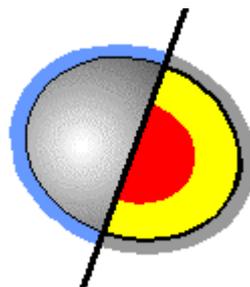


Hochaufgelöste Niederschlagsanalysen

Institut für Meteorologie
und Geophysik
Universität Wien

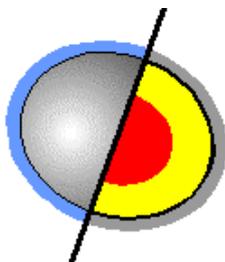


Mag. Stefan Schneider

Dr. Bodo Ahrens

Prof. Dr. Reinhold Steinacker (PI)

Dr. Alexander Beck



**Institut für Meteorologie und Geophysik
Universität Wien**

A-1090 Wien, Althanstrasse 14, UZA II

Tel: +43 (0)1 4277 51930

Fax: +43 (0)1 4277 51902

<http://www.univie.ac.at/IMG-Wien>

Wien, November 2003

Teilprojekt von StartClim

“Startprojekt Klimaschutz: Erste Analysen extremer Wetterereignisse
und ihrer Auswirkungen in Österreich“

Projektleitung: Institut für Meteorologie und Physik
der Universität für Bodenkultur Wien

Türkenschanzstr. 18, 1180 Wien

URL: <http://www.austroclim.at/startclim/>

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung / Abstract	4
13-1 Fragestellung	5
13-2 Kooperation mit anderen Teilprojekten	6
13-3 Voraussetzungen der Niederschlagsanalyse	7
13-3.1 die Niederschlagsmessung	7
13-3.2 das Interpolationsverfahren VERA	8
13-3.3 Qualitätskontrolle und Fehlerkorrektur	9
13-3.4 GIS-basiertes Standardanalyseverfahren	11
13-4 Analyse der Hochwassertermine	13
13-4.1 die synoptische Lage	13
13-4.2 VERA-Analysen einzelner Tage	14
13-4.3 Kriging-Analysen einzelner Tage	19
13-4.4 Implementierung von Zusatzinformation und Downscaling	21
13-5 operationeller Betrieb	28
13-6 Ausblick und weiterer Forschungsbedarf	33
13-7 Literaturzitate	34
Abbildungs- und Tabellenverzeichnis	36
Abbildungen	36

Kurzfassung / Abstract

Kurzfassung

Die Daten der unregelmäßig verteilten Niederschlagsmessstellen müssen für wissenschaftliche Bearbeitungen auf ihre Qualität überprüft und auf ein möglichst feines regelmäßiges Gitter interpoliert werden. Beides ist mit dem objektiven Analyseverfahren VERA für den operationellen Betrieb in Echtzeit möglich. Vergleiche mit einem anderen Interpolationsverfahren haben gezeigt, dass VERA für das Hochwasserereignis 2002 realistische Ergebnisse liefert. Forschungsbedarf besteht noch bei den so genannten Fingerprints, mit denen Zusatzinformation zur Verfeinerung der Analysen eingebunden werden kann.

Abstract

Measurements from irregularly distributed stations need to be quality-checked and interpolated to a grid as fine as possible to use these data for scientific research. Both of these requirements can be fulfilled by using the objective analytical method VERA, which can be used for operational services in real-time. The good quality of the analyses for the flood in August 2002 was demonstrated by comparing VERA with other interpolation methods. Further researches should deal with the implementation of additional information by so-called fingerprints which are required to even increase the performance of VERA-analyses.

13-1 Fragestellung

Die in Teil B von StartClim zusammengefassten Teilprojekte beschäftigen sich mit den auslösenden Wetterfaktoren, der Analyse und den wirtschaftlichen Auswirkungen des Hochwassers im August 2002.

StartClim.13, das am Institut für Meteorologie und Geophysik der Universität Wien durchgeführt worden ist, befasste sich im Rahmen dieses Teiles mit der Niederschlagsanalyse.

Der von der Hochwasserkatastrophe betroffene Raum weist ein sehr dichtes Niederschlagsmessnetz auf. Trotzdem ergeben sich je nach verwendetem Interpolationsverfahren unterschiedliche Werte für den Flächenniederschlag, der als Basis für hydrologische Modelle dienen kann. Die Sensitivität des analysierten Flächenniederschlages bezogen auf Stationsdichte und unterschiedlicher Auflösung ist mit dem Analysewerkzeug VERA (Vienna Enhanced Resolution Analysis) getestet worden. Dieses Werkzeug bedient sich methodisch eines flexiblen Variationsansatzes mit integriertem Datenqualitätsmodul.

Die Analysen sind in unterschiedlichen räumlichen Auflösungen durchgeführt und die Unterschiede quantifiziert worden. Außerdem sind die erstellten Analysen einerseits mit Radardaten, andererseits mit GIS-basierten Standardanalyseverfahren verglichen worden, um die Unsicherheiten der Analyse quantifizieren zu können. Die hohe Stationsdichte und die vorgeschlagenen Methoden erlauben eine Bewertung der verschiedenen Analyseverfahren.

Eine Verfeinerung der Auflösung mittels Radardaten und eines stochastischen Downscaling-Verfahrens ist geprüft worden. Dazu sind mittels Varianzanalyse notwendige Parameter bestimmt worden, welche eine weitere Verfeinerung von Analysen als auch von Niederschlagsprognosen im statistischen Sinne erlauben. Dies ist beispielsweise relevant, wenn meteorologische Felder als Eingangsgröße hydrologischer Modelle verwendet werden sollen.

Weiters ist eine Bewertung der Durchführbarkeit angestellt worden, operationelle Echtzeitanalysen des Flächenniederschlages in hoher räumlich-zeitlicher Auflösung inklusive automatischer Qualitätskontrolle zu erstellen. Dazu sind mehrere Aspekte geprüft worden, zum Beispiel der Einfluss der Stationsdichte auf die Qualität der Analyse durch Weglassen verschiedener Stationen. Dies ist ein wesentlicher Schritt zur Durchführbarkeitsbewertung von Echtzeitanalysen, da im Echtzeitmodus nur eine Untermenge der Stationsmeldungen vorhanden ist.

13-2 Kooperation mit anderen Teilprojekten

Wie schon eingangs erwähnt wurde, finden die Niederschlagsanalysen zahlreiche Anwendungen, dementsprechend sind auch Anknüpfungspunkte zu anderen Teilprojekten gegeben, wobei diese Interaktion mit anderen Projekten ein erklärtes Ziel von StartClim ist. Besonders hervorgehoben seien hier die Projekte StartClim.5 unter der Leitung von Dr. Formayer (IMP, BOKU Wien) und StartClim.14 unter der Leitung von Dr. Haiden (ZAMG). Weiters besteht die Zusammenarbeit mit StartClim.12, da bei diesem Projekt ebenfalls das Analyseverfahren VERA Verwendung findet. Schließlich sei hier noch StartClim.1 angeführt, bei dem die Qualitätskontrolle ausgewählter Klimaparameter durchgeführt wird.

Die Kooperation mit den erwähnten Teilprojekten war von unterschiedlicher Art und sei hier im Folgenden kurz dargestellt.

Für das Projekt StartClim.14, „Prognosegüte meteorologischer Vorhersagemodelle im Zuge der Hochwasserereignisse im August 2002“, wurden von unserer Seite die VERA-Analysen für die vier untersuchten Tage zur Verfügung gestellt. Damit konnte eine Verifikation der vorhergesagten Flächenniederschläge von ALADIN durchgeführt werden. Zusätzlich wurden Standard-Kriging Analysen für eine vergleichende Verifikation zur Verfügung gestellt. Im Gegenzug wurden die ALADIN-Prognosen versuchsweise als Vorinformation für die objektive Niederschlagsanalyse verwendet, die Ergebnisse dieses Tests werden in Kapitel 4 näher besprochen.

Die Zusammenarbeit mit StartClim.12, „Ein innovativer Zugang zur Analyse des Hochwasserereignisses August 2002 im Vergleich zu ähnlichen Extremereignissen der jüngeren Vergangenheit“, besteht speziell im Bereich der programmtechnischen Fragen, da für dieses Teilprojekt ebenfalls VERA verwendet wird.

Für StartClim.5, „Möglichkeiten statistischer Downscalingverfahren zur Ableitung von Extremereignissen in Österreich aus GCM-Feldern“, sind die VERA-Analysen für die Beurteilung der Flächenniederschläge verwendet worden, im Gegenzug sind uns die Niederschlagsdaten der HZB-Stationen, die für die VERA-Analysen Anwendung gefunden haben, von den StartClim.5-Partnern zur Verfügung gestellt worden.

StartClim.1, „Qualitätskontrolle und statistische Eigenschaften ausgewählter Klimaparameter auf Tageswertbasis im Hinblick auf Extremwertanalysen“, hat Bezugspunkte im Bereich der Qualitätskontrolle von Daten, die ja auch im hier vorgestellten Projekt ein Forschungspunkt ist.

13-3 Voraussetzungen der Niederschlagsanalyse

Die Niederschlagsanalyse sieht sich seit jeher mit dem Problem konfrontiert, dass der Niederschlag in seinem Auftreten eine wesentlich inhomogenere Verteilung zeigt, als das bei den meisten anderen gängigen gemessenen Größen in der Meteorologie der Fall ist. Diese Inhomogenität tritt speziell dann auf, wenn es sich um konvektive Niederschläge handelt, und betrifft sowohl die räumliche als auch die zeitliche Skala. Außerdem spielen im Alpenbereich orographische Effekte eine große Rolle bei der Niederschlagsbildung. Diese Umstände führen dazu, dass objektive Analyseverfahren wie VERA, die für Parameter wie Druck oder Temperatur sehr gut Ergebnisse erzielen, für die Niederschlagsanalyse speziell adaptiert werden sollten, um die gewünschte Genauigkeit bei der Analyse zu erreichen.

13-3.1 die Niederschlagsmessung

Die inhomogene Verteilung des Niederschlages stellt nicht nur an die Analyse, sondern auch schon an die Messung große Herausforderungen.

Die einfachste Möglichkeit zur Niederschlagsmessung besteht in der Verwendung eines Sammelgefäßes, dessen obere Öffnung einen definierten Querschnitt aufweist. Mit einem geeichten Glasmesszylinder wird die Niederschlagsmenge mit einer Genauigkeit von $1/10$ mm bestimmt. Sie wird dabei entweder als Niederschlagshöhe in mm oder als Niederschlagsmenge in l/m^2 angegeben, wobei $1 \text{ mm} = 1 \text{ l/m}^2$.

Solche Geräte werden an den Klimastationen zur Kontrolle noch verwendet, für die automatische Niederschlagsaufzeichnung werden hingegen Ombrometer mit einer Wippe verwendet. Der Niederschlag fließt aus dem Trichter in die eine Schale einer Wippe. Jede der beiden miteinander verbundenen Schalen fasst eine vordefinierte Wassermenge. Ist diese Wassermenge erreicht, so kippt die Wippe um. Die bisher gefüllte Schale entleert sich und der weitere Niederschlag wird in der zweiten Schale gesammelt. Jeder Wippvorgang erzeugt einen elektrischen Impuls und kann mit einer Datenerfassungsanlage gezählt werden.

Bei den genannten Messmöglichkeiten ist jedoch zu beachten, dass Einflüsse wie starker Wind während des Niederschlagsereignisses oder die Verdunstung des gesammelten Niederschlagswassers die Messergebnisse verfälschen. Barry (1992) gibt den durchschnittlichen Messfehler mit 5-15% der tatsächlich gefallenen Regenmenge an, die Ungenauigkeiten sind bei Messungen von festen Niederschlägen noch größer.

Neben den in-situ-Messverfahren gibt es auch Fernerkundungsmethoden zur Niederschlagsmessung. Hier ist speziell die Verwendung des Radars zu erwähnen. Das Messprinzip besteht darin, Wellen auszusenden, die von den Niederschlagsteilchen teilweise reflektiert werden. Die Reflexionen werden vom Radargerät aufgefangen, wobei die Intensität der zurückkommenden Wellen ein Maß für die Niederschlagsintensität ist. Der genaue Zusammenhang zwischen dem reflektierten Signal und der tatsächlich am Boden auftreffenden Niederschlagsmenge ist jedoch noch nicht geklärt. Außerdem ist der Einfluss von Störfaktoren wie die Signalabschattung im Gebirge und die Signaldämpfung in Starkniederschlagsfeldern noch nicht exakt abschätzbar. Dennoch können Radarmessungen wichtige Zusatzinformationen über die Niederschlagsverteilung liefern. Der große Vorteil des Radars besteht darin, dass der Niederschlag flächenmäßig erfasst wird, was bei Niederschlagsmessungen am Boden nicht der Fall ist.

Eine zweite Möglichkeit der Fernerkundung stellen Satellitenmessungen dar, wobei hier zwischen aktiven und passiven Messungen unterschieden werden muss. Bei aktiven Messungen wird wie beim Radar Wellen vom Satelliten ausgesandt, die von den Tröpfchen reflektiert werden, passive Messungen zeichnen nur Signale auf, die von der Atmosphäre

ausgesandt werden. Hier besteht die Anwendung speziell in der Identifikation von niederschlagsbringenden Wolken. Allgemein ist zu den Niederschlagsmessungen mittels Satellit zu sagen, dass die Entwicklung hier erst am Beginn steht.

Eine ebenfalls relativ neue Methode ist die Messung mittels Laser. Dabei handelt es sich um eine direkte optische Messung von Niederschlag in der Luft mittels eines Lasermessstrahls zwischen einem Sender und Empfänger. Dabei wird durch den Niederschlag die Transmissionsfähigkeit der Luft verändert, was nach der Kalibrierung des Gerätes zur Berechnung der Niederschlagsintensität verwendet werden kann.

Zusätzlich zu den schon bei der Messung begangenen Fehlern sind als weitere Fehlerquellen falsche Ablesung der Werte bei manuell betriebenen Stationen, schlecht gewartete Stationen oder Fehler bei der Datenübertragung zu berücksichtigen. Alle diese Fehlerquellen führen dazu, dass die Messwerte, die in die Analyse eingehen sollen, zuerst auf ihre Qualität geprüft werden müssen. Wie dies geschieht, wird im Folgenden noch besprochen.

13-3.2 das Interpolationsverfahren VERA

Das verwendete Interpolationsverfahren VERA (Vienna Enhanced Resolution Analysis) wurde am Institut für Meteorologie in Wien entwickelt (Steinacker et. al., 2000). Im Gegensatz zu den handelsüblichen GIS-basierten Analyseverfahren, bei denen es sich um statistische Verfahren (Kriging) handelt, basiert VERA auf der Variationsanalyse.

Bei der Variationsanalyse werden die Koeffizienten einer Funktion gesucht, deren Werte an bekannten Punkten, den Messstellen, gegeben sind. Die Aufgabe der Variationsrechnung ist es nun, aus einer Menge von Funktionen diejenige herauszufinden, für die ein gegebenes Funktional einen Extremwert annimmt. Für die VERA-Analyse ist man aber nur an den Werten der Funktion an den Gitterpunkten interessiert, wie die Funktion zwischen diesen Punkten aussieht, ist nicht von Interesse. Der allgemeine Ansatz der Variationsanalyse lautet

$$I(\gamma, p) = I_1(f_A) + \gamma J_p(f_A) \quad (3.1)$$

Dabei ist I_1 die Kostenfunktion und J_p die Penaltyfunktion. Die Kostenfunktion

$$I_1(f_A) = \sum_{k=1}^K w_k [f_A(x_k) - \Psi(x_k)]^2 \quad (3.2)$$

beschreibt die Abweichung der Schätzfunktion f_A von den Messwerten Ψ . Die bei VERA vor der Analyse durchgeführte Qualitätskontrolle (Kap. 3.5) rechtfertigt die Annahme, dass die vorhandenen Fehler in den Daten gefunden werden und damit die verwendeten Messwerte fehlerfrei sind. Die in der Kostenfunktion beschriebene Abweichung zwischen Schätzfunktion und Messwerten wird damit aber =0, das heißt, die Schätzfunktion f_A geht durch die gemessenen Werte. Daher wird für die VERA-Analyse nur die Penaltyfunktion

$$J_p(f_A) = \int_{x_a}^{x_b} \left[\frac{\partial p f_A(x)}{\partial x_p} \right]^2 dx \quad (3.3)$$

minimiert. Die Messwerte Ψ werden mittels einer Taylorreihe in die Form

$$\Psi = \Psi(x_0) + \left[\frac{\partial \Psi(x_0)}{\partial x} \right] x \quad (3.4)$$

aufgespaltet. Die so aufgespalteten Werte Ψ werden für die diskretisierte Form der Penaltyfunktion als Schätzfunktion verwendet

$$J_p(f_A) \approx \sum_{x_a}^{x_b} \left[\frac{\Delta^n \Psi(x)}{\Delta x_n} \right]^2 \rightarrow \min \quad (3.5)$$

γ , das bei der Variationsanalyse für die Gewichtung zwischen Kosten- und Penaltyfunktion sorgt, wird =1 gesetzt.

Durch die Wahl der Ableitung (n) kann bestimmt werden, ob die Steigung (Minimierung der 1.Ableitung) oder die Krümmung der Funktion (Minimierung der 2.Ableitung) ein Minimum werden soll, wobei auch eine Kombination aus erster und zweiter Ableitung möglich ist.

Die hier für eine Dimension angestellten Betrachtungen lassen sich natürlich auf 2 Dimensionen erweitern, womit die Methode für die Analyse der flächenmäßigen Verteilung meteorologischer Parameter anwendbar wird. Auch 3D- und 4D-Analysen sind mit dieser Methode durchführbar, die zu lösenden Gleichungssysteme stellen dann auf Grund ihrer Größe jedoch hohe Anforderungen an die Rechenkapazität des Computers.

13-3.3 Qualitätskontrolle und Fehlerkorrektur

Während grobe Fehler noch relativ einfach durch die Verwendung von Abfragen, zum Beispiel, ob der gemessene Niederschlagswert negativ ist, oder den Einbau von klimatologischen Grenzwerten, die nicht überschritten werden dürfen, auffindbar sind, ist dies bei kleinen Fehlern oder systematischen Abweichungen nicht mehr so einfach der Fall.

Mit dem Datenqualitätskontrollmodul von VERA besteht die Möglichkeit, eine objektive Fehlerkorrektur für Messwerte durchzuführen. Dabei besteht gegenüber anderen Kontrollverfahren der Vorteil, dass nur die Messwerte als Eingangsgröße benötigt werden, es ist kein statistisches Vorwissen oder ein Datensatz auf einem regelmäßigen Gitter nötig. Die Methode (Steinacker et. al., 2000) beruht so wie die VERA-Analyse auf dem Konzept, dass die Krümmung einer Oberfläche zwischen den zu überprüfenden Stationswerten ein Minimum werden soll.

Die Methode sei hier für ein zweidimensionales Feld mit n zu untersuchenden Stationen, die zu einem bestimmten Zeitpunkt Niederschlag (Ψ_s , s=1, n) gemessen haben, erklärt.

Um die Krümmung der Oberfläche zu minimieren, betrachtet man die zweiten Ableitungen, wobei die räumliche Variation der Messwerte um die kontrollierte Station mit einer Taylorreihenentwicklung durchgeführt wird, bei der höhere Ableitungen vernachlässigt werden.

$$\Psi(x, y) = \Psi_i + \left(\frac{\partial \Psi}{\partial x} \right)_i x + \left(\frac{\partial \Psi}{\partial y} \right)_i y + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} \right)_i x^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial^2 \Psi}{\partial y^2} \right)_i y^2 + \left(\frac{\partial^2 \Psi}{\partial x \partial y} \right)_i xy \quad (3.6)$$

Dieses Gleichungssystem lässt sich lösen, wenn der Wert an der kontrollierten Station und an 5 Umgebungsstationen bekannt ist. Der Niederschlag als skalare Größe kann als Geschwindigkeitspotential aufgefasst werden, wodurch sich Gleichung (3.6) in eine Form umschreiben lässt, in der der Meteorologe die Translation (G,H), die Divergenz (D), die Streckung (E) und die Scherung (F) eines zweidimensionalen Geschwindigkeitsfeldes erkennt.

$$\Psi_{j(i)} = \Psi_i + \underbrace{\left(\frac{\partial\Psi}{\partial x}\right)_i}_{G} x_{j(i)} + \underbrace{\left(\frac{\partial\Psi}{\partial y}\right)_i}_{H} y_{j(i)} + \underbrace{\frac{1}{4}\left(\frac{\partial^2\Psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\Psi}{\partial y^2}\right)_i}_{D} (x_{j(i)}^2 + y_{j(i)}^2) + \underbrace{\frac{1}{4}\left(\frac{\partial^2\Psi}{\partial x^2} - \frac{\partial^2\Psi}{\partial y^2}\right)_i}_{E} (x_{j(i)}^2 - y_{j(i)}^2) + \underbrace{\frac{1}{2}\left(\frac{\partial^2\Psi}{\partial x\partial y} + \frac{\partial^2\Psi}{\partial x\partial y}\right)_i}_{F} x_{j(i)} y_{j(i)} \quad (3.7)$$

In Matrixschreibweise ergibt sich

$$K_i = P_i R_i^{-1} \quad (3.8)$$

Die Ableitungen, die man erhält, können für ungünstige Stationsverteilungen hohe Werte annehmen, die aber noch nichts direkt über die Fehlerhaftigkeit des kontrollierten Wertes aussagen. Damit diese großen Werte richtig interpretiert werden können, wird die Sensitivität der Ableitungen in Bezug auf die Zentralstation mit

$$\frac{\partial K_i}{\partial \Psi_i} = \left(\frac{\partial P_i}{\partial \Psi_i}\right) R_i^{-1} \quad (3.9)$$

berechnet.

Somit kann bestimmt werden, wie groß die Änderung an der Zentralstation ausfallen muss, damit die Ableitung einen gewünschten Wert, und zwar ein Minimum, einnimmt. Bei der Berechnung gilt es zu beachten, dass ein großer Ableitungswert nur dann auf einen Messfehler hinweist, wenn keine der Umgebungsstationen einen ähnlich hohen Ableitungswert aufweist. Um dies zu überprüfen, werden für die 5 Umgebungsstationen ebenfalls die Ableitungen und die Sensitivitäten in Bezug auf die Zentralstation bestimmt. Dazu muss um jede dieser Stationen wieder ein Netz aus 5 Stationen gebildet werden, welches sowohl die ursprüngliche Zentralstation, als auch eine noch nicht verwendete Station enthalten muss.

Nun wird das Variationsprinzip auf die kinematischen Größen zweiter Ordnung, unter Berücksichtigung der Änderung von Ψ_i beim schreiben der Kostenfunktion, angewandt.

$$J_i(\Psi_i) = \iint_B K K^T(\Psi_i) dx dy \rightarrow \min \quad (3.10)$$

Die kinematischen Größen werden im Bereich des Fünfeckes B minimiert, wobei die Verwendung der zweiten Ableitungen dazu führt, dass eine Oberfläche mit einem minimalen rms der Krümmung festgelegt wird. Das entspricht der Penaltyfunktion beim thin-plate spline (Daley, 1991). In der Praxis wird die Kostenfunktion berechnet, in dem das in (3.10) beschriebene Integral durch eine Summe angenähert wird.

$$J_i(\Psi_i) \approx \sum_{j=0}^5 a_{Kj(i)} K_{j(i)}(\Psi_i) K_{j(i)}^T(\Psi_i) \rightarrow \min \quad (3.11)$$

Schließlich wird noch ein Gewichtungsfaktor eingeführt, der den Umstand berücksichtigt, dass die Umgebungsstationen im Allgemeinen nicht regelmäßig um die Zentralstation angeordnet sind und dadurch einen unterschiedlich großen Einfluss auf die zu korrigierende Station haben.

Als Ergebnis erhält man ein $\Delta\Psi_i$, welches die nötige Änderung des Messwertes an der Zentralstation angibt, damit die Ableitung und damit die Oberflächenkrümmung minimal wird.

Mit einer abschließenden Kontrolle wird nochmals sichergestellt, dass keine anisotropen Atmosphärenstrukturen als fehlerhafte Werte markiert werden. Dazu wird das $\Delta\Psi_i$ zum ursprünglichen Messwert addiert und die Minimierung der Kostenfunktion (3.11) nochmals

durchgeführt. Nur wenn der neue Wert um mindestens 90% unter dem ursprünglichen Ergebnis liegt, und keine der Umgebungsstationen einen ebenso hohen Wert aufweist, wird der Messwert der Zentralstation als fehlerhaft markiert.

Da das Verfahren als Eingangsdaten nur die Messwerte der unregelmäßig verteilten Stationen verwendet, gibt es auch keine Schranke für gross errors. Vielmehr wird ein lokales Maximum einer gradientschwachen Lage als fehlerhafter Wert identifiziert werden, während derselbe Wert in einer raueren Verteilung nicht als fehlerhaft bewertet werden wird.

13-3.4 GIS-basiertes Standardanalyseverfahren

Moderne Geo-Informationssysteme haben geo-statistische lineare Interpolationsmethoden, die zur Niederschlagsanalyse verwendet werden können und auch werden, entweder direkt integriert oder über zusätzliche Softwarepakete verfügbar. Beispiele solcher Interpolationsmethoden sind Kriging-Verfahren, inverse distance weighting (IDW) Verfahren, spline basierte Methoden usw. Hier soll beispielhaft die Analyse mittels Kriging Methoden besprochen werden, da diese Methode in der Literatur häufig zur Niederschlagsanalyse verwendet wird (Creutin und Obled, 1982, Beck und Ahrens, 2003), da diese in Wettervorhersagesystemen unter dem Namen Optimal Interpolation verwendet wird, und sie z.B. gegenüber einfachen Interpolationsverfahren wie IDW nutzen aus statistischer Information ziehen kann. Hier liegt aber auch der größte Schwachpunkt der Kriging Verfahren: Ist nicht genügend Information in Form von Messdaten vorhanden, verliert Kriging die Optimalität und kann zu nicht robusten Ergebnissen führen. Hier empfehlen sich dann z.B. spline-basierte Ansätze (s.o.).

Hier soll nicht auf den mathematischen Apparat der Kriging-Verfahren eingegangen werden. Dieser ist in einigen guten Lehrbüchern beschrieben, z.B. in Cressie (1993) und Wackernagel (1995). Einige Grundlagen, Vor- und Nachteile des Krigings sollen aber kurz angesprochen werden.

Gemessene Daten für viele physikalische Parameter sind oft lückenhaft, decken das Untersuchungsgebiet nicht gleichmäßig ab und sind unregelmäßig über das Untersuchungsgebiet verstreut. Oft ist es wünschenswert, Werte für die Variable auf einem regelmäßigen und wesentlich feineren Gitter zur Verfügung zu haben, als es praktisch möglich ist zu messen. Hier stellt sich das Problem der Schätzung, also das benutzen gemessener Daten, um die Werte der Variablen an Stellen vorherzusagen, an denen nicht gemessen wurde. Die einfachsten Schätztechniken verwenden gewichtete Linearkombinationen von in der Nähe gelegenen Messdaten. Das Schätzproblem ist nun, die Gewichte so zu wählen, dass der Schätzfehler minimiert wird. Die meisten Schätzverfahren ordnen Werten, die in der Nähe des zu schätzenden Punktes liegen ein größeres Gewicht zu, als weiter entfernten. Dies beruht auf der impliziten Annahme der Stetigkeit der Variablen, Werte in der Nähe sind ähnlicher, als weiter entfernt liegende. Für die meisten Variablen in den Geowissenschaften trifft das zu. Jedoch berücksichtigen diese Methoden nicht die beobachtbare Korrelation zwischen Messpunkten. Diese Information, die Korrelation, kann genutzt werden, um die Wichtung zu verbessern. Dies ist die Idee des Kriging. Kriging ist nicht nur ein erwartungstreuer linearer Schätzer, wie zum Beispiel auch inverse distance weighting sondern auch ein BLUE (Best Linear Unbiased(=erwartungstreu) Estimator), weil er die Schätzfehlervarianz minimiert. Kriging ist ein exakter Interpolator, d.h. die Schätzung an den Messpunkten entspricht genau dem gemessenen Wert (bis auf einen wählbaren so genannten nugget Effekt, der Messfehler repräsentieren kann) an dieser Stelle, was z.B. für Trendflächenanalyse nicht gilt. Außerdem eignet sich Kriging für unregelmäßig verteilte Messpunkte. So werden beispielsweise Gewichte von geclusterten Messpunkten (unverhältnismäßig viele dicht beieinander) auf weiter entfernte, aber weniger redundant platzierte Messpunkte verteilt. Kriging ist so gegenüber verschiedenen Samplingstrategien stabiler als andere Techniken. Eine wesentliche Einschränkung der

Standard Kriging Verfahren ist die Linearität und Annahme der Normalverteilung der Messgröße. Es gibt Lösungsansätze (z.B. normal score transformation), die aber nicht standardisiert sind und daher hier auch nicht betrachtet werden. Eine weitere Schwäche aller klassischen Interpolationsmethoden ist die Berücksichtigung unsicheren Zusatzwissens (z.B. Radarinformation bei der Interpolation von Stationsniederschlägen). Hier gibt es zwar Techniken wie Co-Kriging oder Universal Kriging mit externer Drift, aber der Fehler des Zusatzwissens wird nur implizit in der Schätzung von Cross-Korrelationsfunktionen beim Co-Kriging oder einfacher bei Regression der aktuellen Messwerte an den Stationspositionen beim Universal Kriging berücksichtigt. Aber auch hier gibt es weiterführende Ansätze, die auf dem Bayesian Maximum Entropy Ansatz basieren (Christakos, 2000).

Wir verwenden zur Illustration solcher Standard-Kriging Methoden das freie GIS grass (siehe <http://grass.itc.it/>) und das ebenfalls freie Geostatistik Packet gstat (<http://www.gstat.org/>).

13-4 Analyse der Hochwassertermine

Für die genaue Untersuchung der Niederschlagsanalyse mit VERA wurden 4 Tage ausgewählt, deren hohe Niederschlagsmengen zu den Überschwemmungen in Teilen Österreichs im August 2002 geführt haben. Es handelt sich dabei um den 6.8, 7.8., 11.8. und 12.8.2002. An manchen Messstationen wurden dabei die üblichen Niederschlagshöhen für den August um das drei- bis vierfache übertroffen (Rudolf und Simmer, 2002). Linz meldete zum Beispiel zwischen 1.8.2002 und 13.8.2002 354% des durchschnittlichen Augustniederschlags von 1961-1990.

Die für die Analysen verwendeten Messwerte sind jeweils die 24stündigen Niederschlagssummen von 6 Uhr Früh bis 6 Uhr Früh des Folgetages. Dieser Analysezeitraum wurde gewählt, da die verwendeten HZB-Stationen (Messstationen der hydrologischen Dienste) nur ein Mal pro Tag Messwerte liefern. Für umfangreiche Untersuchungen ist es jedoch wichtig, diese Stationen mit zu berücksichtigen, alleine schon wegen ihrer großen Anzahl von etwa 800 meldenden Stationen in Österreich. Weiters stehen die Daten von zirka 500 Messstellen in Österreich und dem angrenzenden Ausland zur Verfügung, die mehrmals am Tag Meldungen in das GTS-Netz einspeisen. Für diese Stationen wurden in einem ersten Schritt die Stundenwerte zu 24stündigen Werten aufsummiert.

13-4.1 die synoptische Lage

Den Beginn der Hochwasserereignisse läutete ein länglicher Kaltlufttropfen ein, der sich bereits Ende Juli aus einem ostatlantischen Trog gebildet hatte, und durch das blockierende Hoch über Nordosteuropa mit seinem Zentrum am 6. 8. 2002 über Frankreich lag. Bis zum 7. 8. schwenkte der südliche Teil bis nach Oberitalien und induzierte dort ein moderates Genuatief. Der Jahreszeit entsprechend löste diese Entwicklung in der extrem labil geschichteten Mittelmeerluft verbreitet hochreichende Konvektion mit Gewittern, Starkregen und Hagel aus. Der südliche Teil des Höhentiefs wanderte in der Folge relativ rasch nach Osten ab, ohne jedoch die Verbindung zum nordwestlichen Teil aufzulösen. Dadurch blieben der Ostalpenraum und der Nordosten Mitteleuropas für mehr als einen Tag genau in der Luftmassengrenze zwischen der kühleren atlantischen und der energiereichen, feuchtwarmen Mittelmeerluft. Aufsteigende Luftbewegung im Bereich der Okklusion verbunden mit Konvektion in der labilen Warmluftmasse erzeugte enorme Niederschlagsmengen. Besonders groß waren die Mengen dort, wo die Luft durch die nördliche bis östliche Bodenströmung im Gebirgsstau zusätzlich gehoben wurde, wie entlang der Nordalpen und der Mittelgebirge an der österreichisch – tschechischen Grenze.

Am 10. August 2002 strömte hochreichende Kaltluft begleitet von einem scharfen Höhentrog vom Nordatlantik über Frankreich ins westliche Mittelmeer. Sie löste, gestützt von der labilisierenden Wirkung des Mittelmeers, im Golf von Genua eine kräftige Tiefdruckentwicklung aus. Durch die Intensivierung des Tiefs schnürte sich der Tiefdrucktrog in den höheren Atmosphärenschichten über Oberitalien ab. In der Höhe abgeschlossene Tiefdruckgebiete weisen, wenn sie über dem Bodentief liegen, die Tendenz auf, sich nur langsam fortzubewegen. Auf diese Weise wurde feuchte Mittelmeerluft an der Ostflanke des Tiefdruckkomplexes weit nach Norden verfrachtet.

Am 11. August wanderte das Zentrum des Bodentiefs in die obere Adria, wobei sich im Laufe des Tages ein Teiltief nördlich der Alpen entwickelte und dort schließlich am 12. 8. einen Kerndruck von 995 hPa erreichte. Im Gegensatz zu einer klassischen Vb-Wetterlage, verblieb diesmal der Tiefdruckkomplex relativ lange im Alpenraum und konnte so zu den lange anhaltenden und ergiebigen Niederschlägen führen.

Erst im Laufe des 12. 8. begann sich das Tiefdruckgebiet allmählich nach Nordosten zu verlagern, wobei sich aber in einem Streifen von Ostdeutschland über Tschechien bis an die österreichischen Nordalpen eine stürmische nördliche bis nordwestliche Strömung etablierte. In höheren Schichten wurde nach wie vor die sehr feuchtwarme Mittelmeer-Luft in der Okklusion, zum Aufsteigen gezwungen. Durch die sehr hohen Wassertemperaturen der Ostsee dürfte auch Luft aus diesem Raum für die außerordentlich hohen Energiewerte verantwortlich gewesen sein. Dabei kam es zu einer dramatischen Verstärkung der Niederschläge durch zusätzliche Hebung der Luft im Stau der Gebirge, am Böhmerwald, im Mühl- und Waldviertel sowie am Alpennordrand.

13-4.2 VERA-Analysen einzelner Tage

Anhand der Analysen vom 6. August 2002 wird gezeigt, wie sich die Wahl der Gitterdistanz und die Stationsanzahl im analysierten Gebiet bei der Analyse mit VERA auf das Ergebnis auswirken. Anschließend werden die restlichen drei untersuchten Tage kurz besprochen.

6. August 2002

Für Abb.1 wie auch für die folgenden VERA-Graphiken gilt, dass die Niederschlagsverteilung durch Farbflächen dargestellt ist, wobei die Maximalwerte durch violett und rosa gekennzeichnet sind, wie auch aus der Skala zu entnehmen ist. Die Stationen, die für die Analyse Verwendung gefunden haben, sind als schwarze Punkte eingezeichnet. Die Einheit in den Graphiken beträgt mm/Tag.

Gut zu erkennen sind in Abb. 13-1 die Niederschlagsmaxima entlang der Alpennordseite und im Bereich der böhmischen Masse, die auf die Stauwirkung und Hebungsvorgänge entlang der Gebirge zurückzuführen sind. Weiters fällt das Maximum über Ungarn auf, dieses recht ausgeprägte Starkniederschlagsfeld wird jedoch nur durch zwei Messungen gestützt. Die

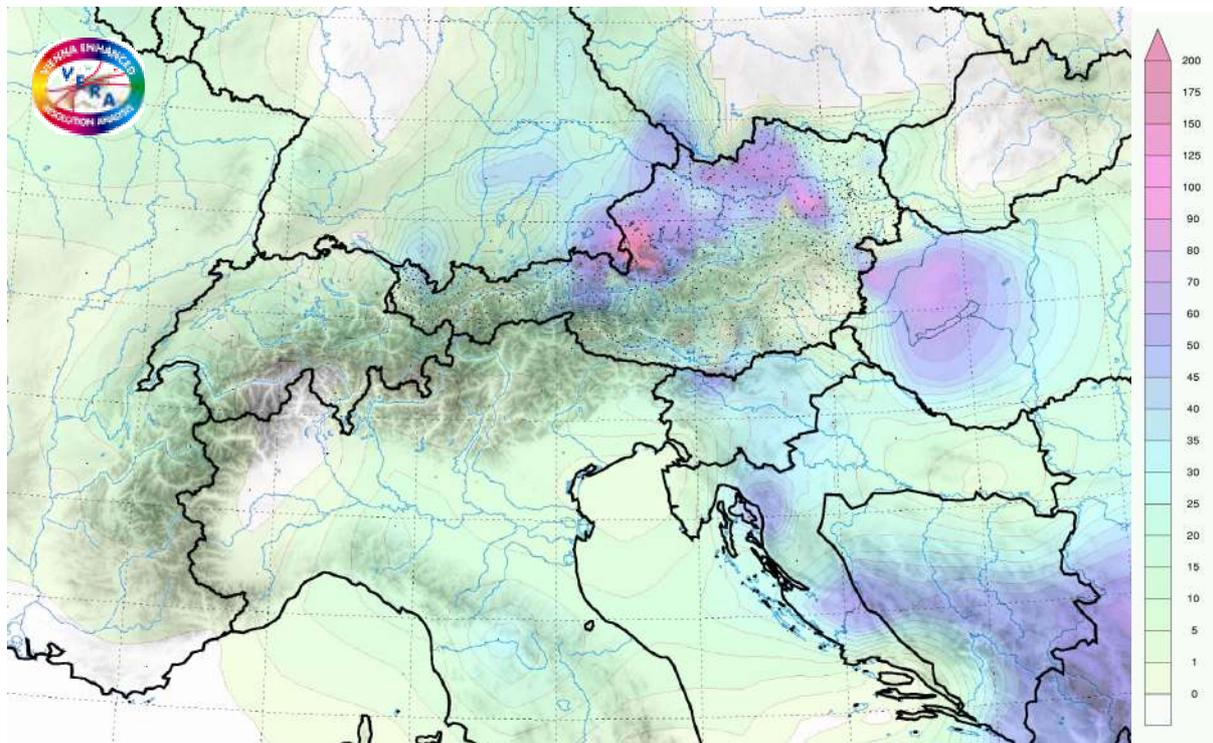


Abb. 13-1: Niederschlagsverteilung im Alpenraum für den 6. August 2002 (6.8.2002 06UTC bis 7.8.2002 06UTC), analysiert mit VERA, Gitterdistanz 16km.

geringe Stationsdichte lässt in Ungarn dem Interpolationsalgorithmus viel Freiheit, wodurch diese Struktur entsteht.

Im nächsten Bild ist ein Ausschnitt des analysierten Gebietes dargestellt, an dieser Detailaufnahme von Österreich soll auf die kleinräumigen Strukturen eingegangen werden, die mit VERA auflösbar sind.

Im Gegensatz zu Abb. 13-1 mit 16km Gitterdistanz beträgt in Abb. 13-2 die Gitterdistanz nur noch 4km. Bei dem in Österreich durch die zahlreichen HZB-Stationen gegebenen mittleren

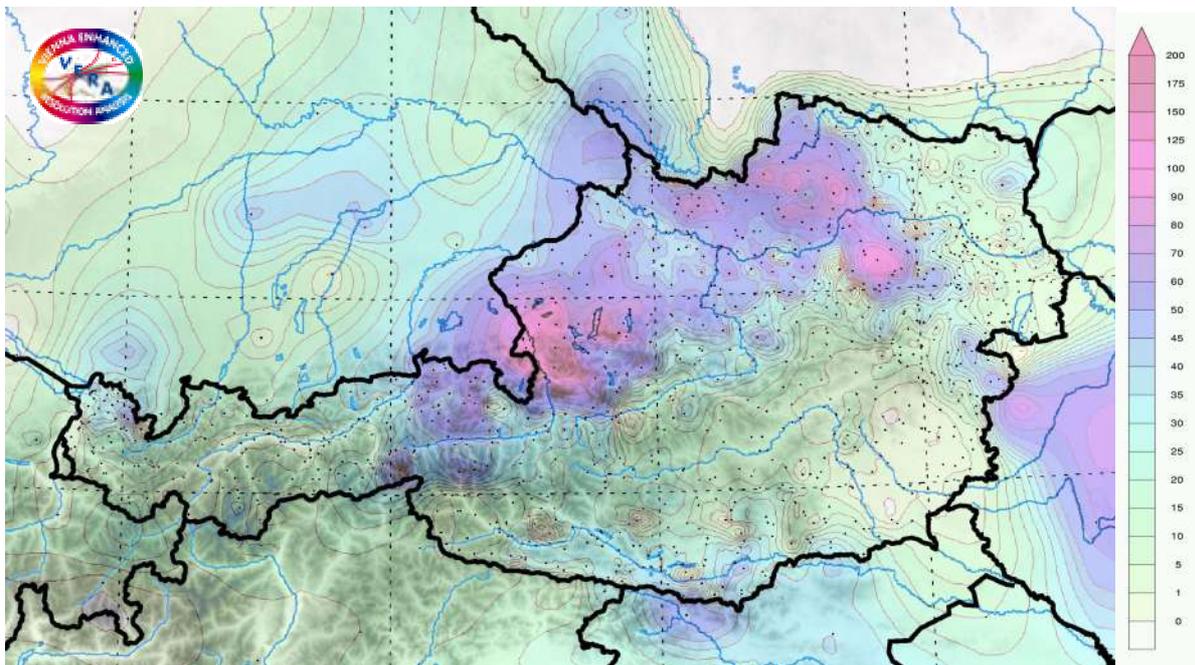


Abb. 13-2: Niederschlagsverteilung für den 6. August 2002 mit VERA, Gitterdistanz 4km.

Stationsabstand von etwa 9km wird daher mit dem Analyseverfahren zwischen den Messstellen tatsächlich eine neue Information erreicht. Unter Verwendung der mehrmals täglich meldenden meteorologischen Messstellen vergrößert sich der mittlere Stationsabstand auf etwa 20km.

Dem dichten Stationsnetz in Österreich stehen im Ausland für die Analysen nur die wenigen GTS-Stationen zu Verfügung, wodurch sich eine sehr inhomogene Stationsverteilung ergibt. Durch diesen Dichtesprung entlang der Grenze entstehen bei manchen Interpolationsverfahren Diskontinuitäten im analysierten Feld, bei VERA ist dies jedoch nicht der Fall.

Wenn man sich die Niederschlagsverteilung in Österreich nun genauer ansieht, fällt auf, dass sehr feine Strukturen aufgelöst werden, und die schon in Abb. 13-1 erkennbaren Maxima noch stärkere Unterteilungen zeigen, so zum Beispiel im Waldviertel und im Salzkammergut. Außerhalb der österreichischen Grenzen fällt einerseits ins Auge, dass die Strukturen wesentlich glatter sind als in Österreich, was durch die geringere Stationsanzahl und die damit geringere Menge an Informationen für die Interpolation bedingt ist, andererseits fällt der scharfe Gradient an der Grenze zu Tschechien auf. Der Ursache dafür liegt in der Station Ceske Budejovice begründet, da diese Station für den 6.8.2002 0,0mm Niederschlag meldet, während die Stationen auf der österreichischen Seite Werte um 70mm für den selben Zeitraum melden.

In Abb. 13-1 und Abb. 13-2 sind nur die zweiten Ableitungen minimiert worden. Verwendet man für Analyse auch die Minimierung der ersten Ableitung, so ergibt sich die Niederschlagsverteilung in Abb. 13-3.

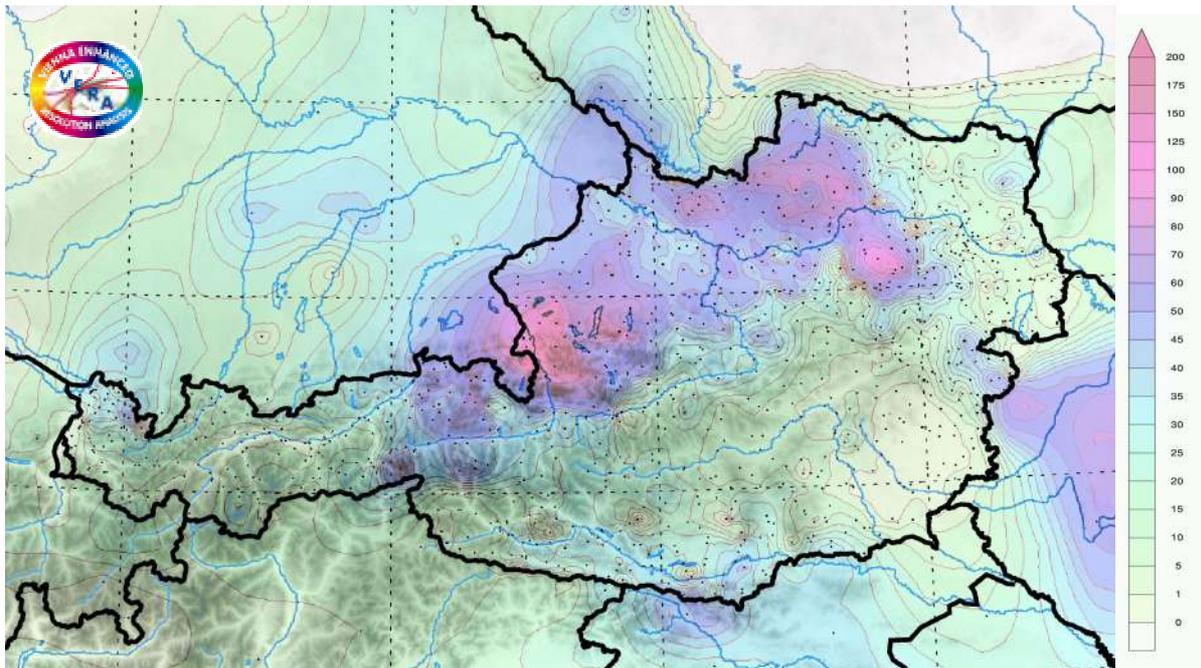


Abb. 13-3: Niederschlagsverteilung für den 6. August 2002 mit VERA, Gitterdistanz 4km, Minimierung der ersten und zweiten Ableitung

Der Glättungseffekt der ersten Ableitung zeigt sich am deutlichsten an der Grenze zu Tschechien, wo der Gradient in Richtung Ceske Budejovice abgeschwächt wird. Aber auch das lokale Minimum in der Südsteiermark wird geglättet und es gibt in dieser Region keine

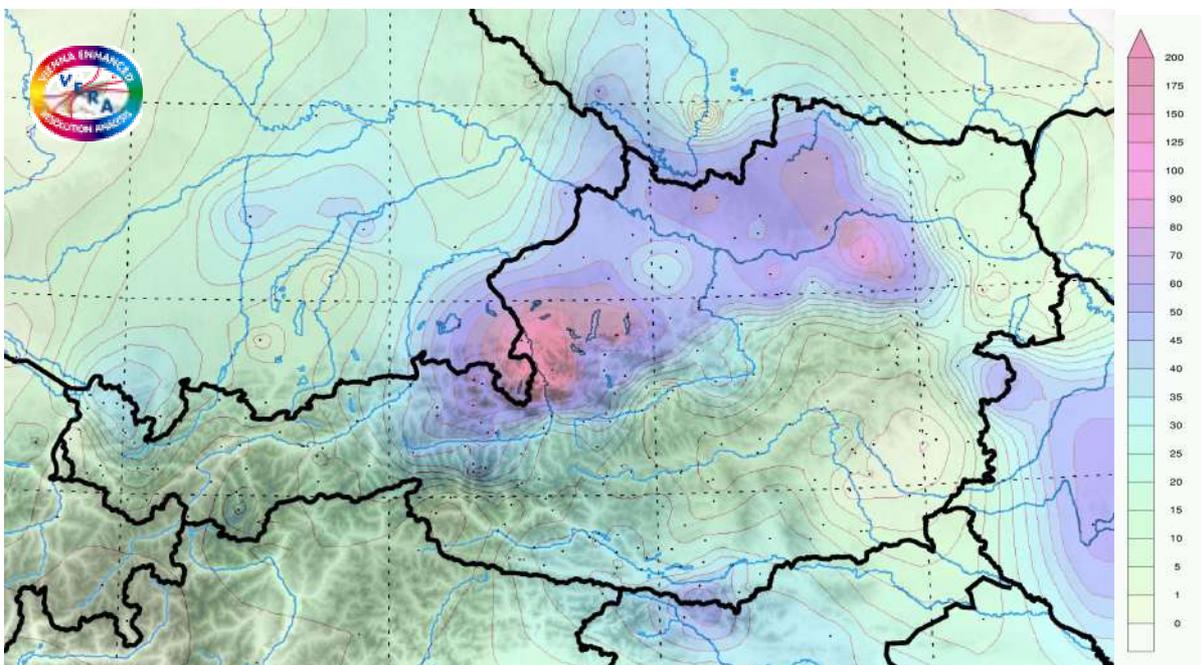


Abb. 13-4: Niederschlagsverteilung für den 6. August 2002 mit VERA, Gitterdistanz 4km, Minimierung der ersten und zweiten Ableitung, nur GTS-Stationen verwendet.

niederschlagsfreien Bereiche mehr. Nachdem der Einfluss der Ableitung gezeigt ist, ist im nächsten Schritt die Variation der Stationsdichte untersucht und dafür die Analysen ohne

HZB-Stationen gerechnet worden. Abb. 13-4 zeigt wiederum den Österreichausschnitt für den 6. August. Die Verringerung der Stationsmeldungen in Österreich von etwa 1000 auf 200 bewirkt eine Glättung der Niederschlagsverteilung, was auch zu erwarten war. Dennoch sind sowohl die Maxima in Salzburg und Niederösterreich als auch das Minimum in der Südsteiermark noch deutlich ausgeprägt. Erst wenn die Stationsanzahl drastisch verringert wird, kann die tatsächliche Niederschlagsverteilung nur noch grob wiedergegeben werden. In Abb. 13-5 ist ein Versuch dazu gezeigt, hier wurden für die Analyse nur noch 16 Stationen in Österreich verwendet.

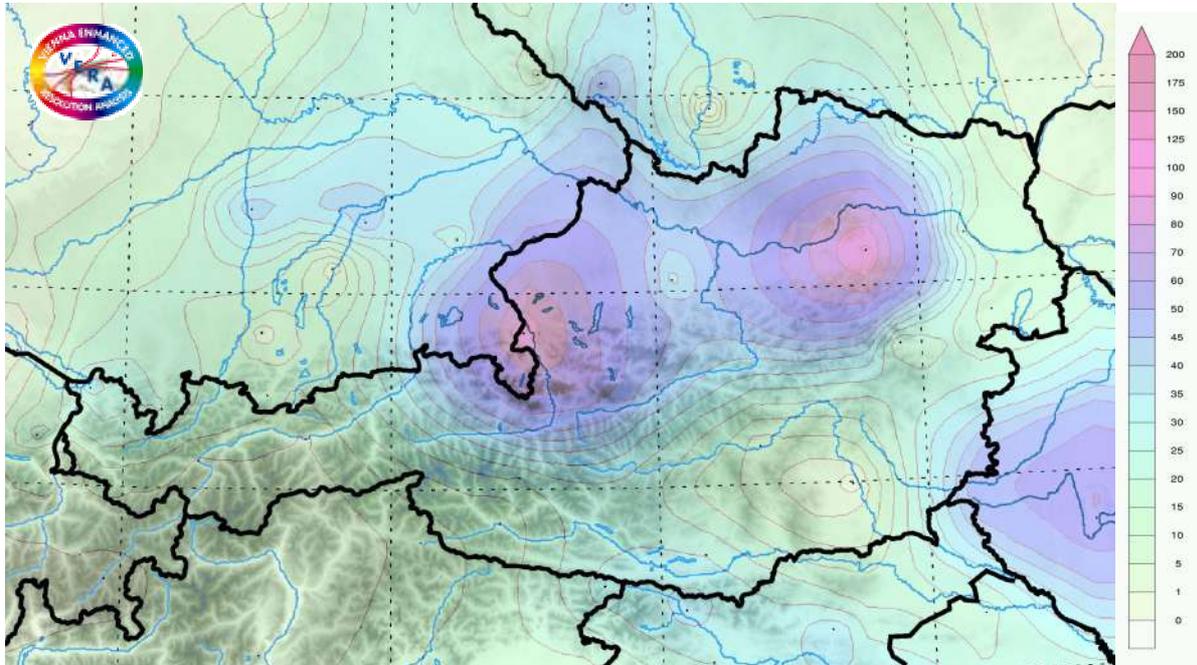


Abb. 13-5: Niederschlagsverteilung für den 6. August 2002 mit VERA, Gitterdistanz 4km, Minimierung der ersten und zweiten Ableitung, 16 Stationen in Österreich

7. August 2002

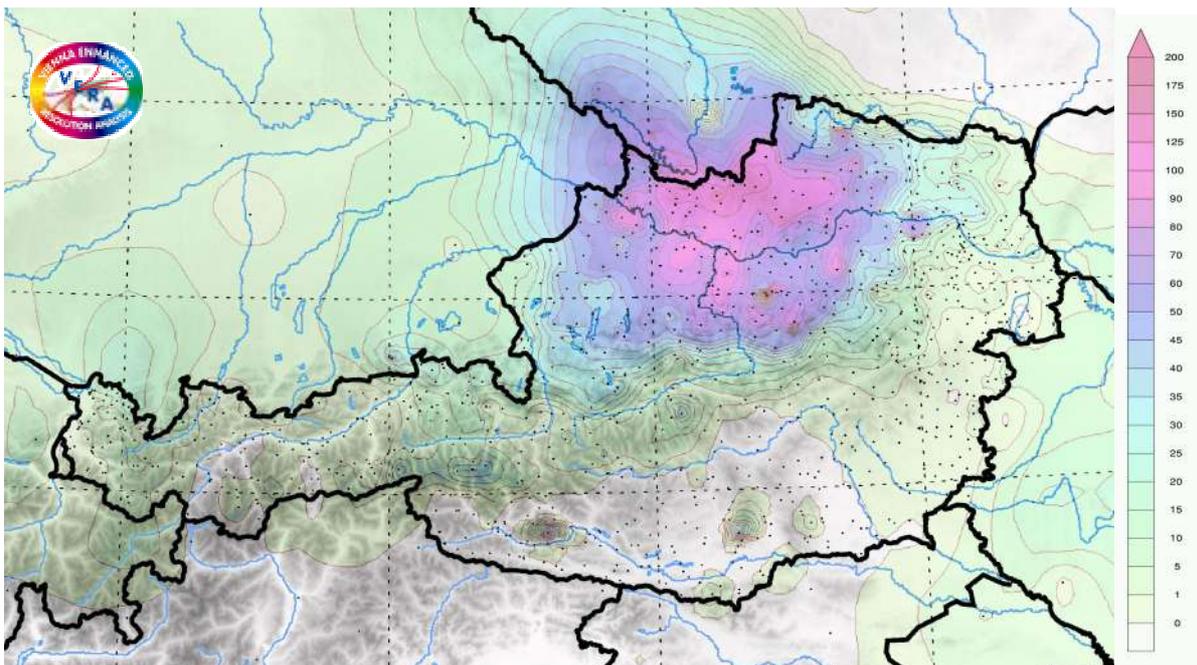


Abb. 13-6: Niederschlagsverteilung für den 7. August 2002 (7.8.2002 06UTC bis 8.8.2002 06UTC) mit VERA, Minimierung der ersten und zweiten Ableitung, Gitterauflösung 4km.

Am 7. August 2002 treten die Niederschläge nördlich der Alpen auf, während südlich des Alpenhauptkammes weite Gebiete niederschlagsfrei bleiben, nur einige Schauerzellen in Kärnten sorgen hier für Niederschlag. Auch anhand des Inntals sieht man sehr schön, wie durch die hohe Gitterauflösung auch kleinräumige Strukturen in einem Tal wiedergegeben werden können.

11. August 2002

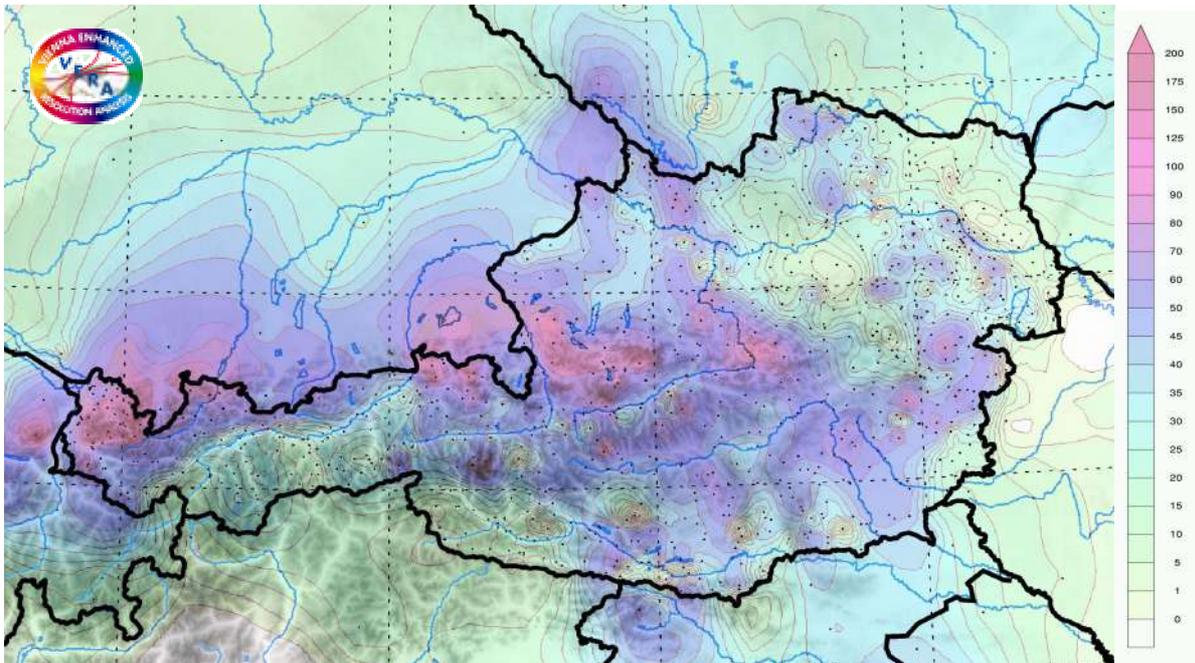


Abb. 13-7: Niederschlagsverteilung für den 11. August 2002 (11.8.2002 06UTC bis 12.8.2002 06UTC), analysiert mit VERA, Minimierung der 1. und 2. Ableitung, 4km Gitter

Der 11. August als erster Tag der zweiten Starkniederschlagsperiode ist durch starke konvektive Niederschläge geprägt, was sich in der zellularen Struktur des Niederschlagsfeldes zeigt. Die Maxima entlang des Alpennordrandes sind durch die Anströmung des Gebirges zu erklären, außerdem zeigen sich an der Lee-Seite der großen Alpentäler (Inn, Salzach, Enns) lokale Minima in der Niederschlagsverteilung.

12. August 2002

Am 12. August 2002 liegt das Niederschlagszentrum wieder über Ober- und Niederösterreich, wobei durch das abziehende Tief die absoluten Maxima nicht mehr in Österreich sondern in Tschechien zu finden sind.

Südlich der Alpen sind die Niederschläge an diesem Tag wieder deutlich geringer und bis auf wenige Ausnahmen nicht mehr so deutlich konvektiv bestimmt wie am Vortag.

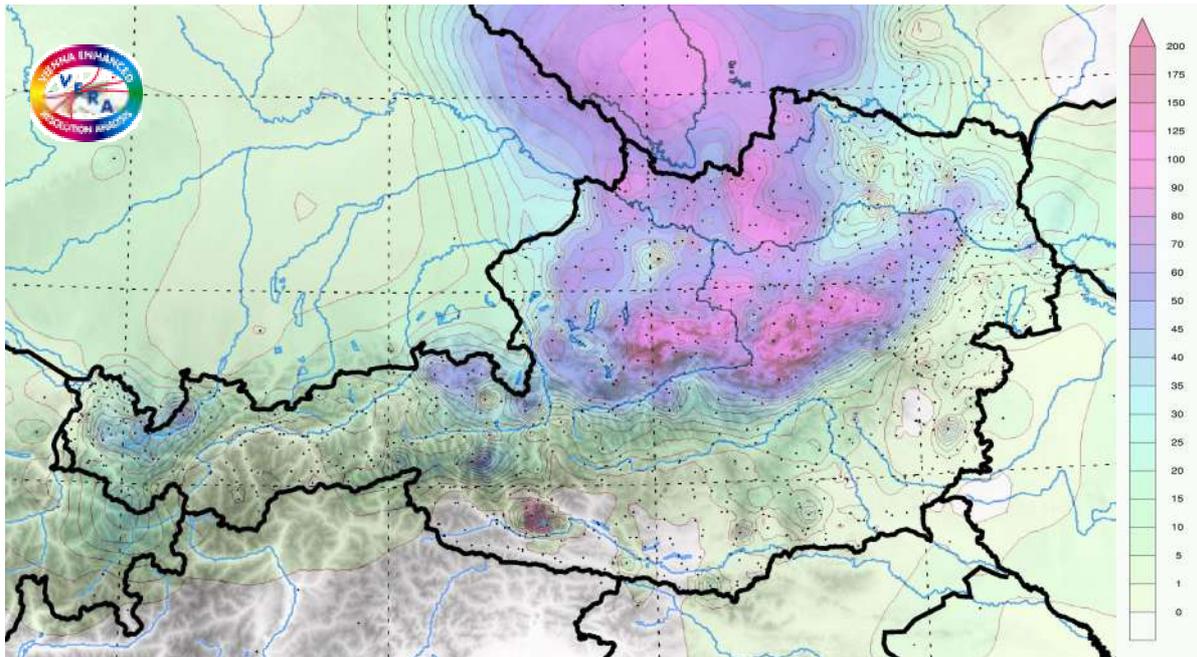


Abb. 13-8: Niederschlagsverteilung für den 12. August 2002 (12.8.2002 06UTC bis 13.8.2002 06UTC), analysiert mit VERA, Minimierung der 1. und 2. Ableitung, 4km Gitter.

13-4.3 Kriging-Analysen einzelner Tage

Für den angestrebten Vergleich von VERA mit einem GIS-basierten Standardanalyseverfahren ist Ordinary Kriging ausgewählt worden. Dieses Verfahren wird, wie in Abschnitt 13-3.4 diskutiert, beispielsweise in Creutin und Obled, 1982, für die Interpolation von Niederschlagsfeldern empfohlen. Versuche mit ähnlichen Verfahren, wie z.B. simple Kriging (Vorgabe lokaler Mittelwerte) oder Universal Kriging (Berücksichtigung lokaler Trends ohne zusätzliches Wissen) führten zu keiner Verbesserung und im Einzelfall sogar zu deutlichen Verschlechterung der Ergebnisse. Einfachere Verfahren, wie inverse distance weighting mit verschiedenen Gewichtsmomenten zeigten sich robust, aber systematisch schlechter als Ordinary Kriging. Eine spektrale Analyse der vorliegenden Niederschlagsdaten zeigte, dass ein sphärisches Variogrammmodell zur Berücksichtigung der Korrelationsstruktur mit einem schwachen nugget-Effekt (1 mm/d) in der Kriging-Analyse der hier betrachteten Fälle am besten geeignet ist. Gezeigte Untersuchungen wurden mit dem frei erhältlichen Software-Paket gstat (Pebesma und Wesseling, 1998) durchgeführt. Im Folgenden sind nun analog zu den VERA-Graphiken aus Kap. 13-4.2 die Ergebnisse mittels Kriging für die vier untersuchten Tage dargestellt. Es sind jeweils die Felder abgebildet, die mittels Analyse mit allen in Österreich verfügbaren Stationen berechnet worden sind. Die Gitterdistanz beträgt 1km, die schwarzen Linien bezeichnen Flusseinzugsgebiete.

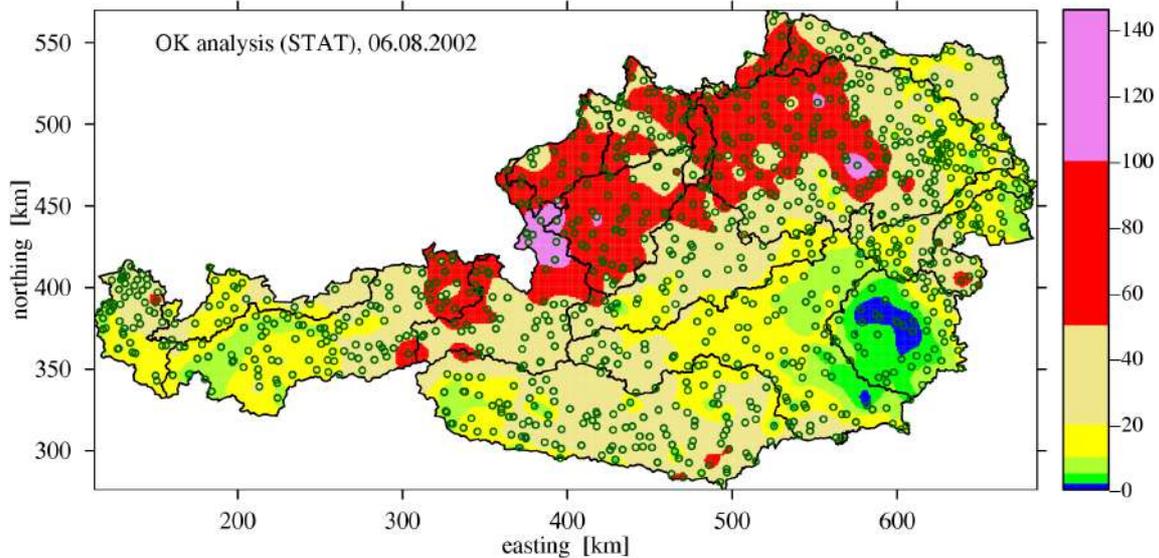


Abb. 13-9: Niederschlagsanalyse mit Kriging für den 6.8.2002. Schwarz sind die Bundesgrenze und die Grenzen größerer Einzugsgebiete von Flüssen angedeutet. Kleine Kreise zeigen die verwendeten Stationen. Die Einheiten sind mm/d.

Für den 6. August zeigen sich im Vergleich mit Abb. 13-3 sehr große Übereinstimmungen. Auch für den 7. August ist die Übereinstimmung von VERA und Kriging sehr hoch. Die niederschlagsfreien Bereiche in Kärnten mit den eingelagerten Schauerzellen werden ebenso gleich dargestellt wie die Maxima in Ober- und Niederösterreich. Nur im Oberinntal ergibt sich eine kleine Abweichung, hier zeigt VERA keinen Niederschlag, während bei Kriging geringe Mengen

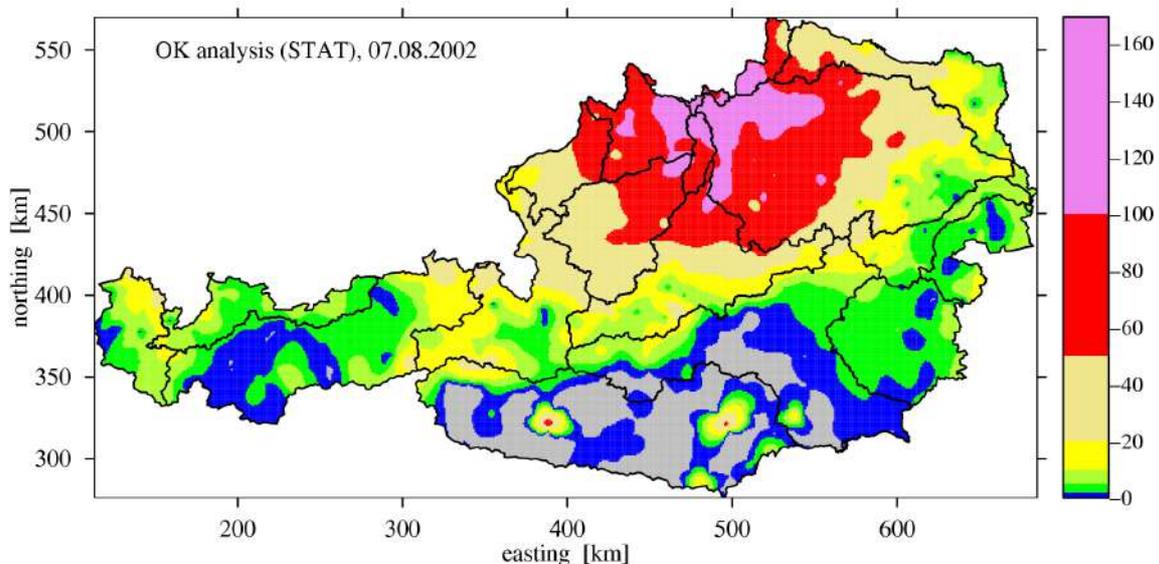


Abb. 13-10: Wie Abb. 13-9, aber für den 7.8.2002.

dargestellt werden. Auch das stärker durch konvektive und daher zellulare Niederschläge geprägte Niederschlagsbild am 11. August zeigt hier für die beiden Analyseverfahren große Ähnlichkeiten. Vergleichsbild hierfür ist Abb. 13-7.

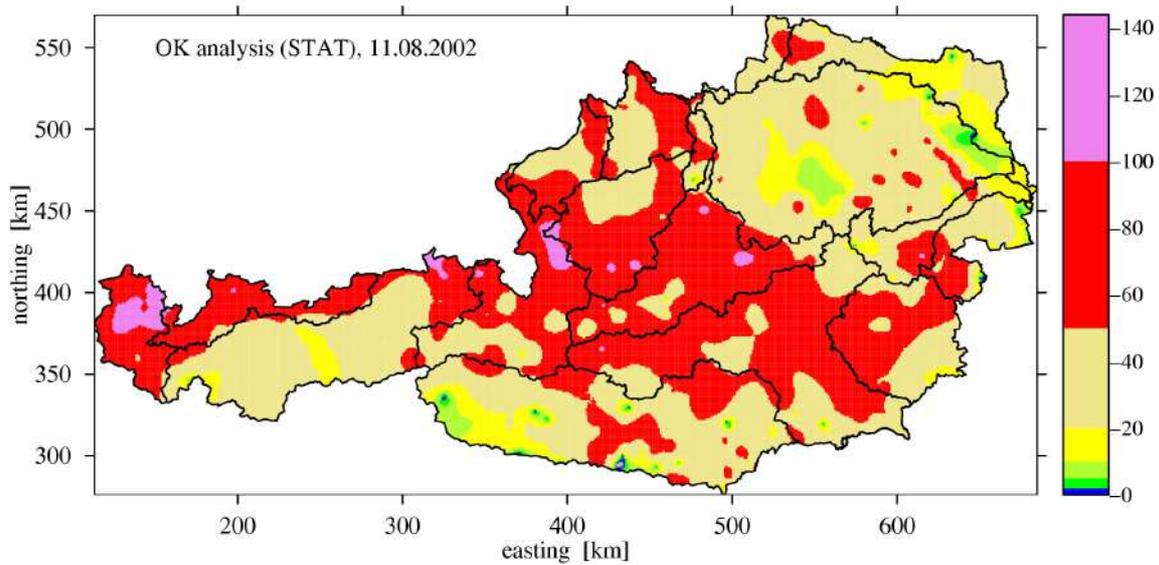


Abb. 13-11: Wie Abb. 13-9, aber für den 11.8.2002.

Auch für den letzten der vier verglichenen Tage ergeben sich keine markanten Abweichungen. Allerdings fällt in den Gebieten mit geringem Niederschlag wieder auf, dass in der VERA-Analyse (Abb. 13-8) größere niederschlagsfreie Gebiete aufscheinen, als dies bei Kriging der Fall ist.

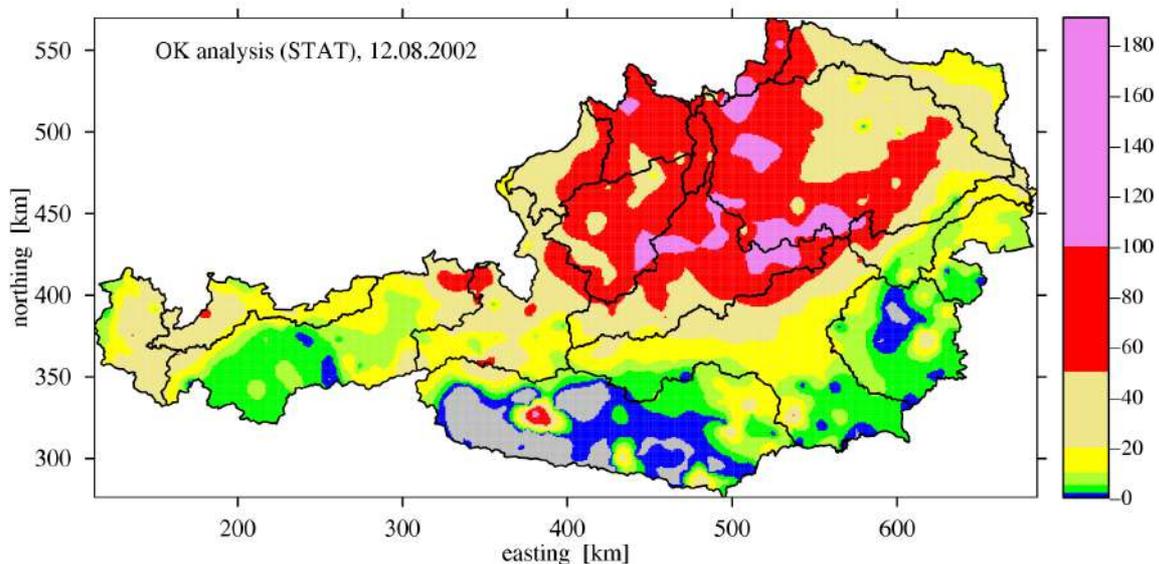


Abb. 13-12: Wie Abb. 13-9, aber für den 12.8.2002.

13-4.4 Implementierung von Zusatzinformation und Downscaling

Bei Verwendung aller Stationsdaten ist eine hohe effektive Auflösung einer Niederschlagsanalyse zu erreichen. In einer Echtzeit-Analyse des Niederschlages stehen die HZB Stationen nicht zur Verfügung. Daher wird hier anhand der während des Hochwassers in quasi Echtzeit grundsätzlich verfügbaren (etwa 116) teil-automatischen TAWES-Stationen diskutiert, welchen Nutzen das Einbringen zusätzlicher Information auf die Analyse täglicher Niederschläge haben kann. Vielfach als nutzbringend diskutierte Zusatzinformation sind die

Höhe und Neigung der Orographie bzw. Modellinformation (hier wird das in Österreich operationelle ALADIN verwendet). Des Weiteren stehen für das Augusthochwasser Radardaten zur Verfügung, welche auf einem kartesischen Gitter mit hoher räumlicher (1 km) und zeitlicher (5 min) Auflösung bereitgestellt wurden. Diese Zusatzinformation wird durch Universal Kriging mit externer Drift berücksichtigt.

Abb. 13-13 zeigt beispielhaft für den 12. August die ordinary Kriging Analyse bei ausschließlicher Verwendung der TAWES-Information. Im Vergleich mit der Analyse bei Verwendung aller Stationsinformation (Abb. 13-9 bzw. 13-12) zeigt sich, dass großräumige Strukturen gut wiedergegeben werden, aber feine Strukturen nicht (Bias -4%, erklärte Varianz 87%, Varianzverhältnis 0.9). In Abb. 13-14 sind Analysen gezeigt, bei der die Geländehöhe und die operationelle Vorhersage als Zusatzinformation verwendet wurden. Es zeigt sich, dass die Feldvariabilität erhöht wird, aber sich in betrachteten Maßzahlen keine Verbesserung der Analyse zeigt. Dies ist bei der Geländehöhe und bei der auch getesteten Geländeneigung nicht verwunderlich, da hier Kondensationsraten und Tropfenfallzeiten, die eine Translation des Niederschlags relativ zum Gelände verursachen, nicht berücksichtigt wurden (siehe eine Diskussion in Smith, 2003).

Als Modellinformation steht die operationelle Vorhersage des operationellen Wettervorhersagemodells ALADIN der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG) zur Verfügung. Untersuchungen in STARTCLIM, Sub-Projekt 14, ergaben, dass die

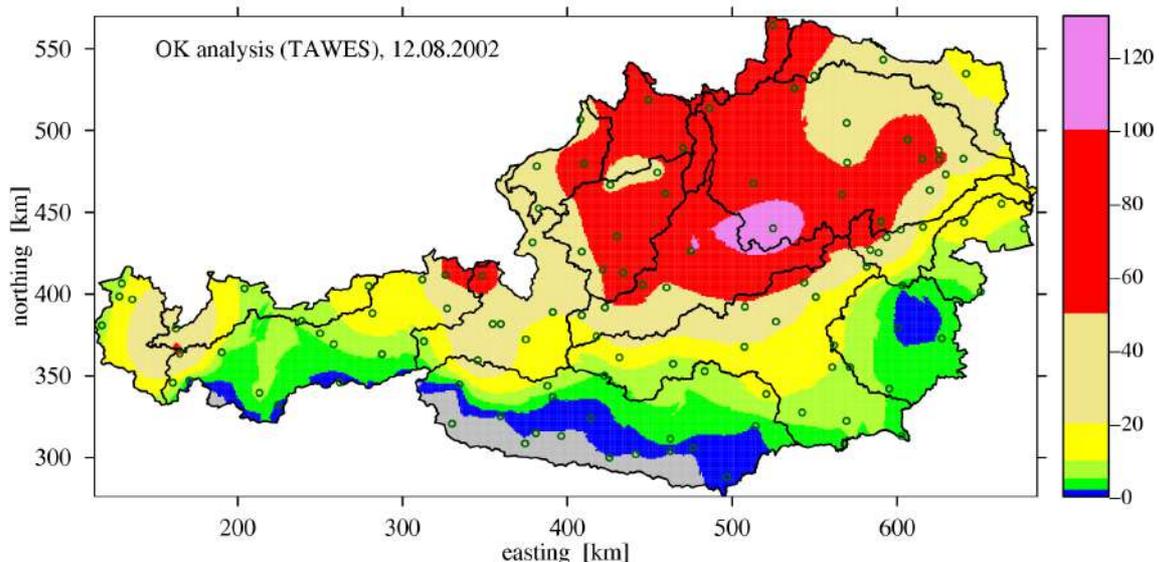


Abb. 13-13: Analyse mit den TAWES-Daten. Die Kreise zeigen die Position der TAWES-Stationen an.

österreichweite Vorhersage mit ALADIN am besten für den 12. August war. ALADIN mit einer numerischen Auflösung von etwa 10 km erklärt für diesen Termin etwa 45 % der Varianz und nach Aggregation auf 40 km Gitter etwa 60 %. Dies jeweils über 20 % mehr als für die übrigen betrachteten Termine. Daher wird hier nur der 12. betrachtet. Es zeigt sich auch hier, dass die Zusatzinformation die Variabilität erhöht, aber die Performance der Analyse nicht verbessert wird.

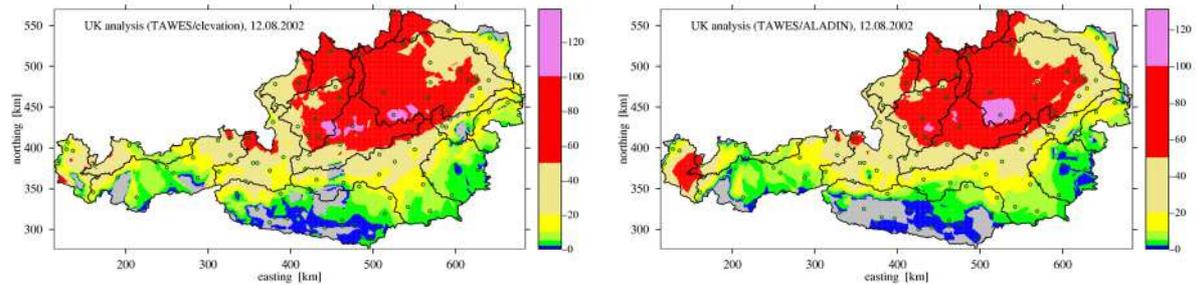


Abb. 13-14: Analyse mit den TAWES-Daten und Zusatzinformation. Links ist eine Geländeinformation (die Höhe) und rechts die operationelle Modellvorhersage von ALADIN berücksichtigt worden.

Die Abb. 13-15 zeigt den akkumulierten Niederschlag für den 12. August, wie er aus den Radardaten gegeben ist. Die Einzelfelder mit 5 min zeitlicher Auflösung werden leicht behandelt. Hierbei wird der Median einer Umgebung in Raum, Zeit und max. Säulenintensität gegeben. Dieser Vorgang führt zu einer geringen Glättung der Niederschlagsfelder. Eine Akkumulation führt zu dem dargestellten Feld links und zeigt gegenüber den Stationsanalysen eine deutliche Unterschätzung der Niederschlagsintensitäten. In einem zweiten Schritt wurden die TAWES-Daten, die in 10 min-Auflösung zur Verfügung stehen, zur Kalibrierung der Radardaten in 10min Schritten verwendet. Eine Akkumulation dieser Felder zeigt die Abb. 13-15 rechts. In Starkniederschlagsgebieten zeigt das kalibrierte Radarfeld höhere Intensitäten als die Analysen. In einigen Gebieten (Osttirol, südliches Tirol und Vorarlberg) sieht das Radarnetz keinen Niederschlag und kann dadurch auch nicht kalibriert werden. Auffallend sind Ringstrukturen um das südöstliche Radar (Zirbitzkogel), die durch die Projektion der Radarinformation auf ein kartesisches Gitter durch den Datenprovider verursacht sind. Diese Strukturen sind systematisch und absolut besonders ausgeprägt bei starken Niederschlägen. Beim nord-westlichen Radar (Feldkirch) sind diese Strukturen ebenfalls vorhanden, aber durch die gewählte Farbskala nicht sichtbar.

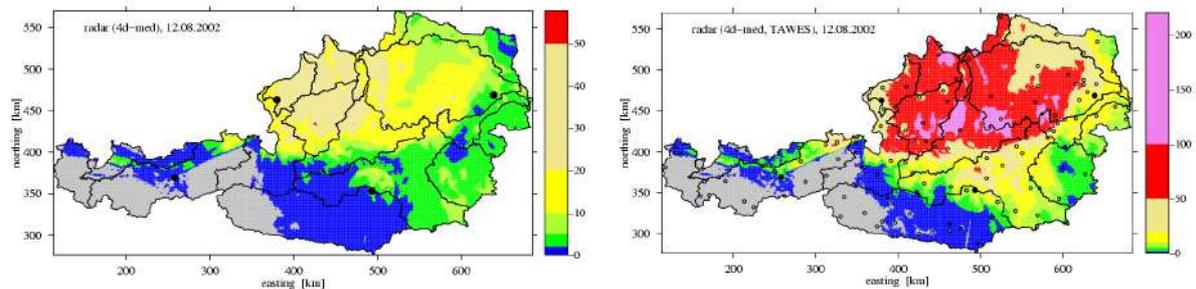


Abb. 13-15: Das Niederschlagsfeld beobachtet mit den Radar-Stationen in Österreich (links) und kalibriert mit den TAWES-Daten (rechts). Die dicken Punkte zeigen die Position der Radarstationen. Die kleinen Kreise zeigen die Positionen der TAWES-Stationen.

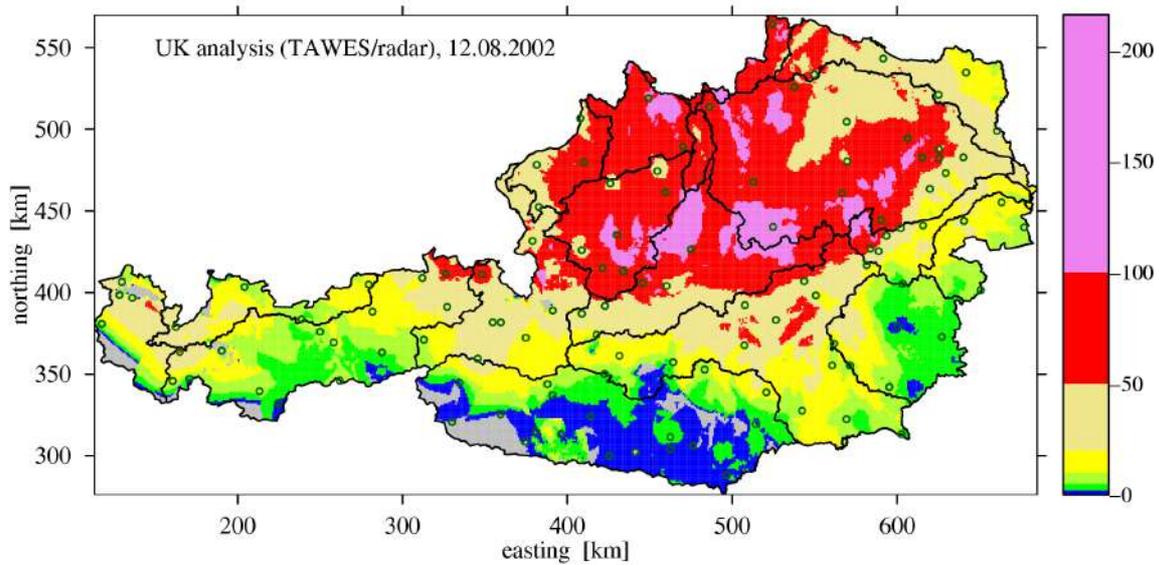


Abb. 13-16: Analyse der TAWES-Daten mit der Zusatzinformation der kalibrierten Radardaten.

Abb. 13-16 zeigt eine Analyse der TAWES-Daten bei Berücksichtigung der kalibrierten Radarinformation. Der visuelle Eindruck ist positiv. Die Variabilität ist gegenüber der Analyse auf reiner TAWES Basis erhöht. Die Strukturen entlang der nördlichen Voralpen erscheinen realistisch und eine genaue Inspektion der Analyse zeigt, dass sie mit den HZB Daten gut übereinstimmen. Hier muss man daran erinnern, dass die HZB Analyse eine beste Schätzung mittels Kriging ist und entsprechend ist eine Evaluierung gegen die HZB Analyse kritisch zu bewerten. Diese Evaluierung zeigt jedenfalls keine Verbesserung der Analyse durch Radarinformation. Sicherlich tragen die Radardaten gute Information, aber die Berücksichtigung ist z.B. durch Bayesian Kriging zu verbessern.

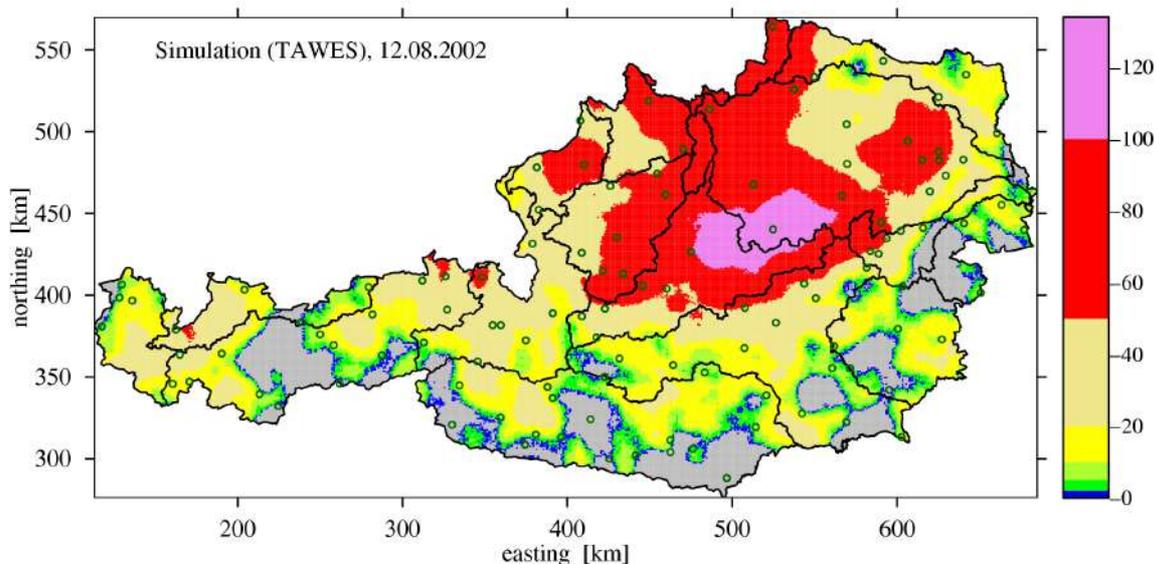


Abb. 13-17: Stochastische Simulation eines Niederschlagsfeldes, konditioniert mit den TAWES-Daten.

In Abb. 13-17 ist eine Realisierung eines Niederschlagsfeldes mittels einfacher Gaußscher Simulation konditioniert mit den TAWES-Daten gezeigt. Dieses Feld zeigt die Freiheit, die eine Realisierung des Niederschlags hat. Die gezeigten Analysen sind beste Schätzungen und minimieren die Fehlervarianz. Die Varianz der wahren Felder wird durch die Analyse grundsätzlich unterschätzt. Eine Mittelung über viele Simulationen ergibt eine Analyse. Somit kann die Simulation vieler Realisierungen eine Möglichkeit sein, viele Niederschlagsfelder, beispielsweise für eine Ensemblevorhersage in der Hydrologie, zu erhalten. Die hier verwendete Simulationsmethode ist allerdings sub-optimal, da die nicht-negativ Definitheit des Niederschlags nicht gewährleistet wird. Alternative Methoden z.B. nach Ahrens (2003), die auf stündlichen Zeitskalen gut arbeiten, müssen auf täglicher Zeitskala weiter getestet und die notwendigen Parameter bestimmt werden. Hier ist weiterer Forschungsbedarf notwendig.

13-4.5 Vergleich der Analysegenauigkeit zwischen VERA und Kriging

Bei der Analyse der Niederschlagsfelder mit Kriging ist bereits ein Vergleich zwischen Kriging und VERA durchgeführt worden, wobei sich keine großen Unterschiede gezeigt haben. Der Vergleich soll jedoch auch objektiv durchgeführt werden. Die Analysegenauigkeit ist mit einem statistischen Test bewertet worden. Im vorliegenden Fall ist eine so genannte cross validation durchgeführt worden. Dabei wird zuerst die Analyse mit weniger Messwerten durchgeführt, als für den Termin vorhanden sind. Danach wird an den Stellen, an denen sich nicht verwendete Messwerte befinden, der berechnete Wert der Analyse bestimmt, und dieser mit dem Messwert verglichen. Dabei ist jedoch zu beachten, dass die Analysewerte jeweils nur an den Gitterpunkten bekannt sind, und damit für den Vergleich mit den Messstationen kleine räumliche Differenzen auftreten, die bei den geringen Gitterdistanzen jedoch keine große Auswirkung haben sollten. Die Differenz zwischen Messwert und Analysewert (am nächstliegenden Gitterpunkt) ist ein Maß für die Analysegenauigkeit.

Für den Vergleich ist als statistisches Maß die Efficiency herangezogen worden. Sie ist definiert als

$$Efficiency = 1 - \frac{mse}{\sigma^2} \quad (4.1)$$

Der mse ist der "mean squared error", also der mittlere quadratische Fehler zwischen Messwerten und Gitterpunktwerten der Analyse. σ^2 ist die Streuung der Messwerte.

Die Efficiency kann Werte zwischen minus unendlich und +1 annehmen. +1 bedeutet, dass das gesamte Signal, das durch die Messwerte gegeben ist, durch die Analyse erklärt wird, 0 bedeutet, dass der Analysefehler der Streuung der Messwerte entspricht, negative Werte weisen darauf hin, dass das analysierte Feld keine Übereinstimmung mit der gemessenen Verteilung aufweist.

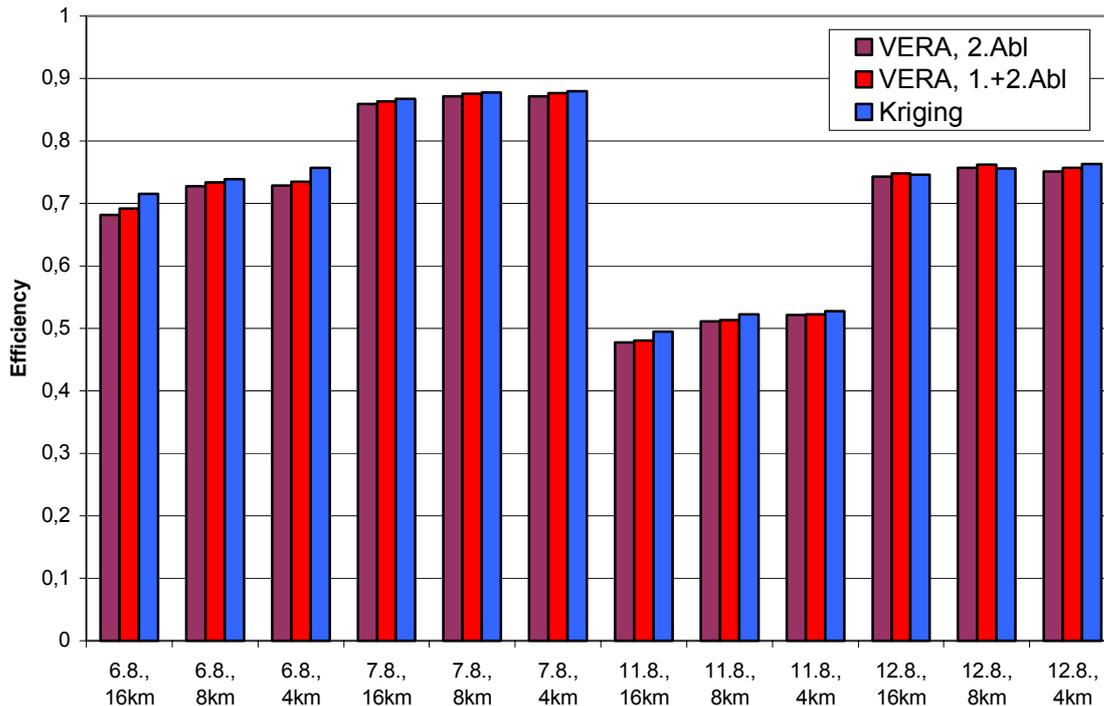


Abb. 13-18: Efficiency für die vier untersuchten Tage

In Abb. 13-18 ist die Efficiency für die 4 untersuchten Termine dargestellt. Zu sehen sind je drei Säulen für jeden Termin, wobei jede Säule eine Gitterdistanz repräsentiert. In den einzelnen Säulen werden jeweils VERA nur mit der 2. Ableitung, VERA mit 1. und 2. Ableitung und Kriging dargestellt.

Auf den ersten Blick fällt auf, dass die Efficiency unabhängig vom Analyseverfahren für die 4 Tage sehr unterschiedliche Ergebnisse aufweist, so liegt sie am 11.8. bei nur 0,5 während sie am 7.8. bei über 0,8 liegt. Nachdem an allen Tagen die Stationsverteilung sehr ähnlich und das Analysegebiet für die vier Tage identisch ist, ist die geringe Efficiency am 11.8. am ehesten dadurch zu erklären, dass an diesem Tag vermehrt zu konvektiven Niederschlägen gekommen ist, deren zelluläre Struktur bei der Analyse schlechter erfasst werden konnte.

Weiters sieht man, dass bei VERA die Berücksichtigung der ersten Ableitungen zu einer geringfügigen Verbesserung des Ergebnisses führt, wobei die Verbesserung am 11.8. am geringsten ausfällt. Diese Beobachtung weist wieder darauf hin, dass eine Glättung des Feldes durch die erste Ableitung bei konvektiven Niederschlägen nicht so sinnvoll ist.

Die Verfeinerung des Gitters von 16km auf 8km bzw. 4km hat auf die Güte des Ergebnisses keinen großen Einfluss. Dies ist für den operationellen Betrieb, wo man auf Grund des deutlich geringeren Rechenaufwandes das gröbere Gitter wählen wird, ein viel versprechendes Ergebnis.

Schließlich fällt noch auf, dass Kriging für drei der vier Tage eine etwas höhere Efficiency aufweist.

Für VERA wurde als weitere Überprüfung der Analysegenauigkeit eine Untersuchung durchgeführt, inwieweit die Maxima der Messstationen in der Analyse erhalten bleiben. Zu diesem Zweck sind Scatterplots erstellt worden. Darin sieht man für die einzelnen Stationen, wie weit der Analysewert am nächstliegenden Gitterpunkt vom tatsächlichen Messwert abweicht. Wiederum ist hier bei einer Gitterdistanz von 4km die geographische Abweichung

zwischen Stationskoordinaten und nächstliegendem Gitterpunkt gering, und beträgt höchstens $(4 \cdot \sqrt{2})/2$.

Punkte, die im Diagramm auf der 45°-Gerade liegen, zeigen an, dass Analysewert und Messwert übereinstimmen. Punkte, die über dieser Gerade liegen, zeigen an, dass bei der Analyse der Messwert geringer als der analysierte Wert am nächsten Gitterpunkt ist. Wie auch für die Efficiency-Betrachtungen wurden die VERA-Analysen, die nur mit GTS-Stationen erstellt worden sind, für diese Untersuchung herangezogen.

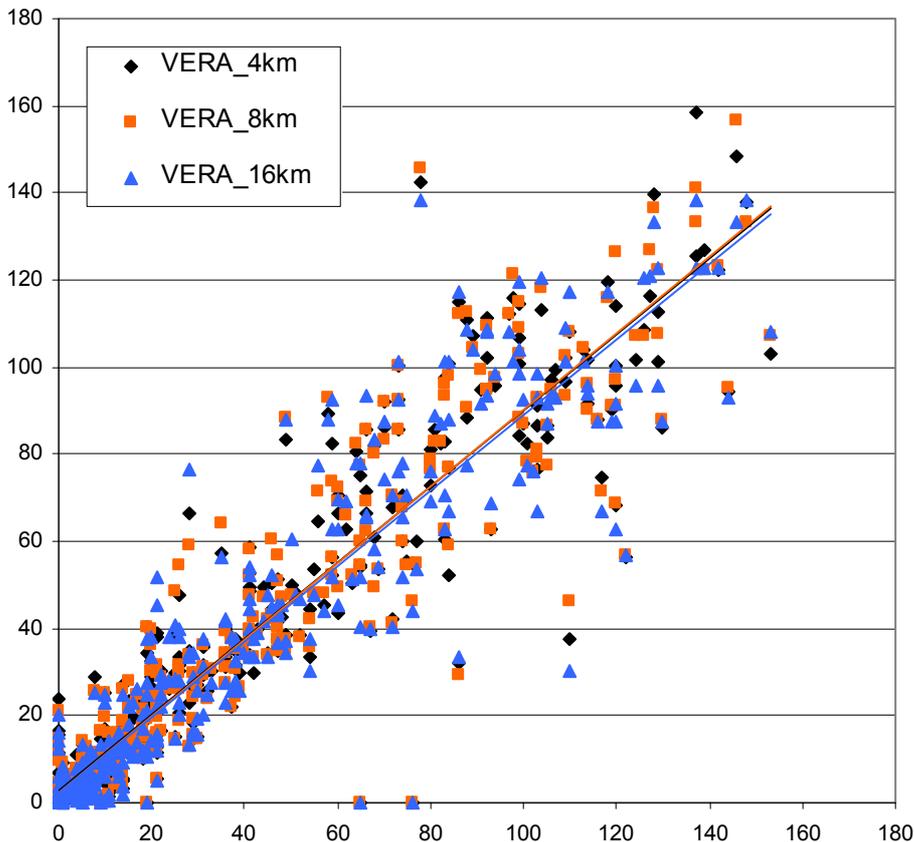


Abb. 13-19: Scatterplot für ausgewählte HZB-Stationen für den 7.8.2002. Die Messwerte sind auf der Abszisse aufgetragen, die interpolierten Werte auf der Ordinate, die Einheit der Achsen ist jeweils [mm].

In Abb. 13-19 ist der Scatterplot für den 7. August 2002 dargestellt. Um die Übersichtlichkeit zu erhalten, ist nur etwa die Hälfte der untersuchten HZB-Stationen dargestellt. Die unterschiedlichen Farben repräsentieren die drei Gitterdistanzen 16km, 8km und 4km. Die lineare Trendlinie aller drei Gitterauflösungen ist praktisch identisch, was wiederum dafür spricht, dass die Verbesserung durch die höhere Auflösung eher gering ausfällt.

Die Neigung der Trendlinien, die geringer als 45° ist, zeigt an, dass es durch die Analyse zu einer Glättung kommt.

Die Ursache für die allerdings geringe Dämpfung auch der Maxima ist sicher in der großflächigen Struktur des Niederschlagsfeldes an diesem Tag zu suchen (vgl. Abb.6), da es im Bereich von Österreich ein deutlich ausgeprägtes Maximum gibt, welches durch viele Stationswerte belegt ist. Hierbei ist die Dämpfung durch die Analyse natürlich wesentlich geringer als bei Extremwerten, die nur durch eine oder zwei Stationen belegt werden, wie es bei konvektivem Niederschlag der Fall ist.

13-5 operationeller Betrieb

13-5.1 Stationsuntermengen

Für den operationellen Betrieb stehen üblicherweise weniger Messwerte zu Verfügung, als dies für die nachträgliche Analyse einer Wetterlage der Fall ist. So sind zum Beispiel die Daten der HZB-Stationen operationell nicht verfügbar, und auch bei den SYNOP- und TAWES-Stationen kann es hin und wieder zu Ausfällen kommen. Deswegen ist für die Frage, ob ein Analyseverfahren für den operationellen Betrieb geeignet ist, die Untersuchung mit Stationsuntermengen von großer Bedeutung.

Der Versuch wurde in zwei Schritten durchgeführt. Erstens wurden die Analysen für die einzelnen Tage jeweils mit allen Stationen, nur mit GTS-Stationen und mit einer kleinen Auswahl von GTS-Stationen durchgeführt. Diese Ergebnisse sind schon in Kap. 13-4.2 gezeigt worden. Zweitens ist für einen Tag ein Versuch durchgeführt worden, bei dem aus der Menge der HZB-Stationen jeweils eine Teilmenge für die Analyse und die restlichen Stationen für eine cross validation herangezogen worden ist. Es sind Analysen für 100 Teilmengen berechnet worden, die Verteilung, die sich daraus ergibt, ist in Abb. 13-20 zu sehen.

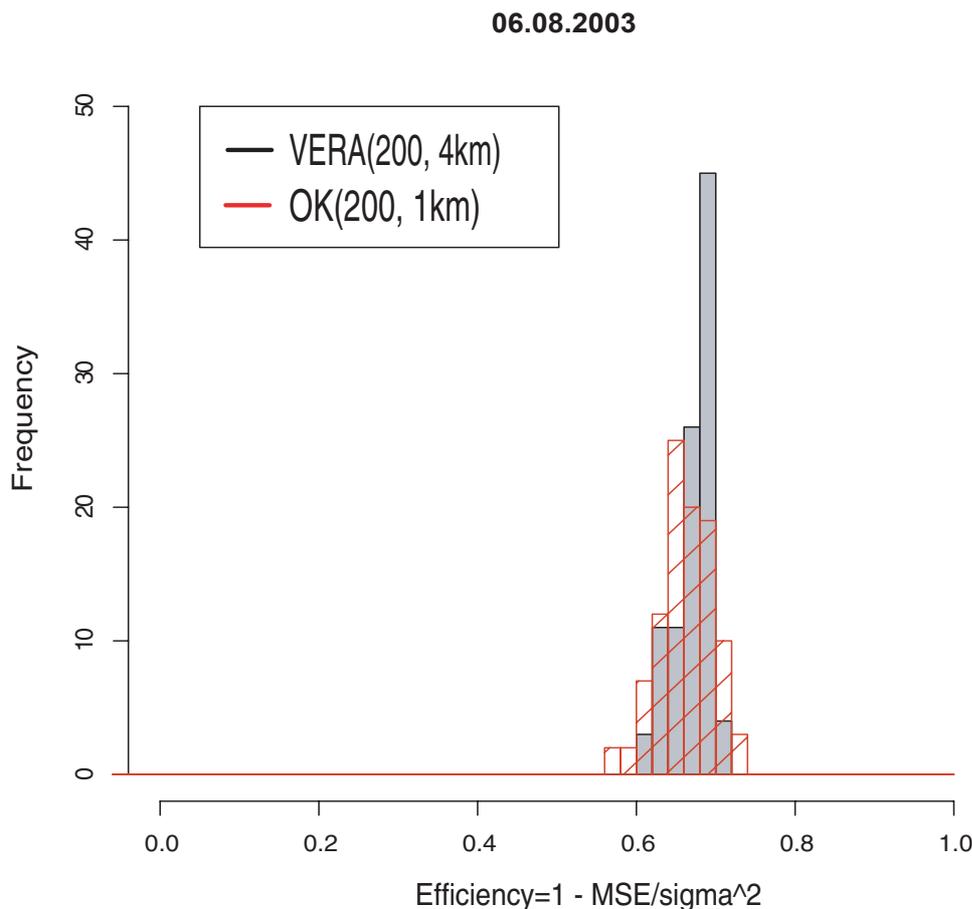


Abb. 13-20: Efficiency für je 100 VERA- und Kriging-Analysen mit jeweils 200 Stationsmeldungen in Österreich.

Als statistisches Maß ist wieder die Efficiency eingetragen worden. An der Breite der Verteilung erkennt man die Empfindlichkeit des Analyseverfahrens auf die Stationsverteilung.

Sind die Ergebnisse breit auf der Efficiency-Achse verteilt, ist das ein Hinweis darauf, dass das Analyseverfahren empfindlich auf die Lage der Stationen im zu analysierenden Gebiet reagiert. Für ein Verfahren, bei der die Stationsverteilung keinerlei Einfluss auf die Genauigkeit des Ergebnisses hat, wäre nur eine Säule mit 100 Werten zu sehen.

Tatsächlich ist dies natürlich nicht der Fall, es zeigt sich aber, dass VERA wesentlich unempfindlicher auf die Stationsverteilung reagiert als Kriging. Dies ist ein für den operationellen Betrieb natürlich sehr viel versprechendes Ergebnis.

13-5.2 angewandte Qualitätskontrolle

Dass die in Kapitel 13-3.3 vorgestellte Methode in sich robust ist, zeigt folgender Versuch. Für die Stationen, die am 6. August 2002 Niederschlag gemeldet haben, ist das Fehlerkorrekturprogramm sowohl mit den tatsächlich gemessenen Niederschlagswerten als auch mit bewusst falsch gewählten Werten durchgeführt worden. Das Ergebnis ist in Abb. 13-21 dargestellt.

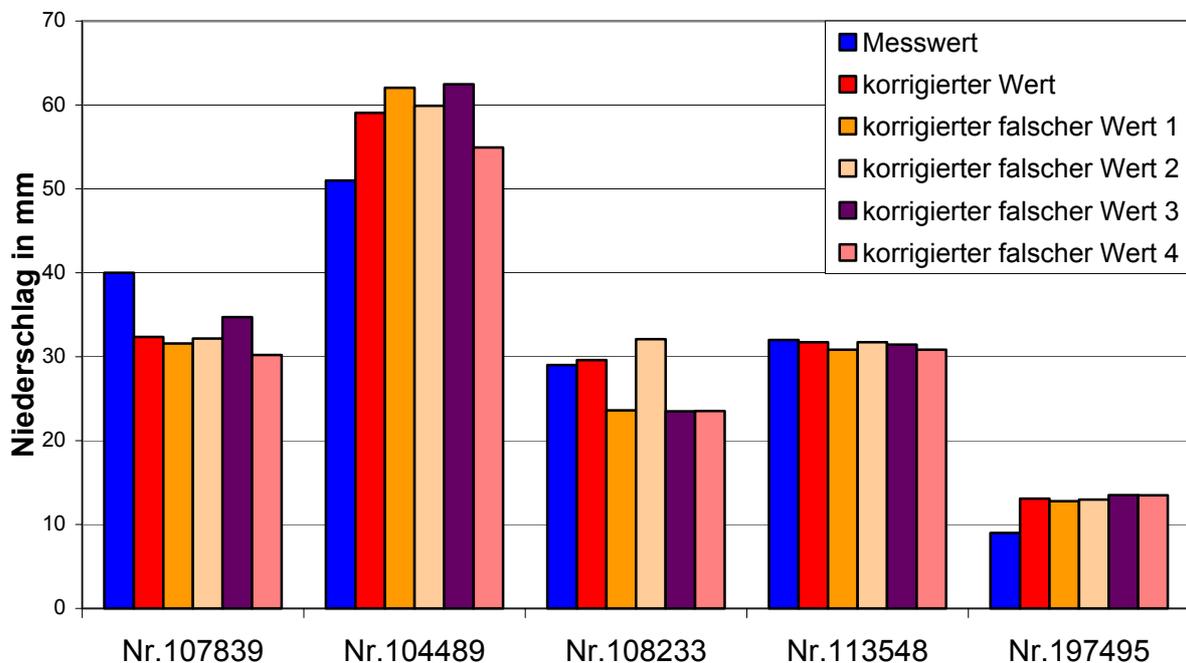


Abb. 13-21: Fehlerkorrektur für fünf ausgewählte HZB-Stationen

Für die fünf hier ausgewählten Stationen zeigt sich, dass der korrigierte Wert, den das Korrekturprogramm vorschlägt, immer annähernd gleich groß ist, unabhängig davon, ob der originale Messwert (blau) korrigiert wird, oder ein beliebiger fiktiver Messwert (nicht dargestellt) für die Station gewählt worden ist. Die Schwankungen der korrigierten Werte betragen unter 10%, nur für Station 108233 beträgt die Abweichung der korrigierten Werte untereinander bis zu 40%. Dies ist an sich ein sehr positives Ergebnis, es gibt jedoch noch ungelöste Probleme bei der Korrektur von Niederschlagsmessungen, die einiges an weiterer Forschungsarbeit nötig machen.

Verwendet man als Eingangsparameter für die Qualitätskontrolle nämlich für einen konkreten Termin nur die GTS-Stationen, so ergibt sich folgendes Bild.

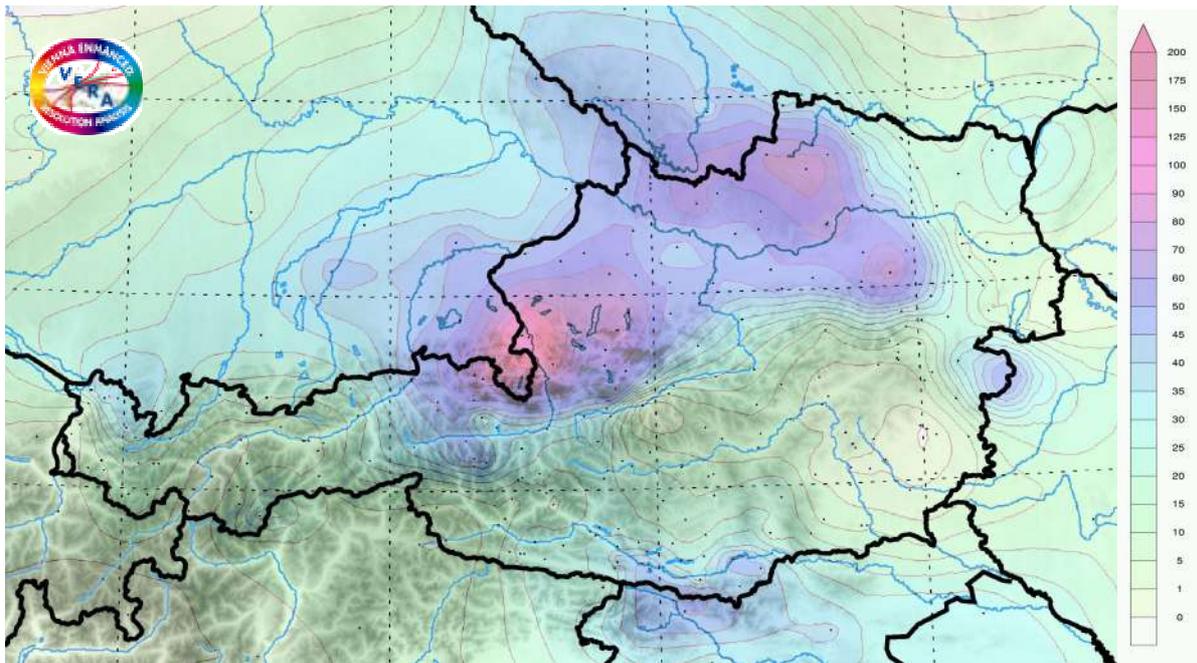


Abb. 13-22: VERA-Analyse für den 6. August 2002 mit korrigierten Stationswerten.

Die Qualitätskontrolle ändert die Messwerte an den einzelnen Stationen am 6.8.2002 um maximal +71mm bis -47mm. Der maximale Messwert für diese 24 Stunden liegt original bei 147mm und wird durch die Korrektur auf 130mm gedämpft. Eine Untersuchung dieser Analyse in Bezug auf die Efficiency zeigt, dass die Efficiency gegenüber den unkorrigierten Werten gesunken ist. Erst wenn die Qualitätskorrektur mit allen Stationen, also inklusive HZB-Stationen, durchgeführt wird, ist die VERA-Analyse mit diesen korrigierten Daten besser als mit den unkorrigierten Werten, wie Abb. 13-23 zeigt.

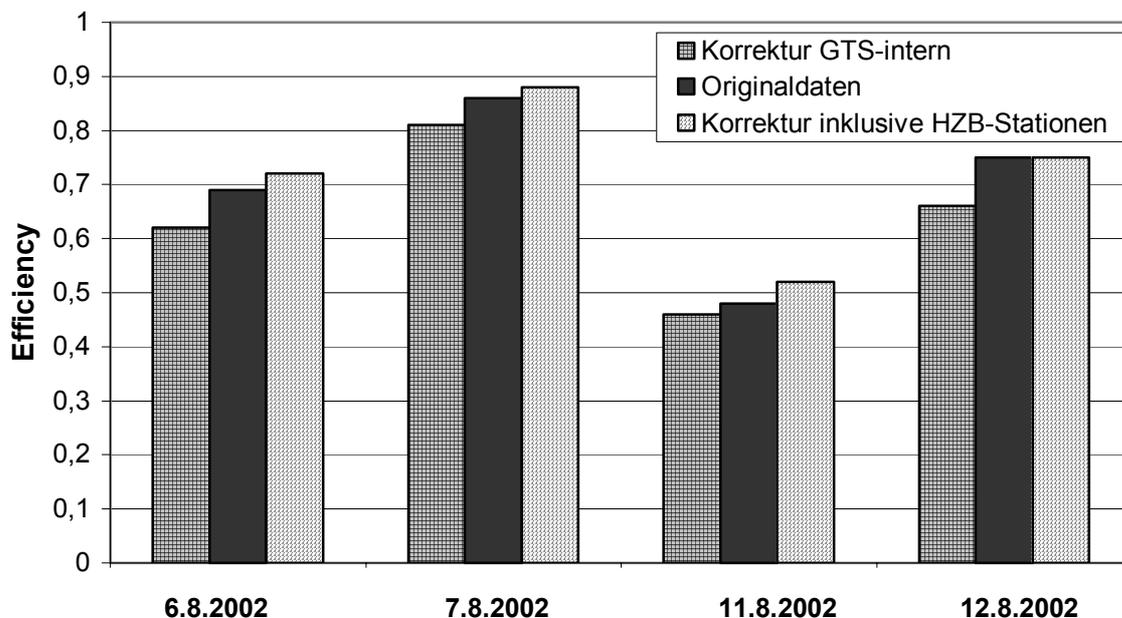


Abb. 13-23: VERA-Analysen mit korrigierten und unkorrigierten Messdatensätzen für die vier Termine

Obwohl hier noch weitere Untersuchungen nötig sind, ist die Ursache für dieses Phänomen wahrscheinlich in der Tatsache zu suchen, dass es durch die Qualitätskontrolle zu einer Glättung der Daten kommt, die bei ausschließlicher Verwendung der GTS-Daten kräftiger ausfällt als bei der Verwendung der zusätzlichen HZB-Daten, was sich auf die anschließende VERA-Analyse negativ auswirkt.

Um die bei der Fehlerkorrektur mit dem VERA-Kontrollmodul für die einzelnen Stationen bestimmten Korrekturen quantifizieren zu können, ist ein Vergleich mit Kriging durchgeführt worden, bei der die Kriging-Analyse jeweils unter Vernachlässigung eine Station gerechnet worden ist. Für diese eine Station ist anschließend eine cross validation durchgeführt worden. In Abb. 13-24 ist das Ergebnis für alle HZB-Stationen dargestellt. Die Abweichungen von -83,88mm bis +53,81mm geben darin an, wie sehr die Analysen die Messwerte der einzelnen Stationen über- bzw. unterschätzen.

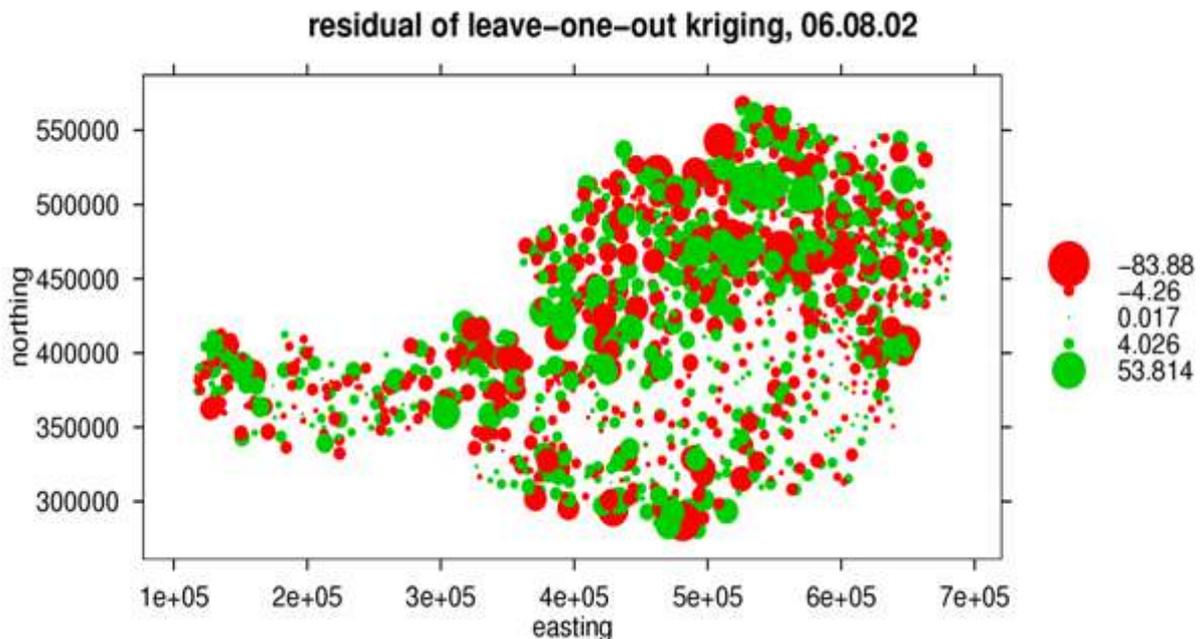


Abb. 13-24: Leave-one-out-Versuch mit anschließender cross-validation für die einzelnen Stationen, Analyse mit Kriging.

Der anschließende Vergleich mit den Korrekturvorschlägen der VERA-Qualitätskontrolle ergibt für einen Großteil der untersuchten Stationen eine gute Übereinstimmung. So beträgt der rms der Differenz zwischen VERA-Korrektur und Kriging-Korrektur für den 6.8.2002 7,5mm. Der rms für die Differenz zwischen Messwerten und VERA-korrigierten Werten beträgt 12 mm, zwischen Messwerten und Kriging-korrigierten Werten 13,5 mm. Dieser Unterschied von 1,5mm weist darauf hin, dass beim Kriging eine stärkere Glättung durchgeführt wird.

13-5.3 Möglichkeiten und Probleme des operationellen Betriebes

Für einige Parameter werden VERA-Analysen bereits seit einiger Zeit operationell gerechnet, sie sind im Internet unter www.alpenwetter.net abrufbar. Auch das Qualitätskontrollverfahren wird für einige Parameter operationell bereits eingesetzt, und es hat sich gezeigt, dass die real-time-Analysen problemlos erstellt werden können, sowohl was die Rechenkapazität betrifft, als auch in Bezug auf die operationell vorhandene Anzahl an Stationsmeldungen.

Theoretisch besteht auch für den Niederschlag bereits die Möglichkeit, operationelle Analysen zu rechnen. Hier bestehen aber noch größere Probleme im Bereich der Qualitätskontrolle, außerdem liefern nur die TAWES-Stationen stündliche Werte, alle anderen Stationen setzen nur 3-stündige oder 6-stündige Niederschlagsmeldungen ab.

Und obwohl die Untersuchungen mit Stationsuntermengen zeigen, dass VERA sehr stabil gegenüber ungünstigen Stationsverteilungen ist, was sich im operationellen Betrieb natürlich positiv auswirkt, führt die Tatsache, dass nur etwa halb so viele Stationen stündliche Werte für den Niederschlag melden, wie das für den Druck oder die Temperatur der Fall ist, dazu, dass die Niederschlagsanalysen tendenziell ungenauer sind als die Analysen anderer Parameter.

Falls operationelle VERA-Analysen als Eingangsdaten für hydrologische Modelle verwendet werden sollen, wäre also eine Implementierung von Fingerprints in die Analyse nötig, um die gewünschte Genauigkeit für die Eingangsdaten zu erhalten.

Ein Vorteil, den VERA gegenüber den GIS-basierten Standardanalyseverfahren aufweist, besteht darin, dass durch die operationelle Analyse mehrerer meteorologischer Parameter zwischen den einzelnen analysierten Feldern Plausibilitätstest durchgeführt werden können. Ein Beispiel dazu wäre eine Niederschlagsanalyse mit kräftigen Niederschlägen am Alpennordrand. Anhand der Druck- und Windanalyse kann schnell überprüft werden, ob es sich bei der Wetterlage um eine Nordstaulage handelt und damit das Niederschlagsmaximum am Alpennordrand plausibel ist.

Außerdem basiert die Analyse auf physikalischen Grundlagen, wie man speziell an Formel (3.7) sieht. Mit den dort beschriebenen kinematischen Größen eines Strömungsfeldes lässt sich für den Meteorologen leicht erklären, warum in manchen Fällen die Minimierung der zweiten Ableitung alleine ein besseres Ergebnis liefert, in anderen Fällen aber die Kombination von erster und zweiter Ableitung zu bevorzugen ist. Das sich die Methode auch auf anisotrope Strukturen wie zum Beispiel Fronten anwenden lässt, wird bei Tschannett (2003) gezeigt.

13-6 Ausblick und weiterer Forschungsbedarf

Im Laufe des Projektes hat sich gezeigt, dass die Niederschlagsanalysen mit VERA das Potential haben, sowohl für den operationellen Betrieb als auch für die Bereitstellung von Eingangsdaten für meteorologische und hydrologische Modelle verwendet zu werden.

Die Tatsache, dass die Analysen bereits ähnlich genaue Ergebnisse liefern, wie dies mit GIS-basierten Standardanalyseverfahren der Fall ist, lässt hier für die Weiterentwicklung einiges erwarten. Man darf ja nicht außer Acht lassen, dass das verwendete Kriging ein bereits ausgereiftes Produkt ist, welches unter Hydrologen schon seit längerem für Niederschlagsanalysen verwendet wird, während VERA in mancherlei Hinsicht erst im Entwicklungsstadium steht.

Für die weitere Entwicklung sind speziell zwei Stoßrichtungen weiter zu verfolgen. Einerseits gibt es bei der Datenkontrolle noch ein deutliches Verbesserungspotential. Die Entwicklungsarbeit, die darin investiert werden sollte, würde nicht nur der Niederschlagsanalyse zu Gute kommen, auch für andere Parameter könnten hier neue Erkenntnisse gewonnen werden. Qualitativ hochwertige Messdatensätze, die mit der VERA-Qualitätskontrolle hergestellt werden könnten, würden in vielen Bereichen der Meteorologie, aber auch in verwandten Wissenschaften, regen Zuspruch erfahren, da gute Daten die Grundlage jeder Forschung darstellen.

Die zweite Entwicklungsschiene muss in Richtung der Implementierung von Zusatzinformation gehen, wie dies mit der Fingerprint-Technik möglich wird. Auch hier besteht noch ein großer Forschungsbedarf, die ersten Ergebnisse, die im Rahmen von anderen Projekten durchgeführt worden sind, rechtfertigen aber den zu erwartenden Aufwand. Mit den Fingerprints wird es möglich sein, zusätzliche Information, die für den Niederschlag zum Beispiel in Form von Radar- oder Satellitendaten vorhanden ist, einzubinden, und so die Analysen genauer machen, was speziell bei Untersuchungen in kleinen Skalen von großer Bedeutung ist.

Wie im Text aber auch schon angeklungen ist, gibt es auch bei Kriging einige interessante Aspekte, die zu einer Verbesserung der Analysen beitragen könnten, und die daher noch genauer untersucht werden sollten.

13-7 Literaturzitate

- Ahrens, B., 2003a: Evaluation of precipitation forecasting with the limited area model ALADIN in an Alpine watershed. *Meteorologische Zeitschrift*, accepted.
- Ahrens, B., 2003b: Rainfall downscaling in an alpine watershed applying a multiresolution approach. , *J. Geophys. Res.*, **108**, 8388–8400.
- Ahrens, B., and A. Beck, 2003: On resolution of precipitation forecasts in Alpine watershed modelling. *International Conference on Alpine Meteorology and MAP-Meeting 2003, Extended Abstracts – Publications of MeteoSwiss, No. 66*, 308–311.
- Barry, R., 1992: *Mountain Weather & Climate*. Routledge Physical Environment Series, University of Cambridge.
- Beck, A., and B. Ahrens, 2003: Multiresolution Evaluation of Precipitation Forecasts over the European Alps. *Meteorologische Zeitschrift*,. submitted.
- Chistakos, G., 2000: *Modern Spatial Geostatistics*. Oxford University Press, 288 pp.
- Cressie, N., 1993: *Statistics for Spatial Data* (revised ed.). John Wiley & Sons, New York.
- Creutin, J., and C. Obled, 1982: Objective Analyses and mapping Techniques for Rainfall Fields: An Objective Comparison. , *Water Resour. Res.*, **18**, 413–431.
- Daley, R., 1991: *Atmospheric Data Analysis*. Cambridge University Press.
- Frei, C., J. Christensen, M. Déqué, D. Jacob, and P. Vidale, 2003: Daily precipitation statistics in regional climate models: Evaluation and intercomparison for the European Alps. , *J. Geophys. Res.*, **108**, 4124–4142.
- Groehn, I., R. Steinacker, C. Häberli, W. Pöttschacher, and M. Dorninger, 2000: Data quality control of MAP (DAQUAMAP). *MAP Newsletter* (13).
- Pebesma, E., and C. Wesseling, 1998: Gstat: a program for geostatistical modelling, prediction and simulation. *Comp. & Geosc.*, **24(1)**, 17–31.
- Pöttschacher, W., C. Häberli, and R. Steinacker, 1997: The error detection and correction module of CALRAS and VERA. *MAP Newsletter* (7), 88–89.
- Pöttschacher, W., R. Steinacker, and M. Dorninger, 1996: Vera - A high resolution analysis scheme for the atmosphere over complex terrain. *MAP Newsletter* (5), 64–65.

Rudolf, B., and C. Simmer, 2002: Niederschlag, Starkregen und Hochwasser. *Wissenschaftliche Mitteilungen aus dem Institut für Meteorologie der Universität Leipzig*.

Smith, R., 2003: A linear upslope–time–delay model for orographic precipitation. , *J. Hydrology*, **282**, 2–9.

Steinacker, R., M. Dorninger, and W. Pötschacher, 1995: Meteorological applications of high resolution topographic data. *MAP Newsletter* (3), 73–74.

Steinacker, R., C. Häberli, and W. Pötschacher, 2000: A Transparent Method for the Analysis and Quality Evaluation of Irregularly Distributed and Noisy Observational Data. *Monthly Weather Review*, **128**, 2303–2316.

Steinacker, R., W. Pötschacher, and M. Dorninger, 1997a: Enhanced resolution analysis of the atmosphere over the alps using the fingerprint technique. *Annalen der Meteorologie*, **35**, 235–237.

Steinacker, R., W. Pötschacher, and M. Dorninger, 1997b: An Enhanced Resolution Analysis Scheme for the Atmosphere over Complex Terrain. *Annales Geophysicae*. Suppl. II, Europ. Geoph. Soc., C426.

Tschannett, S., 2003: Objektive hochaufgelöste querschnittsanalyse. Master's thesis, Institut für Meteorologie und Geophysik, Universität Wien.

Tustison, B., E. Foufoula-Georgiou, and D. Harris, 2002: Scale-recursive estimation for multisensor Quantitative Precipitation Forecast verification: A preliminary assessment . *JGR-Atmospheres*, **107**.

VERA: www.alpenwetter.net, www.univie.ac.at/IMG-Wien/vera

KRIGING: <http://grass.itc.it/>, <http://www.gstat.org/>

Abbildungs- und Tabellenverzeichnis

Abbildungen

Abb. 13-1: Niederschlagsverteilung im Alpenraum für den 6. August 2002 (6.8.2002 06UTC bis 7.8.2002 06UTC), analysiert mit VERA, Gitterdistanz 16km. -----	14
Abb. 13-2: Niederschlagsverteilung für den 6. August 2002 mit VERA, Gitterdistanz 4km. -----	15
Abb. 13-3: Niederschlagsverteilung für den 6. August 2002 mit VERA, Gitterdistanz 4km, Minimierung der ersten und zweiten Ableitung-----	16
Abb. 13-4: Niederschlagsverteilung für den 6. August 2002 mit VERA, Gitterdistanz 4km, Minimierung der ersten und zweiten Ableitung, nur GTS-Stationen verwendet. -	16
Abb. 13-5: Niederschlagsverteilung für den 6. August 2002 mit VERA, Gitterdistanz 4km, Minimierung der ersten und zweiten Ableitung, 16 Stationen in Österreich-----	17
Abb. 13-6: Niederschlagsverteilung für den 7. August 2002 (7.8.2002 06UTC bis 8.8.2002 06UTC) mit VERA, Minimierung der ersten und zweiten Ableitung, Gitterauflösung 4km. -----	17
Abb. 13-7: Niederschlagsverteilung für den 11. August 2002 (11.8.2002 06UTC bis 12.8.2002 06UTC), analysiert mit VERA, Minimierung der 1. und 2. Ableitung, 4km Gitter -----	18
Abb. 13-8: Niederschlagsverteilung für den 12. August 2002 (12.8.2002 06UTC bis 13.8.2002 06UTC), analysiert mit VERA, Minimierung der 1. und 2. Ableitung, 4km Gitter. -----	19
Abb. 13-9: Niederschlagsanalyse mit Kriging für den 6.8.2002. Schwarz sind die Bundesgrenze und die Grenzen größerer Einzugsgebiete von Flüssen angedeutet. Kleine Kreise zeigen die verwendeten Stationen. Die Einheiten sind mm/d.-----	20
Abb. 13-10: Wie Abb. 13-9, aber für den 7.8.2002. -----	20
Abb. 13-11: Wie Abb. 13-9, aber für den 11.8.2002. -----	21
Abb. 13-12: Wie Abb. 13-9, aber für den 12.8.2002. -----	21
Abb. 13-13: Analyse mit den TAWES-Daten. Die Kreise zeigen die Position der TAWES-Stationen an. -----	22
Abb. 13-14: Analyse mit den TAWES-Daten und Zusatzinformation. Links ist eine Geländeinformation (die Höhe) und rechts die operationelle Modellvorhersage von ALADIN berücksichtigt worden. -----	23

Abb. 13-15: Das Niederschlagsfeld beobachtet mit den Radar-Stationen in Österreich (links) und kalibriert mit den TAWES-Daten (rechts). Die dicken Punkte zeigen die Position der Radarstationen. Die kleinen Kreise zeigen die Positionen der TAWES-Stationen. -----	23
Abb. 13-16: Analyse der TAWES-Daten mit der Zusatzinformation der kalibrierten Radardaten. -----	24
Abb. 13-17: Stochastische Simulation eines Niederschlagsfeldes, konditioniert mit den TAWES-Daten. -----	24
Abb. 13-18: Efficiency für die vier untersuchten Tage -----	26
Abb. 13-19: Scatterplot für ausgewählte HZB-Stationen für den 7.8.2002. Die Messwerte sind auf der Abszisse aufgetragen, die interpolierten Werte auf der Ordinate, die Einheit der Achsen ist jeweils [mm]. -----	27
Abb. 13-20: Efficiency für je 100 VERA- und Kriging-Analysen mit jeweils 200 Stationsmeldungen in Österreich. -----	28
Abb. 13-21: Fehlerkorrektur für fünf ausgewählte HZB-Stationen -----	29
Abb. 13-22: VERA-Analyse für den 6. August 2002 mit korrigierten Stationswerten. --	30
Abb. 13-23: VERA-Analysen mit korrigierten und unkorrigierten Messdatensätzen für die vier Termine -----	30
Abb. 13-24: Leave-one-out-Versuch mit anschließender cross-validation für die einzelnen Stationen, Analyse mit Kriging. -----Fehler! Textmarke nicht definiert.	

