

NIEDERSCHLAGSAUSWERTUNG UND REGIONALISIERUNG IN ÖSTERREICH - MÖGLICHKEITEN FÜR DIE URBANHYDROLOGIE

F. Nobilis und G. Skoda

ZUSAMMENFASSUNG /SUMMARY

Ein österreichweit einheitliches Konzept der Starkniederschlagsauswertung und -regionalisierung wird vorgestellt. Es stützt sich auf bewährte Vorarbeiten, neue Studien aus Nachbarländern und wird durch Vorschläge ergänzt, die vor allem im alpinen Gelände und auch in der Urbanhydrologie Berücksichtigung finden können.

The authors present the Austrian concept of evaluation and regionalization of remarkable precipitation. It is based on tested former studies, new publications from neighbouring countries, and will be supplemented by proposals which might prove successful especially in Alpine regions as well as in urban hydrology.

1. EINLEITUNG

Die Strategie der österr. koordinierten Starkniederschlagsregionalisierung und -auswertung (siehe ÖKOSTRA-93, Heft 1, 1990) beruht auf einer Nutzung bewährter Basiselemente, die sich im Laufe der letzten Jahrzehnte in Mitteleuropa - grenzüberschreitend - harmonisch entwickelt haben.

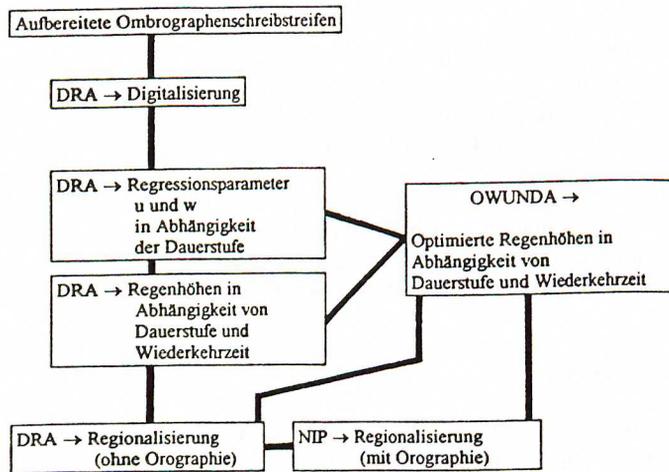
Diese Elemente zählen zu den anerkannten Standardverfahren; sie werden in einer Reihe von Untersuchungen (z.B. AUER et al., 1984; DEUTSCHER WETTERDIENST, 1990; DVWK, 1985; GEIGER et al., 1986; ÖKOSTRA-93, Heft 1, 1990; SCHIMPF, 1970; STEINHÄUSSER, 1965 und VERWORN 1993) behandelt.

Um möglichst rasch zu homogenem Datenmaterial zu gelangen, wurden im Jahre 1991 200 Monate (aus Mai bis September), aus 1992 300 Monate (aus Mai bis September) sowie aus 1993 400 Monate (aus Mai bis September) rückwirkend aufbereitet und digitalisiert. Dabei beschränkte man sich auf die klimatisch äußerst vielseitige "Region Salzkammergut", die überdies eine hohe Stationsdichte aufweist (HOLAWE, F. und SKODA, G., 1991). Dieser Raum wurde nicht zuletzt wegen seiner stark gegliederten Topographie, die erfahrungsgemäß bei der Regionalisie-

zung die größten Probleme bereitet, als Modellgebiet für ÖKOSTRA-93 ausgewählt.

Entsprechend den Anregungen der Abwasserfachleute in der Schweiz (Verband Schweiz. Abwasserfachleute, 1990) für Fragestellungen des Abflusses in urban Gebieten, werden nun für Österreich einige Beispiele der Starkregeninterpolation für städtische Gebiete gezeigt. Schwerpunkt ist dabei die Demonstration der Eigenschaften des Niederschlagsinterpolationsprogramms NIP (HAIDEN, 1994).

Dem Benutzer der Programmdisketten bieten sich die hier vorgestellten Möglichkeiten:



2. ÖKOSTRA

Vorarbeiten zur modernen Starkniederschlagsauswertung in Mitteleuropa schuf in Deutschland REINHOLD (1940), die den Österreichern HELD (1951), STEINHÄUSSER (1965), KREPS und SCHIMPF (1965) und SCHIMPF (1969, 1970) als Vorbild dienten. Alle Autoren betonten die Bedeutung der Eintrittswahrscheinlichkeit bei der Auswertung starker Niederschläge.

Das in den letzten 25 Jahren angefallene Material, geänderte Methoden in der Auswertung und in der Datenverarbeitung sowie neue statistische Ansätze, machten Neubearbeitungen notwendig. In unseren Nachbarländern, wie z.B. in der Schweiz (BOSSHARD, 1976-83; GEIGER et al., 1986; JENSEN, 1989) und in Deutschland (DEUTSCHER WETTERDIENST, 1990) wurden ähnliche Initiativen gesetzt. Damit ist auch eine fruchtbare Zusammenarbeit mit Fachkollegen aus dem Ausland möglich geworden.

Entscheidenden Anteil bei allen neueren Untersuchungen hat die DVWK-Regel 124 (DVWK, 1985), der man auch in Österreich folgt (AUER et al., 1984). Unter anderem wird darin in einem ersten Schritt eine Funktion zwischen den Regenhöhen einer bestimmten Andauer und der veränderlichen Wiederkehrzeit T_n (bzw. der jährlichen Überschreitungshäufigkeit $n = 1/T_n$) aufgestellt und im zweiten Schritt die Beziehung auf Niederschläge verschiedener Dauer (z.B. von 5 Minuten bis zu 72 Stunden) ausgedehnt.

Das Referat Hydrometeorologie im Deutschen Wetterdienst hat eine gelungene Neubearbeitung zum Thema, den Abschlußbericht zu KOSTRA-87 (=Koordinierte Starkniederschlagsregionalisierung und Auswertung 1987) (DEUTSCHER WETTERDIENST, 1990), für die alten Bundesländer vorgelegt. Ein als ÖKOSTRA-93 bezeichnetes Projekt mit österreichweit einheitlicher Vorgangsweise einer Starkniederschlagsauswertung und -regionalisierung wurde 1990 vom Hydrographischen Zentralbüro initiiert. 1991 entstanden durch ein Autorenteam die Konzepte und die Auswertungsarbeiten begannen (HOLAWE, F. und G. SKODA, 1991).

Zwischenzeitlich haben sich die beiden größten Betreiber von Niederschlagsmeßstationen in Österreich, die Hydrographischen Dienste und die Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, auf einheitliche "Richtlinien zur Vorprüfung von Niederschlagsregistrierungen" festgelegt (Hydrographisches Zentralbüro, 1992) und die Niederschlagsstreifen folgender Orte bearbeitet:

Bad Goisern	1977-1990	Klaus	1986-1990
Bad Ischl	1982-1992	Liezen	1981-1990
Feuerkogel	1979-1992	Mondsee	1986-1990
Frankenburg	1981-1990	Neumarkt a.H.	1974-1988
Fuschl	1982-1991	Rohrmoos	1987-1992
Geboltskirchen	1981-1990	Straßwalchen	1982-1991
Grieskirchen	1981-1990	Thalgauberg	1982-1991
Gmunden	1986-1990	Vöcklabruck	1986-1990
Irdning-Gumpenstein	1987-1992	Weißbach/Attersee	1981-1990
Hintersee	1982-1989	Wels	1978-1990
Ibm	1986-1990		

Dabei mußte festgestellt werden, daß an fast allen Stationen nahezu jede der in den Prüfungsanleitungen unter § 6 angeführten Fehlermöglichkeiten tatsächlich aufgetreten ist. Die Durchführung von Korrekturen war an rund 8% aller auswertbaren Streifen notwendig. Bezogen auf Starkregenereignisse erreichte der Anteil zu korrigierender Fälle im Durchschnitt aller Stationen fast 25%. Dazu kommen nochmals rund 5% aller Tage mit exzessiven Niederschlagsereignissen, deren Streifen nicht mehr zu korrigieren waren und somit ausgeschieden wurden.

Anschließend wurde das brauchbare Material mittels der Digitalisier- und Auswertmodule **DRA** weiter verarbeitet. Zusätzlich entstanden die optimierte Auswertvariante **OWUNDA** und das Interpolationsprogramm **NIP**.

An dieser Stelle muß man auf die **Verläßlichkeit der erhobenen Daten** eingehen:

Niederschlagswerte, wie man sie in Wissenschaft und Praxis nutzt, sind "grundsätzlich unverläßlich". Verantwortlich dafür sind:

* **Meteorologische Gründe:** Vor allem Wind- und Verdunstungsfehler führen zu Verlusten, die im Flachland im Monatsmittel zwischen 5% und 15% betragen, im Gebirge bis zum Doppelten anwachsen. Bei kurzdauernden Niederschlägen ist dieser Fehler nicht einheitlich und folglich schwierig abschätzbar (SEVRUK, 1989).

* **Technische Mängel:** Durch Wartungsmängel der Niederschlagsschreiber fehlen derzeit fast 8% aller Starkniederschlagsereignisse, davon meist gerade die heftigsten Regenfälle (= 5%). Das muß zu einer systematischen Unterschätzung der jährlichen und partiellen Serien führen, was für die errechneten Regenhöhen an den einzelnen Orten mit einem Minus zwischen 15% und 50% (!?) zu Buche schlägt.

* **Menschliche "Schwächen":** "Vergessener" Streifenwechsel bzw. falsche Ablesezeitpunkte am Ombrograph sowie bei der Terminmessung behindern nicht nur die Streifenaufbereitung und verzögern die Digitalisierung - es könnten auch Niederschläge "verloren gehen", die bei sorgfältiger Durchführung von Messung und Streifenwechsel (um 7 Uhr MEZ!) erhalten blieben. Der dabei derzeit entstehende Fehler wird in seiner Nettoauswirkung auf minus 1 bis 2% geschätzt. Eine falsche Mengenablesung bei der Terminmessung führt zu einem Fehler in etwa derselben Größenordnung.

* **Nicht - adäquate statistische Verfahren:**

Die auftretenden Datenreihen sind (noch) zu kurz. Wie in ÖKOSTRA-93, Heft 1, 1990, sowie in DEUTSCHER WETTERDIENST, 1990 mehrfach hingewiesen wird, sind stabile Regenhöhen erst ab Datenserien von wenigstens 20 Jahren Länge zu erwarten. Nur fallweise können bereits zehnjährige Reihen zu sinnvollen

Ergebnissen führen. Allgemein ist anzunehmen, daß zu kurze Reihen die errechneten maximalen Regenhöhen aus langen Reihen unterschätzen. Dies läßt sich durch "Kappen" langer Beobachtungsreihen zeigen und hat seinen wissenschaftlichen Hintergrund im chaotischen Verhalten des Phänomens Niederschlag. Letztere Eigenschaft könnte bei den (dann unzulässigerweise) verwendeten Verteilungsfunktionen beim oberen Grenzwert zu vorgetäuschten Abminderungen führen. Die eingesetzte Verteilung (Extremal - I - Verteilung bei den jährlichen Serien; Exponentialverteilung bei den partiellen Serien) ist ein Spezialfall der sogenannten Generalisierten Extremwertverteilung (GEV), in der ein spezifischer Parameter k gleich null gesetzt wird. Nun gibt es aus der Beobachtung tatsächlich Hinweise, daß der Krümmungsparameter k an vielen Stationen negativ ist. Dieser Verteilungstyp besitzt keine Obergrenze (F. NOBILIS et al., 1990). Derzeit ist nicht abschätzbar, wie stark sich diese beiden Fehlerquellen auswirken: Eine scheinbare Reduktion gegenüber den "wahren" Werten in Größenordnung von mehreren Prozent ist denkbar. Der Einsatz des Programmes OWUNDA ergibt für die maximalen Regenhöhen gegenüber der besten Anpassung nach **DRA** teils nur geringe Fehlbeträge, im ungünstigsten Fall aber Abweichungen, die dem Betrag nach bis zu 25% betragen. Der Nettoeffekt scheint eine Erhöhung gegenüber allen bisher eingesetzten Auswertevarianten von einigen Prozent zu bewirken.

Daß die bis heute ermittelten Daten extremer Regenmengen (wobei die in dieser Arbeit publizierten Werte einzuschließen sind) bei weitem zu niedrig sind, zeigt nicht nur ein Vergleich mit analogen Auswertungen an vergleichbaren Stationen im Ausland, sondern auch eine Gegenüberstellung der Extremwerte der Dauerstufe $D = 24$ Stunden mit den äquivalenten Beträgen vierundzwanzigstündiger Niederschläge (abgelesen zwischen 7 und 7 Uhr MEZ des Folgetages): Es ist undenkbar, daß letztere größer oder gleich den Werten aus gleitend ermittelten Berechnungen sind!

Alle angeführten vier Ursachen haben unterschiedliche Auswirkungen in den einzelnen Dauerstufen und Wiederkehrzeiten. Daher ist es derzeit nicht möglich, eine "allgemein gültige Korrekturformel" anzugeben. Die einzige Aussage, die heute zulässig ist, muß lauten: **Die ermittelten Regenhöhen (Regenspenden) extremer Niederschlagsereignisse werden zum Teil deutlich unterschätzt. Die "wahren Niederschlagshöhen" sind mit Sicherheit größer.**

Gelingt es die aufgezeigten Fehler zu unterdrücken, sollte einem Erfolg von ÖKOSTRA-93 nichts mehr im Wege stehen.

Derzeit werden in Österreich generell die systematischen Fehlbeträge bei der Niederschlagsmessung (Wind, Verdunstung, etc.) nicht berücksichtigt. Das Hydrographische Zentralbüro hat daher auch zum Thema Korrekturmöglichkeiten bei der Niederschlagsmessung eine Initiative gestartet (SKODA, 1993).

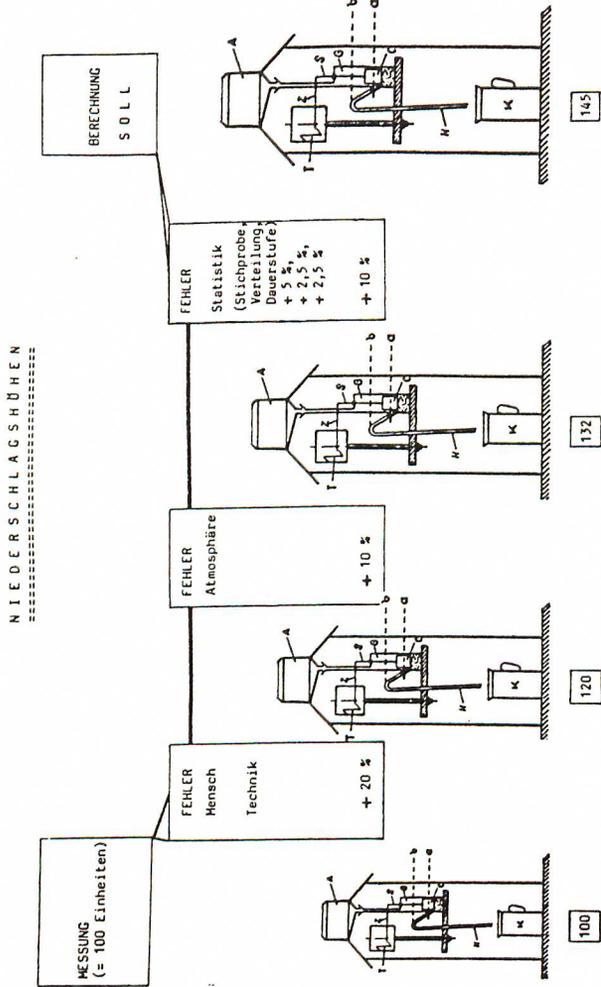


Abb.1: Ergebnisse einer Abschätzung des mittleren Fehlers einer ÖKOSTRA-Ombrographenstation für einen Sommermonat. Im Mittel aller Dauerstufen erkennt man einen (unangenehm hohen) Fehlbetrag von 45%!

2.1 Digitalisierung und Regenauswertung Das Programmpaket DRA

Eine seit vielen Jahren bestehende gute Zusammenarbeit zwischen dem Hydrographischen Zentralbüro in Wien und dem Institut für technisch-wissenschaftliche Hydrologie in Hannover hat Ende 1992 zur Installierung eines Digitalisierungs- und Niederschlagsauswerteprogrammes bei den Dienststellen des Hydrographischen Zentralbüros geführt. Das erarbeitete Auswerteprogramm ist bezüglich Vollständigkeit, Anzahl der Wahlmöglichkeit von Unterprogrammen, wissenschaftlicher Fundierung und Benutzerfreundlichkeit in Mitteleuropa derzeit kaum zu übertreffen.

Diese Version des Programmpaketes DRA ist insofern als Österreich-Variante anzusehen, weil sie auf Probleme und Änderungswünsche Rücksicht nimmt, die sich anlässlich der Kontakte herauskristallisierten.

Im DRA-Programm wird die Niederschlagshöhe als Funktion der Dauerstufe D und Wiederkehrperiode T als partielle Serien in der Form

$$hN(T,D) = u(D) + w(D)\ln T$$

ausgedrückt, wobei die Funktionen $u(D)$ und $w(D)$ entweder einfach-logarithmische

$$u(D) = a_u + b_u \ln D \quad w(D) = a_w + b_w \ln D$$

oder doppelt-logarithmische

$$\ln u(D) = a_u + b_u \ln D \quad \ln w(D) = a_w + b_w \ln D$$

Gestalt haben. Welche der beiden Möglichkeiten jeweils zutrifft, wird im Interpolationsprogramm durch die Parameter $\ln u$ und $\ln w$ bestimmt. Der Wert 0 steht für einfach-logarithmische, der Wert 1 für doppelt-logarithmische Funktion. Diese Werte sowie die Werte der Anpassungskonstanten a_u , b_u , a_w , b_w können für jede Station für jeweils drei Dauerstufen-Bereiche unterschiedlich angegeben werden.

2.2 Optimierungsverfahren zur Erstellung von Regenhöhenlinien und Regenspendenlinien (OWUNDA)

Es bestand nun die Aufgabe, die Parameter u und w der verschiedenen Dauerstufen durch Funktionen in Abhängigkeit von der Niederschlagsdauer D zusammenzufassen, sie also durch Funktionen der Art $u = f(D)$ und $w = f(D)$ darzustellen. Damit sollen eventuell vorhandene "Sprünge" zwischen den Parametern der einzelnen

Dauerstufen ausgeglichen werden. Ziel der folgenden Ausführungen war es, festzustellen, ob sich die in Deutschland (DVWK, 1985 und (VERWORN, 1993) vorgeschlagenen "Glättungsmethoden" verbessern lassen und die dadurch entstehenden Unterschiede zur DRA-Methode aufzulisten (HAMMER, 1993).

Praktische Untersuchungen haben gezeigt, daß es nicht möglich ist, mit einfachen Funktionsansätzen den gesamten Dauerstufenbereich von 5 Minuten bis zu 7 Tagen (nach anderen Untersuchungen bis zu 30 Tagen) hinreichend genau zu erfassen. Es wird dahingehend argumentiert, daß die unterschiedlichen Charakteristika von Gewitterregen bzw. Schauern, zusammenhängenden "Landregen" und mehrtägigen Regenperioden ursächlich dafür verantwortlich seien, daß es etwa im Bereich von 3 Stunden und im Bereich von 48 Stunden zwei "Knickpunkte" im Gesamtverlauf $u = f(D)$ bzw. $w = f(D)$ gibt. Aus diesem Grund wurde bisher (DVWK, 1985; VERWORN, 1993) empfohlen, zunächst getrennt die Bereiche 5 min bis 3 h, 3 h bis 48 h und größer als 48 h durch Funktionen auszugleichen und am Schluß - zur Vermeidung von Sprüngen - an den genannten Grenzen der Bereiche einen polygonzugmäßigen Übergang herbeizuführen. Nach (AUER et al., 1984) werden andere Bereiche, nämlich 5 min bis 2 h, 2 h bis 24 h und größer 24 h vorgeschlagen.

Während nach den Untersuchungen in Deutschland (DVWK, 1985 und VERWORN, 1993) grundsätzlich nur lineare Ausgleichsfunktionen anzustreben sind, wurden jetzt auch verschiedene nichtlineare zweidimensionale Beziehungen untersucht, worauf bereits in österreichischen Arbeiten (ÖKOSTRA, 1990; HAMMER, 1990; HEILIG, 1990) hingewiesen wurde.

Methode "O W U N D A"

(Optimierter - W - U - Niederschlags - Dauerstufen - Ausgleich)

Durch die Anpassung der Regressionsparameter u und w an unterschiedliche Funktionen über den gesamten Zeitbereich (5 Minuten bis 7 Tage) wird im folgenden untersucht, ob dadurch

a) eine entsprechende Glättung erreicht

sowie

b) ein Sprungausgleich bei den durch die unterschiedliche Samplebildung (5-Minuten-, Stunden- und Tageswerte) hervorgerufenen Sprüngen an den Bereichsgrenzen (2 Stunden bzw. 1 Tag) zufriedenstellend durchgeführt werden kann.

Folgende Kombinationen werden untersucht:

unabhängige Variable	abhängige Variable
D	u bzw. w
ln D	u bzw. w
ln D	ln u bzw. ln w

Bei der Analyse sowohl der partiellen als auch der jährlichen Serien gilt allgemein (DVWK, 1985; VERWORN, 1993):

$$h(T) = u + w \ln T$$

- h(T) Niederschlagshöhe (in Abhängigkeit von T)
 T Wiederkehrzeit in Jahren
 u Regressionskonstante
 w Regressionskoeffizient

Soll für u und w anhand der unterschiedlichen Funktionen a bis k ein Ausgleich über den gesamten Dauerstufenbereich (D: 5 Minuten bis 7 Tage) durchgeführt werden, so ist von folgenden grundsätzlichen Annahmen auszugehen:

A) u muß in Abhängigkeit von D streng monoton wachsen !

Der Parameter u gibt genau jene Regenhöhe an, die einmal pro Jahr erreicht oder überschritten wird, denn mit $\ln 1 = 0$ ergibt sich: $h(1) = u$. Bei zunehmender Niederschlagsdauer D muß auch die Niederschlagshöhe h zunehmen; dies gilt vor allem für geringe Wiederkehrzeiten.

B) h muß in Abhängigkeit von D monoton wachsen !

Daraus ergibt sich folgende Vorgangsweise:

1) Jede der 3 Abhängigkeiten

$$u = f(D), u = f(\ln D) \text{ und } u = \exp(f(\ln D))$$

wird durch die Funktionen a) bis k) angepaßt.

a) $y = a + b \cdot x$

b) $y = a + e^{b \cdot x}$

c) $y = a + b \cdot \ln x$

d) $y = a \cdot x^b$

e) $y = a + b \cdot x + c \cdot x^2$

f) $y = a + b \cdot x + c \cdot x^2 + d \cdot x^3$

g) $y = a + b \cdot x + c \cdot x^2 + d \cdot x^3 + e \cdot x^4$

h) $y = a + b \cdot x + c \cdot x^2 + d \cdot x^3 + e \cdot x^4 + f \cdot x^5$

i) $y = x / (b + a \cdot x)$

j) $y = a \cdot x \cdot e^{(b \cdot x)}$

k) $y = a \cdot x \cdot e^{(b \cdot x)^2}$

(e: Basis der natürlichen Logarithmen)

- 2) Für jede der 3 angeführten Abhängigkeiten wird diejenige Funktion (a bis k) als beste verwendet, welche das höchste Bestimmtheitsmaß B aufweist und gleichzeitig streng monoton wächst.
- 3) Zum endgültigen Ausgleich von u wird diejenige der 3 besten Anpassungen verwendet, bei welcher die mittlere quadratische Abweichung (mqA) am geringsten ist.

$$mqA = A / n$$

A ist dabei die Summe der $(y - y_S)^2$

y_S : Schätzwert von y aus x

n: Stichprobenumfang (Anzahl der u)

- 4) Jede der 3 Abhängigkeiten

$$w = f(D)$$

$$w = f(\ln D)$$

$$w = \exp(f(\ln D))$$

wird durch die Funktionen a) bis k) angepaßt.

- 5) Für jede der 3 angeführten Abhängigkeiten wird diejenige Funktion (a bis k) als beste verwendet, welche das höchste Bestimmtheitsmaß B aufweist. Es ist nicht erforderlich, daß w monoton wächst.
- 6) Es wird mit demjenigen Ausgleich für w weitergerechnet, bei dem für die 3 besten Anpassungen die mittlere quadratische Abweichung am geringsten ist.
- 7) Nun erfolgt eine Prüfung, ob $h = u + w \ln T$ monoton wächst.

Wächst h nicht monoton, so wird diese vorläufig beste Anpassung ausgeschieden. Es wird bei Punkt 5 so lange fortgesetzt, bis h monoton wächst.

Ist dies der Fall, so erfolgt die endgültige Berechnung der Niederschlagshöhen über alle Dauerstufen D und Wiederkehrzeiten T.

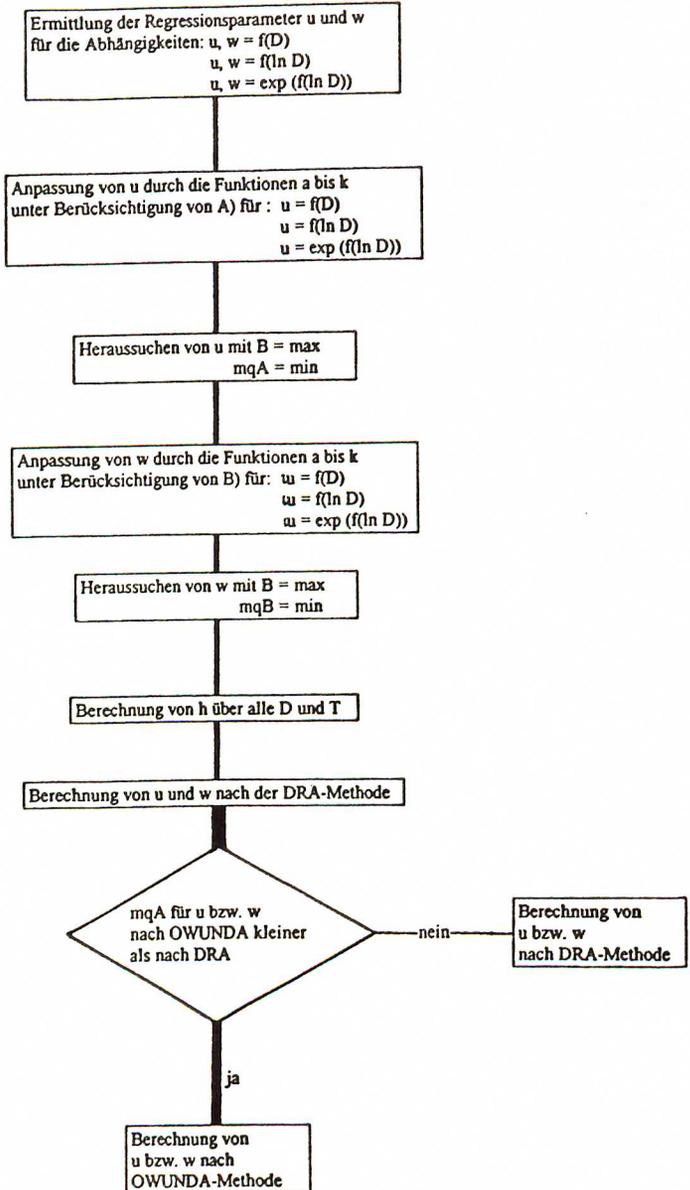
- 8) Darüber, ob die Methode OWUNDA oder die DRA-Methode (darunter wird hier der lineare Ausgleich der Regressionsparameter u und w über die drei unterschiedlichen Zeitbereiche mit anschließendem Sprungausgleich verstanden) zur Berechnung der Niederschlagshöhen verwendet wird, entscheidet jeweils die Residualanalyse.

Als beste Methode ist diejenige anzusehen, bei der die mittlere quadratische Abweichung von u bzw. w am geringsten ist. Da sich die Niederschlagshöhe auf Grund der Beziehung $h = u + w \ln T$ ergibt, wird sich üblicherweise der Regressionsparameter w am stärksten auf die Niederschlagshöhe auswirken und es ist deshalb seiner Bestimmung größte Beachtung zu schenken. Dies gilt vor allem bei längeren Wiederkehrzeiten.

Die Vorgangsweise dieses Optimierungsverfahrens läßt sich in Form eines Flußdiagramms darstellen.

FLUSSDIAGRAMM

(gilt sowohl für die partiellen als auch für die jährlichen Serien)



2.3 Niederschlagsinterpolation unter Berücksichtigung orographischer Effekte (NIP)

Die regionale Verteilung klimatologischer Extremwerte ist in erster Linie eine Funktion der Orographie. Je jünger der betrachtete Zeitraum, desto stärker tritt die stochastische Niederschlagskomponente im Vergleich zur deterministischen in den Hintergrund. Dies gilt für extreme Niederschläge ebenso wie für mittlere Niederschläge und bildet die Grundlage des Interpolationsmodells.

Abbildung 2 zeigt die Grundstruktur des Modells (HAIDEN, 1994). Den primären Input stellen Stationsniederschlags- und Orographie-daten sowie eine theoretische Beziehung zwischen Niederschlag und Orographie dar. Die Parameter dieser theoretischen Beziehung werden mit Hilfe der vorhandenen Daten optimiert und dann wird ein modelliertes Niederschlagsfeld erstellt. Die Stationsniederschlagsdaten werden aber auch direkt - ohne Berücksichtigung der Orographie - auf ein Feld interpoliert. Das endgültige Niederschlagsfeld schließlich wird als gewichtetes Mittel aus diesen beiden Feldern berechnet, wobei in die Gewichtung wiederum die Orographie eingeht.

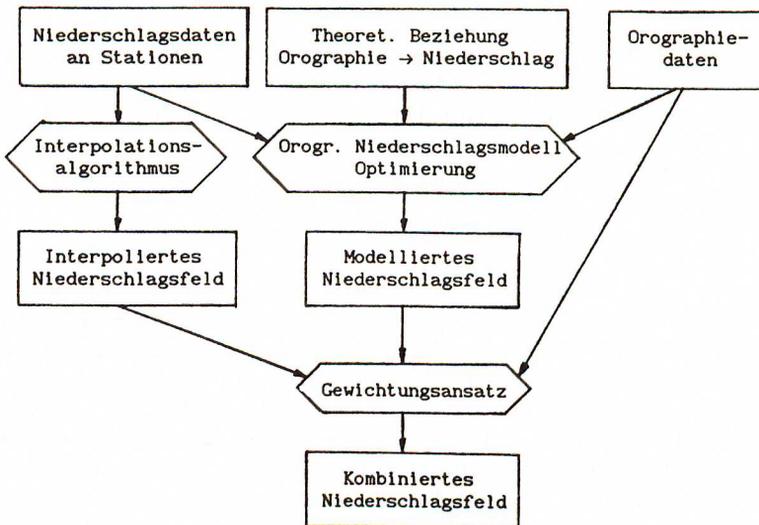


Abb.2: Struktureller Aufbau des Interpolationsmodells. 6-eckige Rahmen bezeichnen Modellkomponenten, 4-eckige Rahmen bezeichnen Daten bzw. berechnete Felder.

Ein wesentlicher Aspekt des Modellkonzepts ist sein modularer Aufbau. Unter Beibehaltung der Grundstruktur können für die einzelnen Modellkomponenten (6eckige Rahmen in Abbildung 2) verschiedene Ansätze gewählt und getestet werden. Die im folgenden beschriebene konkrete Wahl von Funktionen und Algorithmen ist als eine unter vielen möglichen Varianten zu verstehen. Sie stellt auf Grund ihrer Einfachheit und ihres teilweise stark heuristischen Charakters eine Art "nullte" Modellversion dar.

Das Programm soll die an N Stationen gegebenen Niederschlagswerte R_i ($i = 1, \dots, N$) auf ein reguläres Gitter (r_m, p_n) interpolieren. Als erster Schritt wird (noch ohne Berücksichtigung der Orographie) aus den Stationswerten R_i ein Feld R_{OBS} (x_m, y_n) gemäß

$$R_{OBS}(x_m, y_n) = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{R_i}{r_i^2}}{\sum_{i=1}^N \frac{1}{r_i^2}} \quad (1)$$

berechnet, wobei die inversen Gewichte r_i^{-2} durch die Abstandsfunktion

$$r_i^2 = (x_m - x_i)^2 + (y_n - y_i)^2 \quad (2)$$

gegeben sind. Diese Gewichtung ergibt an den Stations-Orten (x_i, y_i) exakt die vorgegebenen Niederschlagswerte R_i . Die quadratische Form der Gewichte in (1) wurde gewählt, um einen möglichst glatten Feldverlauf zu erhalten (Abbildung 3).

Der Einfluß der Orographie wird mit dem Ansatz

$$R_{MOD}(x_m, y_n) = R_0 \exp\left(-\frac{h}{H}\right) + R_1 \vec{e} \cdot \nabla h \quad (3)$$

modelliert, wobei $h = h(x_m, y_n)$ die Orographie bezeichnet. \vec{e} ist der Einheitsvektor in Strömungsrichtung, R_0 und R_1 sind Konstanten mit der Dimension Niederschlagshöhe, deren Werte im Modell während der Interpolationsberechnung optimiert werden. Bei dieser Optimierung wird das mittlere Abweichungsquadrat zwischen berechneten und beobachteten Niederschlagshöhen an den Stationen minimiert. Der Parameter H hat den Wert 3 km und kann als Skalenhöhe des Wasserdampfs interpretiert werden. Der erste Term stellt den konvektiven Niederschlagsanteil dar, der durch das mit der Höhe abnehmende Wasserdampfangebot limitiert wird. Der zweite Term repräsentiert den orographischen Aufgleit- und Stauniederschlag, der zum Anstieg des Geländes in Strömungsrichtung proportional gesetzt wird. Wenn dieser Anstieg negativ ist, wird er auf den Wert 0 gesetzt, d.h. abfallendes Terrain wirkt wie ebenes Gelände.

Die wirkliche Abhängigkeit orographischer Starkniederschläge von der Orographie ist natürlich weitaus komplexer und läßt sich nicht durch eine einfache algebraische Beziehung darstellen (SMITH, 1979; COTTON und ANTHES, 1989). Die Modellierung klimatologischer Extremniederschläge mit analytisch-numerischen Methoden (HAIDEN et al., 1991) hat aber gezeigt, daß der einfache Ansatz in (3) bereits einen großen Teil des Problems erfaßt.

Wesentlich bei der konkreten Anwendung von (3) ist die geeignete Auflösung der digitalen Geländedaten. Es ist nicht der Punktwert von Anstieg und Höhenlage, sondern deren Mittel über ein größeres Gebiet für die orographische Niederschlagsverstärkung entscheidend. Die hier verwendeten Geländehöhen wurden durch Mittelung der Daten eines digitalen Geländemodells mit etwa 1,5 km Auflösung gewonnen. Nach dem Test verschiedener Mittelungsradien (5, 10, 15, 20 km) und aufbauend auf den Ergebnissen früherer Modellrechnungen (HAIDEN et al., 1991) wurde schließlich die über 15 km Radius gemittelte Orographie gewählt.

Das endgültige Niederschlagsfeld R wird als gewichtetes Mittel aus dem interpolierten Feld R_{OBS} und dem modellierten Feld R_{MOD} gemäß

$$R = \frac{R_{OBS} + g_{MOD} R_{MOD}}{1 + g_{MOD}} \quad (4)$$

berechnet, wobei der Gewichtungskoeffizient des modellierten Feldes durch

$$g_{MOD} = \left(\frac{h - h_{OBS}}{\Delta h} \right)^2 \quad (5)$$

gegeben ist. $h_{OBS}(x_m, y_n)$ ist eine fiktive "Stationshöhenfläche", die aus den Höhenwerten $h(x_i, y_j)$ des digitalen Geländemodells an den Stationspunkten mittels einer zu G1.(1) analogen Interpolation berechnet wird. Die Niederschlagswerte an den Stationen bzw. das reine Interpolationsfeld R_{OBS} sind gewissermaßen für diese Stationshöhenfläche repräsentativ. Da die Stationen im allgemeinen nicht so dicht liegen, daß sie die gesamte Gebirgsstruktur erfassen, wird sich die reale (gemittelte) Orographie $h(x_m, y_m)$ von der Stationshöhenfläche $h_{OBS}(x_m, y_n)$ natürlich unterscheiden (Abbildung 4).

Das Gewicht des modellierten Niederschlags relativ zum rein quadratisch interpolierten Feld nimmt mit zunehmendem Abstand der mittleren Geländehöhe von der Stationshöhenfläche zu. In anderen Worten: Wenn die Stationen durch ihre Lage die orographischen Strukturen gut repräsentieren (z.B. über eher flachem Gelände), kann angenommen werden, daß die Stationsniederschläge auch die Niederschlagsstrukturen ausreichend repräsentieren. Der Gewichtungskoeffizient des modellierten

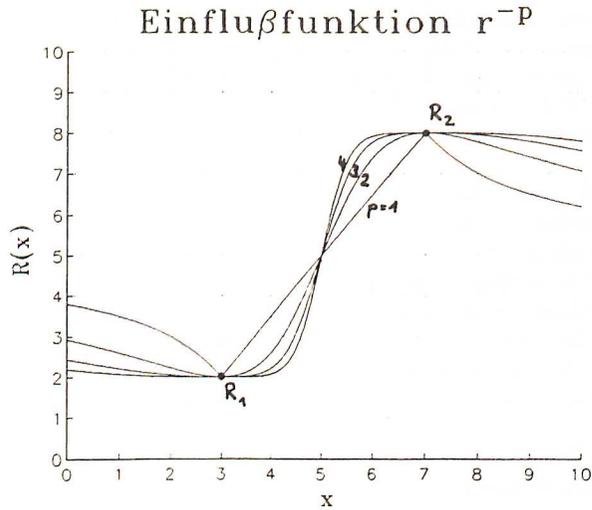


Abb.3: Interpolation zwischen zwei hypothetischen Niederschlagswerten R_1 und R_2 mit Potenzansatz für die Einflußfunktion, für verschiedene Werte des Exponenten.

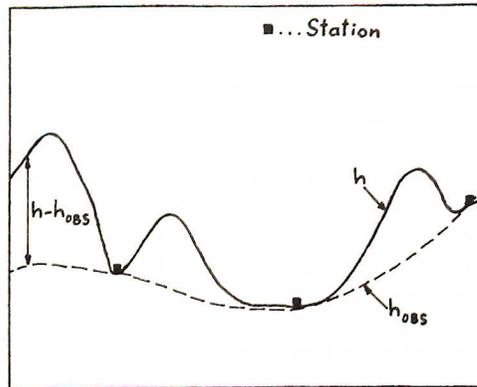


Abb.4: Skizze zum Verlauf von gemittelter Geländehöhe (h) und "Stationshöhenfläche" (h_{OBS}).

Feldes g_{MOD} in (5) nimmt in diesem Fall einen kleinen Wert an und das endgültige Niederschlagsfeld R in(4) ist im wesentlichen durch R_{OBS} bestimmt. Wenn sich die Geländehöhe von der Stationshöhenfläche stark unterscheidet (weil die Stationen z.B. alle in Tälern liegen), erhält g_{MOD} dagegen einen großen Wert und das modellierte Niederschlagsfeld bestimmt das endgültige Feld wesentlich mit.

Die spezielle Form der Gewichtungsfunktion (5) hat heuristischen Charakter und kann durch andere Ansätze ersetzt werden. Es wurde hier die einfachste Funktion, die - vom Nullpunkt ausgehend - zu negativen und positiven Werten symmetrisch zunimmt und keinen Knick aufweist, verwendet. Sie enthält nur eine zu bestimmende Konstante. Dieser vertikale Scaleparameter h kann anschaulich als jener Höhenunterschied im Gelände interpretiert werden, ab dem signifikante orographische Effekte auf klimatologische Starkniederschläge zu erwarten sind. Geeignete Werte für diesen Parameter müssen durch Modellläufe bestimmt werden. Für die ersten Modellrechnungen wurde der Wert 100 m verwendet.

3. Beispiele von NIP für urbanhydrologische Zwecke

Abb. 5 zeigt für die Dauerstufe 24 Stunden die erwartete Niederschlagszunahme mit der Seehöhe (Maximalwerte Dachstein, Feuerkogel, Totes Gebirge, ..., Minima im Ennstal).

Im Gegensatz dazu erkennt man in allen folgenden Abbildungen, welche Dauerstufen von 60 Minuten und mehr behandeln, eine Abnahme der Starkniederschläge mit der Seehöhe.

Abb. 6 läßt für Graz und Wien allein mittels Salzkammergutdaten eine grobe Vorinformation zu (höhere Werte jeweils östlich der Städte Graz und Wien).

Eine rein quadratische Interpolation für den Wiener Raum beinhaltet die Abb. 7.

Die folgende Abb. 8 zeigt das Ergebnis unter Berücksichtigung topographischer Strukturen. Man erkennt den niederschlagsvermindernden Effekt des Wienerwaldes bei kurzen Dauerstufen.

Die gleiche Eigenheit findet man in Abb. 9. Bei Vorgabe von nur 3 identischen Meßwerten in der Umgebung (Hügel) von Graz werden Strukturen erkennbar.

Eine Ausschnittsvergrößerung (Raum Graz) wieder mit 3 identischen (fiktiven) Niederschlagswerten, diesmal in tiefen Lagen demonstriert Abb.10.

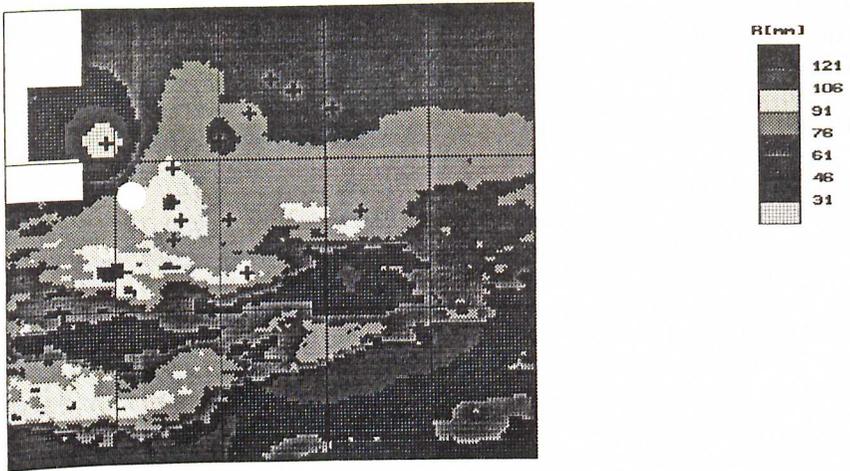


Abb.5: Niederschlagsinterpolation nach NIP (HAIDEN, 1994) im Raum 47° bis $48^{\circ}30'$ N und $12^{\circ}30'$ bis 15° E; $D = 24$ Stunden, $T = 10$ Jahre, Nordwind, mit Berücksichtigung der Topographie; Kreuze bezeichnen Stationen der bisherigen Auswertungen nach ÖKOSTRA; Markierung (Kreis): Salzburg.

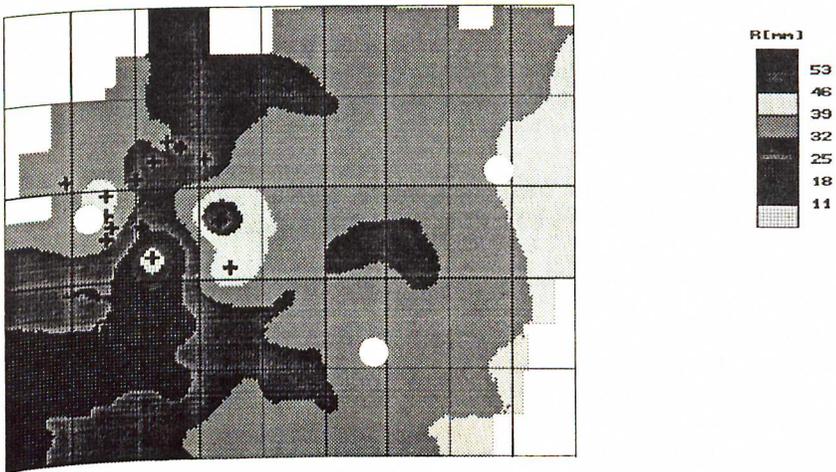


Abb.6: Niederschlagsinterpolation nach NIP (HAIDEN, 1994) im Ostalpenrum; $D = 60$ Minuten, $T = 10$ Jahre, Südostwind, mit Berücksichtigung der Topographie; Kreuze bezeichnen Stationen der bisherigen Auswertungen nach ÖKOSTRA; Markierungen (Kreise): Salzburg, Graz, Wien.

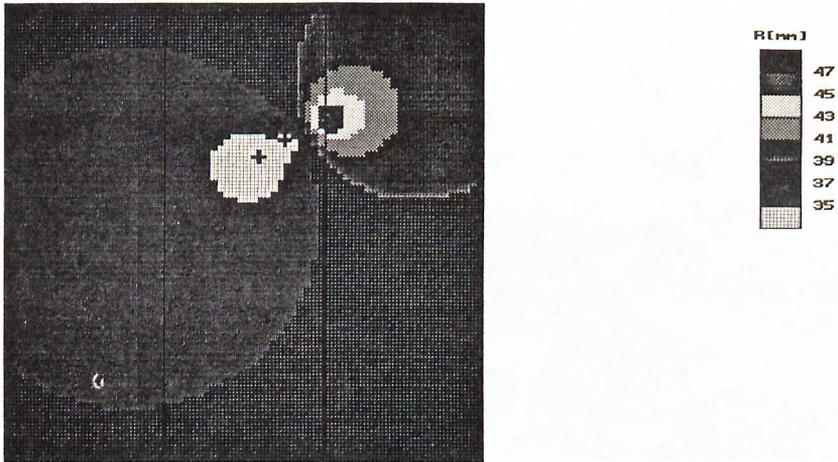


Abb.7: Niederschlagsinterpolation nach NIP (HAIDEN, 1994) im Raum $47^{\circ}30'$ bis $48^{\circ}30'$ N und $15^{\circ}30'$ bis 17° E; D = 15 Minuten, T = 50 Jahre, ohne Berücksichtigung der Topographie (quadratische Interpolation). Kreuze bezeichnen die Stationen Wien-Hohe Warte, Rosenhügel, Breitenlee und Innere Stadt (nach AUER und HAMMER, 1990).

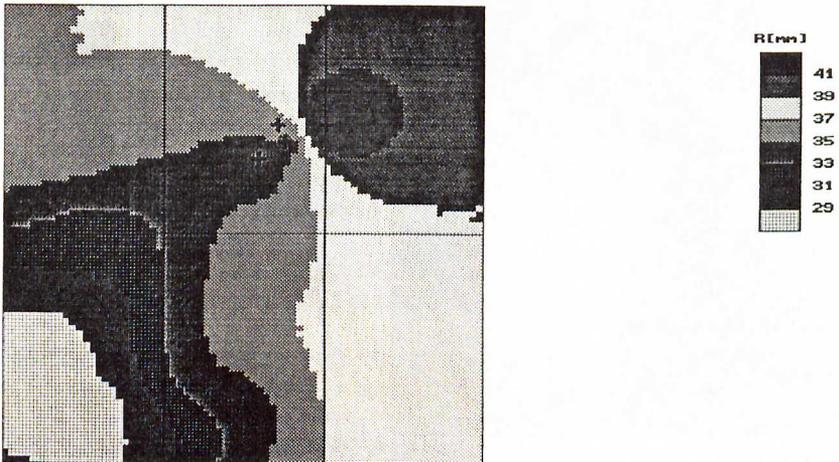


Abb.8: Wien Abb.7, jedoch bei Südwestwind mit Berücksichtigung der Topographie.

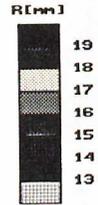
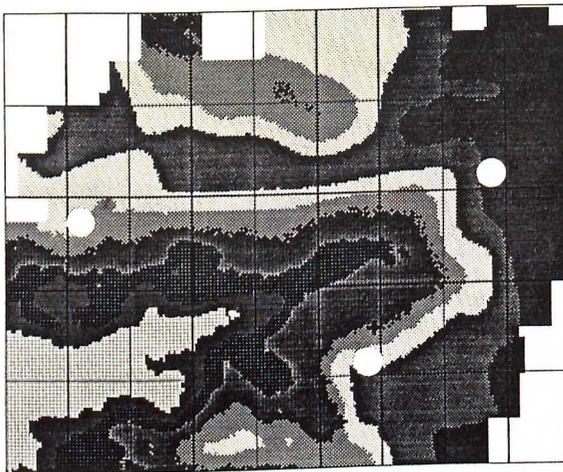


Abb.9: Niederschlagsinterpolation nach NIP (HAIDEN, 1994) im Raum $46^{\circ}30'$ bis $49^{\circ}N$ und $12^{\circ}30'$ bis $17^{\circ}E$; $D = 15$ Minuten, $T = 2$ Jahre, Ostwind mit Berücksichtigung der Topographie; Kreuze bezeichnen drei fiktive Stationen in der Umgebung (Hügel) von Graz (Regenmenge: 16 mm).

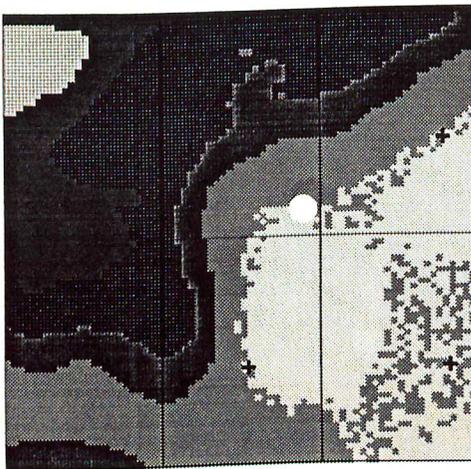


Abb.10: Niederschlagsinterpolation nach NIP (HAIDEN, 1994) im Raum $46^{\circ}30'$ bis $47^{\circ}30'N$ und $14^{\circ}30'$ bis $16^{\circ}30'E$. $D = 15$ Minuten, $T = 2$ Jahre, Ostwind mit Berücksichtigung der Topographie. Kreuze bezeichnen drei fiktive Stationen in Tallage in der Umgebung von Graz (Regenmenge: 16 mm).

Bei kurzen Dauerstufen wird das Stadtgebiet von Graz von heftigeren Niederschlagsereignissen betroffen als das Hügelland im Nordwesten.

Die differenzierten Resultate sind eine Aufforderung, Niederschlagsstreifen, auch in tiefen Lagen, vermehrt aufzubereiten und einer nachfolgenden Regionalisierung für Zwecke der Urbanhydrologie zuzuführen.

Anschrift der Verfasser:

MR Univ.Doz.Dr.Franz Nobilis, Hydrographisches Zentralbüro, Marxergasse 2, A-1030 Wien

Univ.Prof.Dr.Georg Skoda, Institut für Meteorologie und Geophysik der Universität Wien, Hohe Warte 38, A-1190 Wien

LITERATUR

- AUER, I., HAMMER N. und F.NEUWIRTH: IHP-Projekt: Starkregen in Österreich. Teilprojekt I: Methodische Untersuchung zur Wahl des geeigneten Auswerteverfahrens. Unveröffentlicht, Wien, 1984.
- AUER, I. und N.HAMMER: Starkregenanalysen im Raum Wien. Planungsorientierte Anwendung. Eigenverlag, Wien, 1990.
- BOSSARD, W. (Ed.); J. ZELLER, H.GEIGER und R. RÖTHLISBERGER: Starkniederschläge des schweizerischen Alpen- und Alpenrandgebietes. 7 Bände. Eidgen.Anst.f.d.Forstl. Versuchswesen, Birmensdorf, 1976-1983.
- CHOW, V.T., D.R.MAIDMENT und L.W.MAYS: Applied Hydrology. McGraw-Hill, New York, 1988.
- COTTON, W.R. und R.A. ANTHES: Storm and Cloud Dynamics. Int.Geophys.Series, Vol.44, Academic Press, San Diego, 1989
- DEUTSCHER WETTERDIENST: Starkniederschlagshöhen für die Bundesrepublik Deutschland. KOSTRA 87 - Abschlußbericht. Offenbach/Main, 1990a.
- DEUTSCHER WETTERDIENST: Starkniederschlagshöhen für die Bundesrepublik Deutschland. 2 Teile, DWD, Offenbach/Main, 1990b.
- DVWK 124: Niederschlags-Starkregenauswertung nach Wiederkehrzeit und Dauer. DVWK-Regeln zur Wasserwirtschaft, Heft 124, 1985.

- FRITZER, H.: Quantitative Obeflächenbeseitigung im Straßenbau. BMBT, Straßenforschung, H.215, Wien, 1983.
- GEIGER, H., STEHLI, A. und U. CASTALLAZZI: Regionalisierung der Starkniederschläge und Ermittlung typischer Niederschlagsangablinien. In: Beiträge zur Geologie der Schweiz. Hydrologie Nr.33, 142-194, 1986.
- HAIDEN, T., KAHLIG, P. und M.KERSCHBAUM: Forschungen zu meteorologisch relevanten Parametern im Hinblick auf den vermutlich größten Abfluß (PMF). Forschungsbericht im Auftrag des BMLF, Sektion IV, Wien, 1991.
- HAIDEN, T.: Eine optimierte Starkniederschlagsauswertung. IV: Niederschlagsinterpolation unter Berücksichtigung orographischer Effekte. Mitt. d. Hydr.Dienstes in Österreich, 72, 13 S., 1994.
- HAMMER, N.: Kritische Literaturbewertung; in ÖKOSTRA-93, 1990.
- HAMMER, N.: Eine optimierte Starkniederschlagsauswertung. III: Optimierungsverfahren zur Erstellung von Regenhöhenlinien und Regenspendenlinien. Mitt.d.Hydr.Dienstes in Österreich, 1993.
- HEILIG, M.: Untersuchungen zur Auswahl der optimalen Ausgleichsfunktion über die Parameter der einzelnen Dauerstufen; in ÖKOSTRA-93, 1990.
- HELD, A.: Beitrag zu einer Definition für Starkregen im Ostalpengebiet. Archiv Met., Geophys. u. Biokl., Ser.B, 2, 448-461, 1951.
- HOLAWA, F. und G. SKODA: Richtlinien zur Starkniederschlagsauswertung in Österreich. Mitt. d. Hydr.Dienstes in Österreich, 64, 84-103, 1991.
- HYDROGRAPHISCHES ZENTRALBÜRO: Die Gewitterregen vom 1.August 1896 in Niederösterreich. MB-9, Wien 1896.
- HYDROGRAPHISCHES ZENTRALBÜRO IM BMLF, HYDROGRAPHISCHER DIENST IN ÖSTERREICH: Interne Richtlinie für die Vorprüfung von Niederschlagsregistrierungen, Wien, Juli 1992.
- JENSEN, H.: Räumliche Interpolation der Stundenwerte von Niederschlag, Temperatur und Schneehöhe. Zürcher Geogr. Schriften, 35, 70 S., 1989.
- NOBILIS, F., HAIDEN, T. und M.KERSCHBAUM: Statistische Untersuchungen

zur Frage des vermutlich größten Niederschlags (PMP) in Österreich. Mitt.d.Hydr. Dienstes in Österreich, 63, 27-66, 1991.

ÖKOSTRA-93: Österreichische koordinierte Starkniederschlagsregionalisierung und -Auswertung. Heft 1: Grundlagen und Strategien. Forschungsbericht ZI.344.507/07-IV 3b/90 beim BMLF, Wien, Dezember 1990.

ÖKOSTRA-93: Heft 2: Vorprüfung von Niederschlagsregistrierungen (Richtlinien). Forschungsbericht ZI.344.507/07-IV 3b/90 beim BMLF, Wien, Dezember 1991.

ÖKOSTRA-93: Heft 3: Eine optimierte Starkniederschlagsauswertung. Forschungsbericht ZI.344.507/09-IV 3b/92 beim BMLF, Wien, Dezember 1992.

POTZMANN, R.: Niederschlagsstrukturen bei Starkniederschlägen. Aus: Diplomarbeit am Inst.f.Meteor. u. Geophys. d.Univ. Wien, 103 S., Wien, 1994.

REINHOLD, F.: Grenzwerte starker Regenfälle. Zeitschr. d. Ges.Ing., 58, 369-375, 1935.

REINHOLD, F.: Regenspenden in Deutschland (Grundwerte für die Entwässerungstechnik, GE 1940). Archiv f. Wasserwirtschaft, Berlin, 1940.

SCHIMPF, H.: Untersuchungen über das Auftreten beachtlicher Niederschläge in Österreich. Mitt.Hydr.Z.B. Heft 61, 12.Hydrographentagung, Wien 1969. Mitt.Nr.45, 1970a.

SCHIMPF, H.: Untersuchungen über das Auftreten beachtlicher Niederschläge in Österreich. Österr. Wasserwirtschaft, 22, 121-125, 1970.

SEVRUK, B.: Reliability of Precipitation Measurement. WMO-IAHS-ETH: Int. Workshop on Precipitation Measurement. St.Moritz, 1989, Switzerland; ETH Zürich, Precipitation Measurement, 13-19, 1989.

SKODA, G.: Eine optimierte Starkniederschlagsauswertung.
I: Erste Erfahrungen mit ÖKOSTRA-93. Mitt.d.Hydr.Dienstes in Österreich, Nr.69, 26-32, 1993 a, b.

SKODA, G.: Eine optimierte Starkniederschlagsauswertung.
II: Digitalisierung und Regenauswertung. Mitt.d.Hydr.Dienstes in Österreich, Nr.69, 33-42, 1993c.

- SKODA, G.: Fehler der Niederschlagsmessung. Teil I von Pilotstudie ZI.344.707/02-IV 3/93 beim BMLF, Wien, Dezember 1993d.
- SKODA, G.: Seehöhenabhängigkeit bei Niederschlägen. Teil II von Pilotstudie ZI.344.707/02-IV 3/93 beim BMLF, Wien, Dezember 1993e.
- SMITH, R.B.: The influence of mountains on the atmosphere. Adv.Geophys., 21, 87-230, 1979.
- STEINHÄUSSER, H.: Technischer Bericht über die Auswertung beachtlicher Niederschläge an Ombrographenstationen des Hydrographischen Dienstes in Österreich. Hydrographisches Zentralbüro im BMLF, Wien, 1965.
- VERBAND SCHWEIZ. ABWASSERFACHLEUTE: VSA/BUWAL-Projekt: Regendaten für die Siedlungsentwässerung. Gas-Wasser-Abwasser, 70, 11, 811-812, 1990.
- VERWORN, H.-R.: Digitalisierung und Regenstatistik. Teil I: Grundlagen, Teil II: Kurzdokumentation. Serie: Mikrocomputer in der Stadtentwässerung. Inst.f.techn.-wiss. Hydrologie, Hannover, 1993.