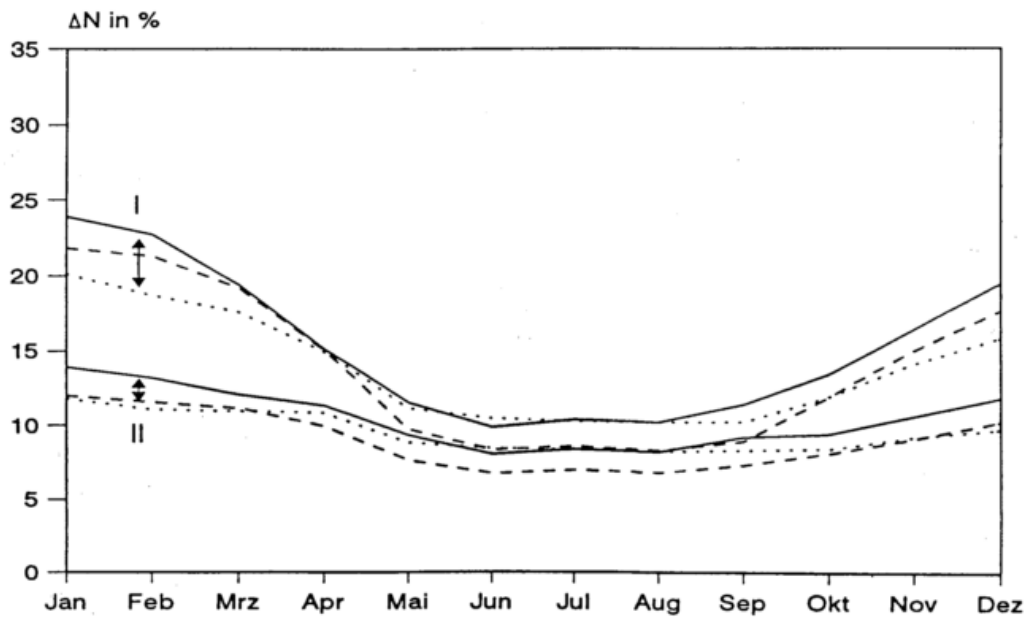


Abb.25: Mittlerer Jahresgang des Niederschlagsmeßfehlers ΔN bei freier (I) und mäßig geschützter Stationslage (II) : — Südwestdeutschland, - - Schwarzwald (<700m), - - - westl. Saarland

6.2.2 Mittlere Jahreswerte der Niederschlagsmeßfehler

Als weiteres Bewertungskriterium für eine Regionalisierung der Niederschlagskorrektur dienen die langjährigen Jahresmittel der Niederschlagsmeßfehler. Wegen des großen Einflusses der Windexposition sind entsprechende Betrachtungen nur unter Vorgabe einheitlicher Lagebedingungen für alle Stationen sinnvoll, da auch nur so die Auswirkungen der korrekturbestimmenden Niederschlagsparameter im richtigen Verhältnis wiedergegeben werden. Die bei dieser Verfahrensweise festzustellenden regionalen Unterschiede sind dann ausschließlich auf die niederschlagsklimatologisch bedingte Variabilität des Meßfehlers zurückzuführen.

Die Grundlage für die kartenmäßige Darstellung des mittleren jährlichen Niederschlagsmeßfehlers auf Abb.26 bildeten die Berechnungsergebnisse für die vorgegebenen Bedingungen einer mäßig geschützten Stationslage, da diese, wie bereits erwähnt, wahrscheinlich den am häufigsten anzutreffenden Gegebenheiten einer nebenamtlichen Niederschlagsstation entspricht. Der regionale Vergleich zeigt, daß bei einem insgesamt zwischen 8 und 13% schwankenden Meßfehler große Teile Deutschlands einen weitgehend einheitlichen mittleren

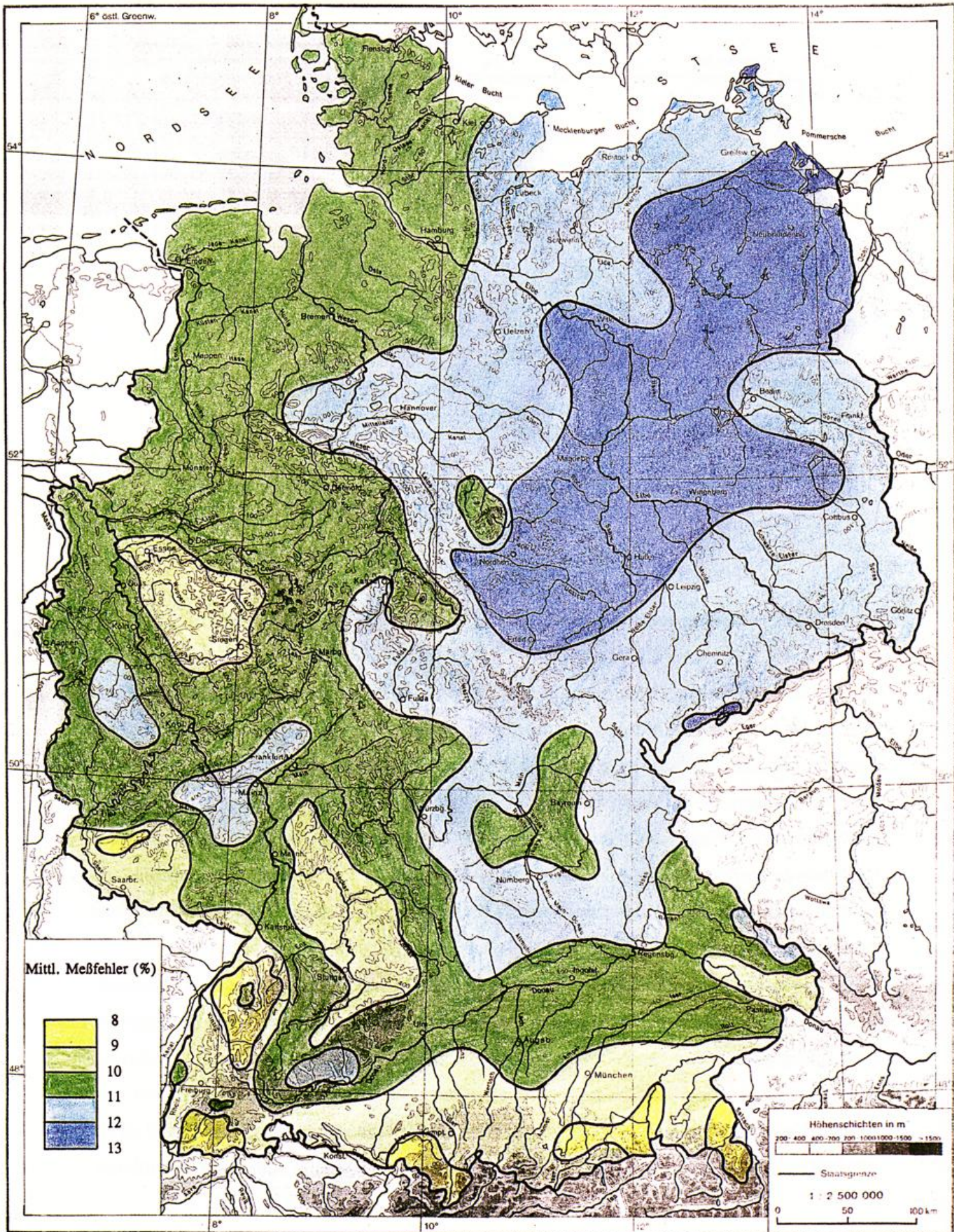


Abb.26: Mittlerer prozentualer Niederschlagsmeßfehler bei mäßig geschützter Stationslage (1961/90)

Jahresbetrag aufweisen. Generell ist eine Zunahme der Fehler von Westen nach Osten festzustellen. Sie bewegen sich im Norddeutschen Tiefland im wesentlichen zwischen 10 und 13%, weiter südöstlich zwischen 9 und 12% und liegen im Bereich des Schwarzwaldes und der Alpen auch teilweise unter 9%. Das auffälligste Merkmal hierbei ist, daß die regionalen Unterschiede keinen Einfluß der Orographie auf die Größe des niederschlagsklimatologisch bedingten Meßfehlers erkennen lassen. Das gilt nahezu für alle Bereiche der Mittelgebirge und der tieferen Lagen der Alpen und war in dieser Form aus früheren Verfahren zur pauschalen Niederschlagskorrektur nicht abzuleiten, bei denen sowohl Zunahmen (RICHTER,1985) als auch Abnahmen (FREYDANK u.a.,1983) mit der Höhe berechnet wurden.

Zu gleichen Verteilungsbildern, wie auf Abb.25, führen auch die Ergebnisse der Fehlerberechnung für die anderen, hier nicht kartenmäßig dargestellten Stationslagen. Als Ursache dieses Effektes sind wahrscheinlich zwei Faktoren von ausschlaggebender Bedeutung. Zum einen ist es die Abnahme des Meßfehlers mit zunehmendem Anteil größerer Tagessummen und dementsprechend höheren durchschnittlichen Niederschlagsintensitäten und zum anderen ist es die Zunahme des Fehlers mit zunehmenden Anteilen von Schnee- und Mischniederschlag. Beide Einflüsse wirken entgegengesetzt und gleichen offensichtlich den Einfluß der Orographie weitgehend aus, womit im Ergebnis keine klare Abhängigkeit des Meßfehlers von der Höhenlage der Station besteht. Erst bei einem deutlichen Überwiegen des Schneeanteils in den Gipfellagen der Mittelgebirge und den hohen Lagen der Alpen ergibt sich ein größerer Anstieg des prozentualen Meßfehlers gegenüber tieferen Lagen. Andererseits kann ein überwiegender Einfluß höherer Niederschlagsintensitäten ebenso einen Rückgang mit der Höhe bewirken, wie er im Schwarzwald und z.T. im Alpenraum auftritt und in einem geringeren Maße auch im Luvgebiet des Sauerlandes und des Harzes zu verzeichnen ist.

Wie gering die orographischen Einflüsse sind, zeigt die Abb.27, auf der die mittleren Jahresgänge des Niederschlagsfehlers im Bereich der westlichen Mittelgebirge (Gebiet IV der Abb.28) bei freier und mäßig geschützter Lage für die Stationen in den Höhenlagen zwischen 200 und 400m sowie zwischen 400 und 700m zusammengefaßt sind. Dabei kommt bei den höher gelegenen Stationen in freier Lage der starke Windeinfluß auf den Schnee- und Mischniederschlag noch mit einem geringfügig größeren Fehler in den Wintermonaten zum tragen, während bei der mäßig geschützten Lage ganzjährig der reduzierende Einfluß der höheren Niederschlagsintensitäten überwiegt. Die Unterschiede sind nicht signifikant und

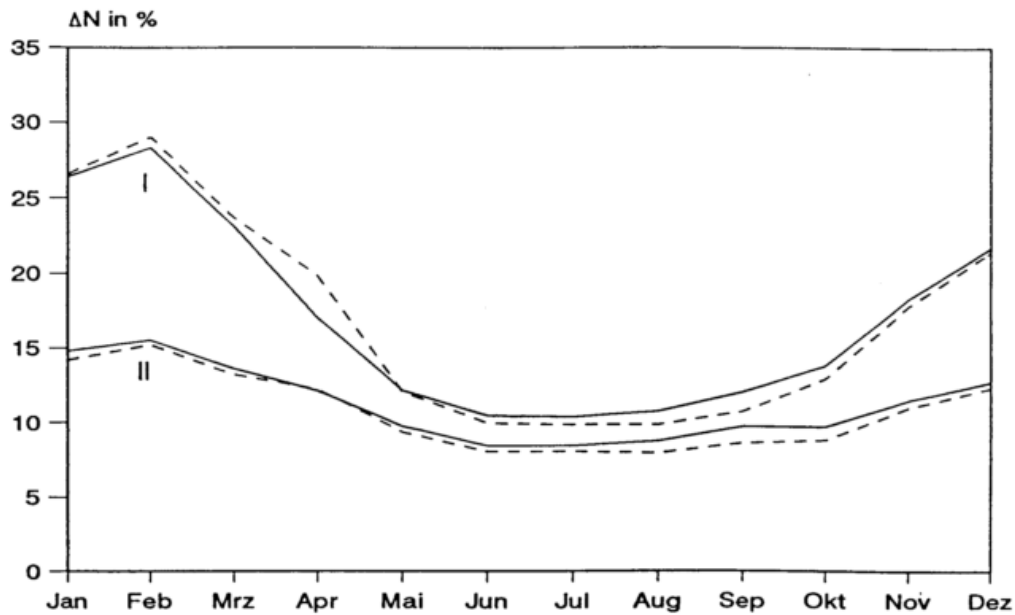


Abb.27: Mittlerer Jahresgang des Niederschlagsmeßfehlers ΔN im Bereich der westlichen Mittelgebirge bei freier (I) und mäßig geschützter Stationslage (II):
 — Höhenlage 200 bis 400 m, - - - Höhenlage 400 bis 700 m

überhaupt nur durch die Mittelung über alle Stationen in dieser Form erkennbar.

6.2.3. Regionalisierung des Meßfehlers nach niederschlagsklimatologischen Kriterien

Insgesamt können durch diesen kompensierenden Effekt die niederschlagsklimatologisch bedingten Unterschiede besser zur Geltung kommen, womit auch gute Voraussetzungen für eine von der Orographie weitgehend unabhängige Untergliederung Deutschlands in Gebiete mit einheitlichen Niederschlagsfehlern gegeben sind. Das Ergebnis der in dieser Richtung durchgeführten Untersuchungen ist auf Abb.28 dargestellt.

Aus mehreren möglichen Varianten der gebietsweisen Zusammenfassung und einer Vielzahl von vergleichenden Tests hinsichtlich der Zuordnung einzelner Stationen ergaben sich schließlich die mit I bis XI gekennzeichneten 8 größeren und 3 kleineren Gebiete mit einem im Jahresmittel und im Jahresgang weitgehend einheitlichen Fehlerverhalten.

Eine zwölfte (XII), nicht regional zuzuordnende Kategorie bilden die Gipfelregionen der Mittelgebirge (ca. > 700m), die auch im Vergleich zu den höheren Lagen der Alpen (Gebiet IX) einen systematisch höheren Meßfehler aufweisen (Abb.29). Hier wirken sich die ver-



Abb.28: Gebiete mit einheitlichen prozentualen Niederschlagsmeßfehlern

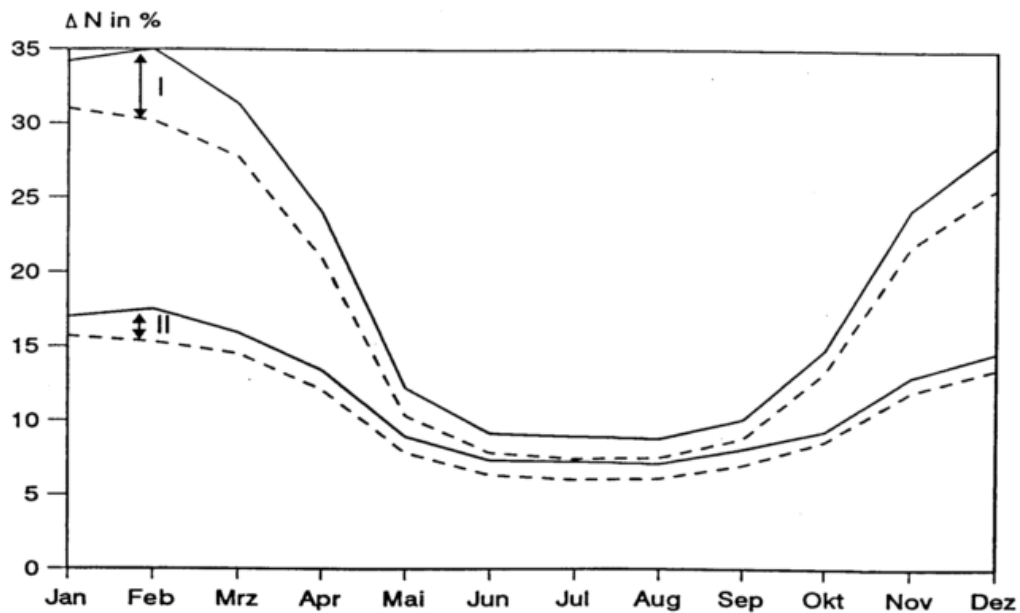


Abb.29: Mittlerer Jahresgang des Niederschlagsmeßfehlers ΔN bei freier(I) und mäßig geschützter Stationslage (II) : — Mittelgebirge(>700m), - - - Alpen (700 bis 1000m)

gleichsweise geringeren Niederschlagsintensitäten bei etwa gleich großen Anteilen des Schnee- und Mischniederschlags mit entsprechend größeren Meßfehlern aus.

Die Abgrenzung der definierten Gebiete untereinander ist zum einen, wie in Beispielen schon unter 6.2.1 gezeigt, gut ausgeprägt, zum anderen aber nur im Sinne eines Übergangsbereiches zwischen zwei Gebieten mit noch relativ großen Ähnlichkeiten zu verstehen. So weisen die Gebiete I und VI, die Gebiete II, IV und VII und die Gebiete III und V untereinander jeweils nur relativ geringe Unterschiede auf und auch die Höhenlagen bis ca. 1000m des Gebietes IX stimmen weitgehend mit Gebiet VIII überein. Einen Eindruck vom Grad dieser Übereinstimmung vermittelt der als Beispiel auf Abb.30 dargestellte Vergleich der Gebiete III und V, also der Bereich des gesamten Nordostens einschließlich der östlichen Mittelgebirge. Dieses Beispiel belegt, daß eine Zusammenfassung der vergleichbaren Gebiete durchaus gerechtfertigt ist und somit für den größten Teil Deutschlands bereits mit einer Unterteilung in vier große Bereiche eine näherungsweise Aussage zum langjährigen mittleren Korrekturverhalten gegeben werden kann. Die entsprechenden Ergebnisse sind in Tab.18 zusammengestellt. Sie zeigen die klimatologisch bedingten Meßfehler des Hellmann-Niederschlagsmessers unter den definierten Bedingungen einer freien bis stark windgeschützten

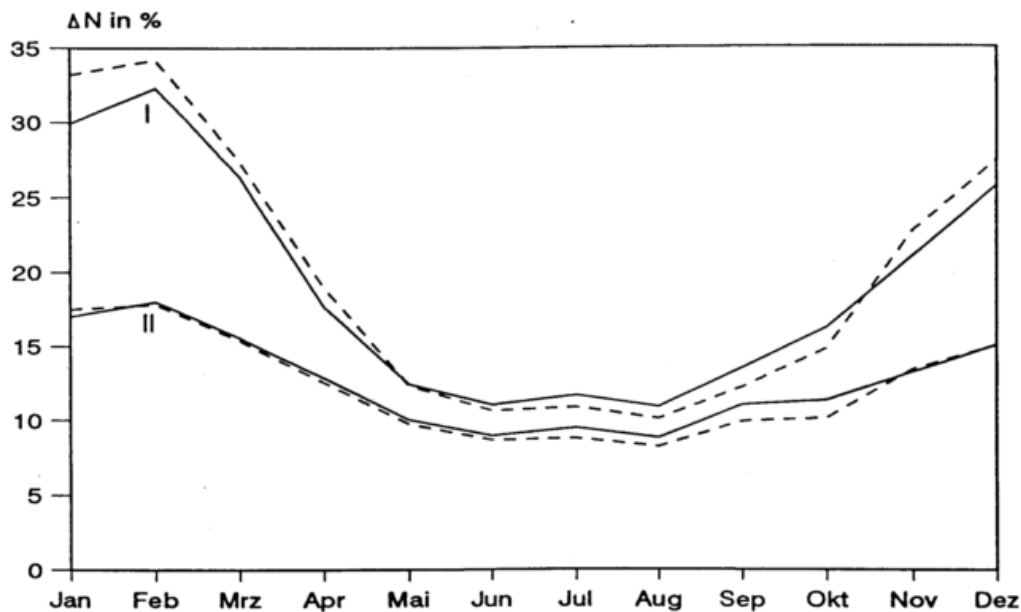


Abb.30: Mittlerer Jahresgang des Niederschlagsmeßfehlers ΔN bei freier(I) und mäßig geschützter Stationslage (II) : — Gebiet III, --- Gebiet V (siehe Abb.28)

Stationslage als langjähriges Gebietsmittel der Zeitreihe 1961/90 und geben zusammen mit der Karte auf Abb.28 einen generellen Überblick über die wahrscheinliche Größe des systematischen Meßfehlers dieses Meßgerätes in Standardaufstellung.

Zur Nutzung der Ergebnisse für konkrete Stationen ist eine den Lagebedingungen entsprechende richtige Zuordnung ihrer Windexposition erforderlich. Die Genauigkeit der mittleren monatlichen Meßfehler beträgt dann entsprechend der statistischen Streuung der Fehler der einzelnen Stationen um das jeweilige Gebietsmittel zwischen ± 3 bis $\pm 4\%$ in den Wintermonaten und um $\pm 1\%$ in den Sommermonaten. Diese Aussagen gelten allerdings nur für langjährige Mittelwerte. Sie können nicht generell für Einzelmonate einer längeren Zeitreihe zur Anwendung kommen, da sowohl die Anteile von Schnee- und Mischniederschlag, als auch die durchschnittlichen Niederschlagsintensitäten von Jahr zu Jahr recht unterschiedlich ausfallen können und dadurch in einem Einzelmonat erhebliche Abweichungen vom langjährigen Mittel möglich sind. Im entsprechenden Bedarfsfalle ist somit die genaue Berechnung des Fehlers anhand der konkreten Angaben der Stationslage, der Niederschlagshöhe und Niederschlagsart ratsam.

Tab. 18: Mittlerer Jahresgang des prozentualen Niederschlagsmeßfehlers 1961/90, gebietsweise zusammengefaßt

a - freie, b - leicht geschützte, c - mäßig geschützte,

d - stark geschützte Stationslage

	Jan	Feb	März	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr	
Gebiet I und VI (bis 700m ü.NN)	a	22.8	23.6	20.0	16.0	12.0	10.3	10.5	11.5	13.6	16.2	18.9	14.9	
	b	17.3	17.9	15.5	13.6	10.8	9.2	9.4	10.2	11.2	12.9	14.6	12.3	
	c	13.4	13.7	12.6	11.6	9.8	8.4	8.5	8.4	9.1	9.7	10.6	11.6	10.4
	d	9.5	9.6	9.4	9.4	8.5	7.3	7.5	7.3	7.8	7.8	8.0	8.4	8.2
Gebiet II, IV und VII (bis 700m ü.NN)	a	27.5	29.0	23.6	18.2	12.3	10.3	10.5	12.1	14.2	19.1	22.7	16.6	
	b	20.5	21.5	17.8	15.0	10.9	9.3	9.4	10.9	11.6	15.0	17.3	13.5	
	c	15.2	15.8	14.0	12.4	9.8	8.3	8.6	8.6	9.6	10.2	12.0	13.2	11.1
	d	10.3	10.7	10.0	9.6	8.5	7.3	7.5	7.5	8.2	8.2	8.7	9.2	8.6
Gebiet III und V (bis 700m ü.NN)	a	31.6	33.5	26.9	18.3	12.5	10.4	10.8	12.6	15.5	21.8	26.5	18.2	
	b	23.3	24.5	20.3	15.1	11.1	9.8	10.0	11.5	12.7	16.8	19.8	14.6	
	c	17.3	17.9	15.5	12.7	10.1	8.8	9.1	8.5	10.2	13.3	15.0	12.0	
	d	11.5	11.8	10.7	10.0	8.6	7.7	8.0	7.5	8.7	8.8	9.5	10.3	9.3
Gebiet VIII und IX (bis 1000m ü.NN)	a	31.7	30.5	25.6	18.8	10.4	8.1	7.9	9.6	13.4	21.3	26.9	15.4	
	b	23.0	22.2	19.4	15.0	9.0	7.2	7.1	8.6	10.6	16.0	19.7	12.2	
	c	16.2	15.7	14.3	11.9	8.0	6.5	6.3	7.7	8.8	12.1	14.4	9.7	
	d	10.6	10.2	9.6	8.7	6.7	5.7	5.6	5.8	6.5	6.8	8.3	9.5	7.3

7 Schlußbemerkungen

Im vorliegenden Bericht wird ein Verfahren zur Korrektur des systematischen Meßfehlers des Hellmann-Niederschlagsmessers vorgestellt, das, ausgehend von der Entwicklung einer einfachen EDV-mäßig anwendbaren Methodik, eine flächendeckende Anwendung auf routinemäßig verfügbare Niederschlagsmeßstellen ermöglicht. Als primäre Grundlagen sind die speziellen Untersuchungen zum Benetzungsverlust und die langjährigen Vergleichsmessungen zum Windfehler mit einem Netz von Niederschlagsmessungen im Bodenniveau zu nennen. Durch die Anpassung der Meßfehler als Funktion der Tageswerte der Niederschlagshöhe für unterschiedliche Niederschlagsarten und Stationslagen können die wesentlichsten Einflüsse der einzelnen Niederschlagsparameter ebenso wie die unterschiedlichen Auswirkungen der Windbeeinflussung berücksichtigt werden.

Bei der Korrektur von Tageswerten ist zu beachten, daß auf Grund der großen interdiurnen Variabilität der einzelnen fehlerverursachenden Parameter auch der statistische Fehler des auf mittlere Beziehungen beruhenden Berechnungsergebnisses zwangsläufig sehr groß ist und überwiegend in der Größenordnung des Korrekturbetrages selbst liegt. Diese Unsicherheit nimmt mit der Verdichtung der Tageswerte zu Monats- und Jahreswerten rasch ab, wobei sich für langjährige Reihen Übereinstimmung mit der Anbringung mittlerer Korrekturen ergibt. Der Vorteil gegenüber pauschalen Mittelwertkorrekturen liegt vor allen Dingen in einer richtigen Berücksichtigung der Niederschlagsarten und der Häufigkeitsverteilung der täglichen Niederschlagshöhen für jeden beliebigen Zeitraum.

Die Anwendung auf das Gebiet der Bundesrepublik Deutschland zeigt, daß sowohl die korrekturbestimmenden Niederschlagsparameter als auch die hieraus resultierenden systematischen Meßfehler in weiten Teilen nur relativ geringe Unterschiede aufweisen. Dabei ist die regionale Variabilität des Fehlers in der Regel kleiner als die windbedingten Unterschiede auf Grund örtlich unterschiedlicher Lagebedingungen. Das unterstreicht die Bedeutung einer richtigen Einschätzung der Windexposition einer Station.

Die kartenmäßige Darstellung der Ergebnisse soll im wesentlichen die grundsätzlichen Verteilungsbilder der einzelnen Größen wiedergeben, wobei die gewählte Linienführung bei detaillierter Berücksichtigung der örtlichen Gegebenheiten besonders in orographisch stärker gegliederten Gebieten sicherlich auch etwas anders verlaufen kann. Durch die Unterteilung in Gebiete mit vergleichbaren systematischen Fehlern bei vorgegebener Stationslage ist die

Grundlage für eine erste angenäherte Einschätzung der langfristigen mittleren systematischen Fehler gegeben. Sie kann allerdings nicht die im konkreten Fall besonders bei Wasserhaushaltbilanzierungen notwendige detaillierte Berechnung entsprechend der tatsächlichen Stationslage- und Niederschlagsbedingungen ersetzen. Grundlage einer sachgerechten Anwendung des Korrekturverfahrens bleibt in jedem Falle ein möglichst lückenloses und den Erfordernissen des Verfahrens entsprechend aufbereitetes Datenmaterial.

Danksagung

Die Durchführung der Untersuchungen erforderte im großen Umfang die Bereitstellung von Daten und die Erarbeitung und Anwendung spezieller statistischer Auswerteprogramme. Für die entsprechenden Zuarbeiten bedanke ich mich ganz herzlich bei den Mitarbeitern B.Haberecht und Ing. W.Neubert . Gleichfalls gilt mein Dank allen Beobachtern der Wetterstationen mit Niederschlagsvergleichsmessungen, die durch ihre langjährige gewissenhafte Datensammlung wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Literaturverzeichnis

- Bauer, M.; Neis, J.; Karbaum, H.: Richtlinie zur Korrektur langjähriger Monats- und Jahressummen des Niederschlags
unveröffentlichte Arbeitsrichtlinie, AM Schwerin, 1978
- De Bruin, H.A.R.: Results of the International Comparison of Rain Gauges with a Pit Gauge,
Part A, Basic Stations. In: B. Sevruc (ed) Proc. ETH/WMO/IASH Internat.
Workshop on the Correction of Precipitation Measurements, 1.-3. Apr. 1985, Zürcher
ETH Zürcher Geograph. Schriften, ETHZ, No 23, 1986
- DVWK: Starkniederschläge in der Bundesrepublik Deutschland
DVWK-Schriften 97, 1991
- DVWK: Niederschlag - Empfehlung für Betreiber von Niederschlagsstationen, BETREN
DVWK-Merkblätter 230/1994
- DWD: Karte der mittleren Jahresmittel der Windgeschwindigkeit in der Bundesrepublik
Deutschland in freien Lagen in 10m über Grund
Deutscher Wetterdienst, K6, Offenbach, Apr. 1991
- Folland, Ch.: A Simple Numerical Model of the loss of Rainfall Catch from a Standard 5"
Gauge Due to Wind. In: B. Sevruc (ed), Proc. ETH/WMO/IASH Internat. Workshop
on the Correction of Precipitation Measurements, 1.-3. Apr. 1985, Zürcher ETH
Zürcher Geograph. Schriften, ETHZ, No 23, 1986
- Freydank, E.; Glander, H.; Glos, E.; Glugla, G.: Karten der Wasserhaushaltsgrößen für das
Gebiet der DDR: Ein Beitrag zum Internationalen Hydrologischen Programm der
sozialistischen Länder Europas
Z. Meteorol. 33, 4. 1983, S. 244-257
- Golubev, V.S.: Systematic and Random Errors in Determining Atmospheric Precipitation at
an Observation Point and over a Region
WMO Regional Association VI (EUROPE), Working Group on Hydrology, Forth
Session, Madrid, 5.-7. May 1980
- Goodinson, B.E.; Klemm, S.; Sevruc, B.: WMO Solid Precipitation Measurement Intercom-
parison; Objectives, Methodology, Analysis. In: W. Delleur (ed) Atmospheric
Deposition
Internat. Assoc. Hydrol. Scie. Publ. No 179, 1989

- Graf, B.: Vergleich verschiedener Verfahren zur Korrektur von Meßwerten der Niederschlagshöhe
Z. Meteorol. 35, H. 6, 1984
- Karbaum, H.: Der Niederschlag als Wasserhaushaltsgröße
Abh. Meteorol. Dienst d. DDR, Nr. 86, Bd. XI, 1969
- Karbaum, H.: Zum Fehler der Niederschlagsmessung (I), Zahl der Niederschlagsereignisse und Niederschlagsandauer an Tagen mit nicht meßbarer Niederschlagshöhe
Z. Meteorol. 21, H. 11-12, 1970 a
- Karbaum, H.: Zum Fehler der Niederschlagsmessung (II), Der Verlust durch einmalige Benetzung in Abhängigkeit von der Niederschlagshöhe für den Niederschlagsmesser nach Hellmann
Z. Meteorol. 21, H. 11-12, 1970 b
- Karbaum, H.: Zum Fehler der Niederschlagsmessung (III), Zur Ermittlung der aktuellen Verdunstung aus der Sammelkanne des Niederschlagsmessers nach Hellmann mit 200cm² Auffangfläche
Z. Meteorol. 29, H. 3, 1979
- Kirchhofer, W.; Sevruck, B.: Mittlere korrigierte Niederschlagshöhen 1951-1980,
In: Hydrologischer Atlas der Schweiz, Bern 1992
- Lemmelä, R.; Solantie, R.: Method to Correct Amount of Precipitation Observed by the Finnish Standard Raingauge
Tagungsbericht 1977
- Madsen, H.: Methods for Correction of Precipitation Measured by a 200cm² Hellmann-Raingauge
Meteorologisk. Institut, Kobenhavn, 1977, Tagungsbericht 1977
- Rachner, M.: Ableitung von Korrekturfaktoren für Meßwerte des Schnees. In: Beiträge zur Schneehydrologie
Abh. Meteorol. Dienst d. DDR, Nr 145, 1990
- Richter, D.: Erste Ergebnisse von Vergleichsmessungen zwischen international gebräuchlichen Verdunstungskesseltypen
Z. Meteorol. 25, H. 4, 1975

- Richter, D.: Methodik zur Korrektur von Niederschlagshöhen.
 In: Arbeitsmappe Gutachtenerteilung des MD d. DDR, Teil III -23
 Hauptamt f. Klimatologie, Potsdam 1985
- Richter, D.: Statistische Untersuchungen zum mittleren und extremen Verhalten von Niederschlagsereignissen
 Z. Meteorol. 39, H. 6, 1989
- Sevruk, B.: Methodische Untersuchungen des systematischen Meßfehlers der Hellmann-Regenmesser im Sommerhalbjahr in der Schweiz
 Mitt. d. Versuchsanstalt f. Wasserb., Hydrol. u. Glaziol. No 52, Zürich 1981
- Sevruk, B.: Methods of Correction for Systematic Error in Point Precipitation Measurement for Operational Use
 World Meteorol. Org., WMO No 589, Genf 1982
- Sevruk, B.; Hamon, W.R.: International Comparison of National Precipitation Gauges with a Referenz Pit Gauge
 World Meteorol. Org. WMO Instruments and Observing Methods Rep. No 17, 1984
- Sevruk, B.: Correction of Precipitation Measurements: Swiss Experience. In: B. Sevruk (ed) Proc. ETH/WMO/IASH, Internat. Workshop on the Correction of Precipitation Measurements, 1.-3. Apr. 1985, Zürich ETH
 Zürcher Geograph. Schriften; ETHZ, No 23, 1986
- WMO/CIMO: International Organizing Committee for WMO Solid Precipitation Measurement Intercomparison
 Final Report of First Session, WMO Geneva 1985
- Yang, D.; Metcalfe, B.E.; Goodinsoon, B.E.; Mekis, E.: Evaluation of DFIR Accuracy at Valdai WMO Intercomparison Site. In: Internat. Organizing Committee for the WMO Solid Precipitation Measurement Intercomparison
 Final Report of the Sixth Session, Appendix Q, WMO Toronto 1992