

**Kommission für Glaziologie der
Bayerischen Akademie der
Wissenschaften**



**Aspekte zur Extrapolation von Tagesmittelwerten von Temperatur
und täglichen Niederschlagssummen an hochgelegenen Gebirgsstati-
onen aus Klimadaten des örtlichen Klimamessnetzes in Nepal**

Interner Bericht zu Arbeiten zum Projekt

Establishment of a Measuring Service for Snow and Glacier Hydrology
Contract 12/1996



Verfasser:

Dipl. Met. Markus Weber

München, März 1997

Inhaltsverzeichnis

1.	<u>Einleitung</u>	3
2.	<u>Die Extrapolation der Tagesmittel der Temperatur</u>	5
2.1.	<u>Die Bedeutung und Bestimmung des Tagesmittelwertes der Temperatur</u>	7
2.2	<u>Approximative Extrapolation der Tagesmittel</u>	8
2.3	<u>Weiterführende Überlegungen</u>	18
3.	<u>Die Extrapolation des Niederschlags</u>	20
3.1	<u>Die Methode zur Approximation der täglichen Niederschlagssummen</u>	21
3.2	<u>Weiterführende Überlegungen zur Verallgemeinerung der Methode</u>	32
4.	<u>Zusammenfassung und Empfehlungen</u>	32
5.	<u>Literatur</u>	34

27 Abbildungen im Text

1. Einleitung

Zur Simulation des Jahresgangs der täglichen Abflusswerte benötigt das konzeptionelle Abflussmodell **HBV3-ETH5** als meteorologische Eingangsgrößen die Tagesmittelwerte der Temperatur und die Tagessummen des Niederschlags an mindestens einem für das Einzugsgebiet repräsentativen Ort. In der Minimalkonfiguration wird innerhalb des Modells aus den Messdaten an diesem Ort durch Extrapolation mittels vorgegebener vertikaler Gradienten der Temperatur und des Niederschlags auf die Verhältnisse oberhalb der Messstation geschlossen. Die Gebietsparameter des Modells werden teilweise extern, überwiegend jedoch durch Kalibrierung anhand von gleichzeitig durchgeführten Abflussmessungen ermittelt.

Unabhängig davon, dass die wahren Verhältnisse besser anhand von Messungen an mehreren hochgelegenen Stationen anstatt durch Extrapolation mittels vorgegebener Gradienten ermittelt werden sollten, müssen zumindest die Eingangsgrößen an der gewählten Referenzstation zeitlich lückenlos vorliegen. Dies ist insbesondere deswegen erforderlich, weil der Modellalgorithmus zwangsläufig integral aufgebaut ist, also nicht nur die aktuelle Situation, sondern auch die vorangegangenen Ereignisse berücksichtigt. Demnach kann der Verlauf der Abflussmenge theoretisch nur unter der Voraussetzung einer vollständigen und korrekten Eingangsdatenreihe realistisch wiedergegeben werden.

Für die Eingangsgröße Niederschlag ist dies sofort einleuchtend, da eine zu große oder zu kleine Niederschlagsmenge sich unmittelbar auf den erhaltenen Abfluss auswirkt. Aber auch die Temperatur als einzige energetische Eingangsgröße muss gewissen Genauigkeitsansprüchen genügen, da durch ihren Wert unmittelbar die Schmelzwasserproduktion bzw. die Rücklagenbildung in Form von Schnee und Eis bestimmt wird. Wichtiger noch als der Trend ist aber der Absolutwert der Temperatur, denn durch dessen Ablage vom Nullpunkt wird der Höhenbereich bzw. die Größe des Areals bestimmt, in dem Schmelz- oder auch Akkumulationsvorgänge stattfinden.

Bei der Anwendung der Methode der Abflusssimulation auf Einzugsgebiete in Nepal zeigt sich rasch, dass auf Grund des extremen Geländes und der damit verbundenen logistischen Schwierigkeiten deutliche Abstriche an den Umfang und die Vollständigkeit des verfügbaren Datenmaterials gemacht werden müssen. Dennoch ist die Qualität zumindest der an den **SGHU**-Stationen für die Einzugsgebiete Annapurna, Khumbu und Langtang gewonnenen Datensätze von derartiger Güte, dass die Anwendung des **ETH5**-Modells auf jeden Fall erfolgversprechend ist. Lücken in den Temperaturdaten finden sich an diesen Stationen meist nur über Zeiträume von wenigen Tagen bis maximal Wochen mit abnehmender Tendenz in den letzten Jahren. Bei den Niederschlagsreihen umfassen sie zeitweise auch mehrere Monate. Das Datenmaterial aus den Regionen Humla, Kanjiroba und Makalu ist dagegen momentan noch derartig lückenhaft, dass es vorläufig für eine **ETH5**-Simulation ungeeignet ist.

Deshalb stellt sich die Frage, ob die Lücken in den Datenreihen mit geeigneten Methoden aus anderen Informationsquellen mit hinreichender Genauigkeit gefüllt werden können. Ein erster Ansatz in dieser Richtung wurde bereits in *Hottelet und Braun (1996)* in Form einer einfachen linearen Extrapolation aus Daten von umliegenden Klimastationen aufgezeigt. Diese Methode ist für kurze Zeiträume von ein bis maximal 4 Tagen durchaus erfolgversprechend. Für längere Perioden ist ein rein linear-regressiver Ansatz über den Datensatz eines Jahres jedoch zu ungenau.

Im Rahmen beispielsweise der Erstellung von Klimakarten wird die Regionalisierung von Klimagrößen mit Hilfe regressiver Modelle auch in den stark gegliederten Hochgebirgsregionen von Nepal erfolgreich durchgeführt (z.B. *Hormann, 1994*). Allerdings handelt es sich dabei um Klimada-

ten, die definitionsgemäß keine kurzperiodischen Schwankungen mehr enthalten. Dadurch vereinfacht sich das Problem weitgehend auf die Abhängigkeit der Größen von der geographischen Lage und der Seehöhe. Die Witterungseffekte und die damit verbundenen komplizierten Abhängigkeiten innerhalb der Grenzschicht werden aus dem Datenmaterial herausgefiltert und damit quasi stationäre Größen geschaffen. Tagesmittelwerte dagegen enthalten noch ein beachtliches Maß der lokalen Dynamik und Energetik und können daher nicht ohne weitere diesbezügliche Informationen auf ein größeres inhomogenes Gebiet übertragen werden.

Ist das betrachtete Gelände jedoch kleinräumig, übersichtlich und in sich weitgehend homogen, dann kann die Extrapolation in diesem Bereich nach den einfachen Methoden des **ETH5**-Modells erfolgen. Sie beschreibt die Verhältnisse mit hinreichender Genauigkeit, solange die Referenzstationsdaten wirklich für das Gebiet repräsentativ sind. In den meisten Fällen nötigen jedoch die örtlichen logistischen Voraussetzungen bereits an dieser Stelle Kompromisse ab. Die Stationen stehen vielleicht an einer nicht repräsentativen Stelle in einem Hochtal oder über einem speziellen Untergrund. Auch die Daten an der Referenzstation müssen nicht unbedingt für das Untersuchungsgebiet typisch sein.

Die Klimastationen sind dagegen mehr oder weniger zufällig verteilt. Meist sind sie im Bereich größerer Ansiedlungen oder einem touristisch bedeutsamen Ort gelegen. Auf jeden Fall ist die Entfernung zur Referenzstation sehr viel größer als deren Abstand zum Untersuchungsgebiet. Sie liegen allgemein auch deutlich tiefer als die **SGHU**-Stationen und an sehr verschiedenen Lokalitäten. Damit kann in den Messreihen unmöglich die komplette Information für die Verhältnisse an der Bergstation enthalten sein. Jede Art der statistischen Extrapolation ist damit automatisch fehlerbehaftet.

Im Rahmen der vorliegenden kurzen Studie waren nur Untersuchungen mit statistischen Werkzeugen möglich. Der sehr eng gefasste finanzielle Rahmen erlaubte nur sehr einfache Ansätze rein empirischer Art. Die im folgendem beschriebene Methode ist nicht vollständig objektiv und lässt sich vorerst nur teilweise automatisieren. Sie setzt ein gewisses Expertenwissen voraus, mit dessen Hilfe die resultierenden Vorschläge bewertet werden müssen. Solange reale Kontrollwerte vorliegen, kann das Ergebnis jedoch überprüft werden. Die Extrapolation liefert mit Sicherheit nicht den wahren Verlauf der fehlenden Messwerte, sondern nur eine Alternative mit relativ hoher Wahrscheinlichkeit. Unter ihrer Anwendung werden die Simulationen mittels **ETH5** im Einzelfall realistischer.

Die Extrapolationsmethode besteht letztlich darin, mittels einfacher statistischer Analysen regressiv stationäre Kenngrößen aus dem Datenmaterial abzuleiten und diese auf die Zielstation zu übertragen. Die kurzperiodischen Schwankungen dagegen werden als zufällig betrachtet und entsprechend ihrer Eintrittswahrscheinlichkeit an der **SGHU**-Station gewichtet übernommen. Anschließend wird das Ergebnis anhand der vorhandenen Messwerte einer subjektiven Plausibilitätsprüfung unterzogen.

Zum Füllen auch der erwähnten längeren Datenlücken in den Messungen der **SGHU**-Stationen ist die Methode geeignet. Für die Regionen Annapurna, Langtang und Khumbu wurde die Anwendung getestet. Es ist zu erwarten, dass auch die Ergänzung für die sehr lückenhaften Messungen an den drei weiteren Einzugsgebieten Humla, Kanjiroba und Makalu möglich ist, da hier wenigstens sporadisch Messungen zur Absicherung der Ergebnisse vorliegen. Inwieweit generell die Synthese der Datenreihe an einer fiktiven Station möglich ist, konnte im Rahmen dieser Studie noch nicht eruiert werden. Sicherlich muss das Verfahren dazu noch verfeinert bzw. erweitert werden, da die erreichbare Güte und Genauigkeit mit der Anzahl der verfügbaren Referenzwerte steigt.

2. Die Extrapolation der Tagesmittel der Temperatur

Der aktuelle Temperaturwert, den die Luft in einer definierten Höhe über Grund innerhalb der Grenzschicht (im vorliegenden Fall allgemein 2m über der Erdoberfläche) annimmt, ist nicht nur von den großräumigen synoptischen Bedingungen und der Meereshöhe des Ortes abhängig, sondern auch von den lokalen vertikalen und horizontalen Austauschbedingungen. Horizontal sind advektive Prozesse aller Art (Lokalwindssysteme oder auch Frontdurchgänge) bedeutsam, die Vertikalverteilung der Temperatur wird jedoch hauptsächlich durch die Terme der Energiebilanz an der Erdoberfläche bestimmt.

Im orographisch stark gegliederten Gelände sind ferner noch weitere Effekte zu beachten. So wird die Luftmasse in einem engen Gebirgstal tagsüber durch den Wärmeinput durch den sensiblen Wärmestrom deutlich stärker erwärmt als über dem Flachland, da einerseits bei gleichem Input die Wärmemenge auf ein größeres Luftvolumen verteilt wird, andererseits die heizende Fläche größer ist. In gleicher Weise ist in den Nachtstunden mit einer stärkeren Abkühlung im Gebirgstal gegenüber dem Flachland zu rechnen, da wiederum das Luftvolumen im Verhältnis zur Abstrahlung kleiner ist. Zusätzlich bilden sich am Talgrund Kaltluftseen infolge der höheren Dichte der Kaltluft.

Eine weitere dominierende Rolle spielt die Beschaffenheit des Untergrundes. Bedeutsam sind vor allem die Albedo und Wärmeleitfähigkeit des Bodens, der Wassergehalt und Bewuchs sowie die Bodenrauhigkeit. Letztere beeinflusst die Ausprägung der Turbulenz und damit den Austausch, die anderen Größen die Aufteilung des Strahlungsangebots in die Terme der Energiebilanz. So ist bei gleichem Angebot an Strahlungsenergie der fühlbare Wärmestrom über einer trockenen, stark strukturierten Oberfläche mit geringer Albedo und schlechten Wärmeleitungseigenschaften sehr viel größer als über einer feuchten Wiese. Der höhere fühlbare Wärmestrom führt zu einem höheren Temperaturniveau über der ersten Fläche als über der Vergleichsfläche in gleicher Höhe.

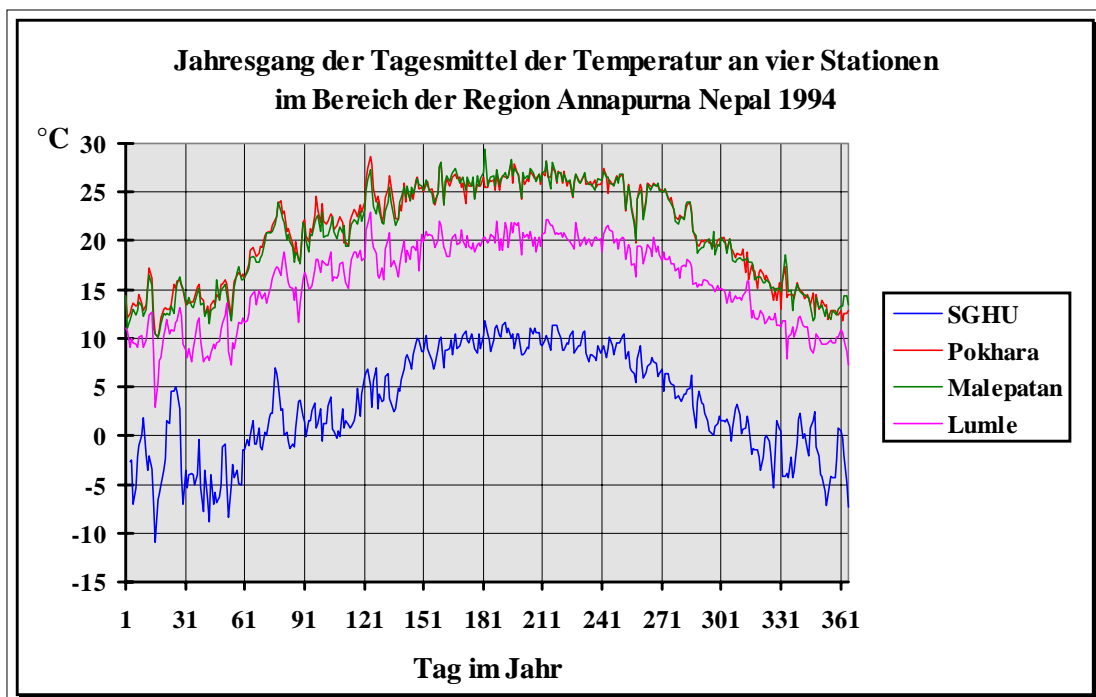


Abb. 1: Beispiel für den Vergleich des Jahresgangs der Tagesmittel der Temperatur an den vier Stationen Machapuchare B.C. (3470m, SGHU), Pokhara Airport (827m), Malepatan (856m) und Lumle (1642m) in der Annapurna-Region im Jahr 1994

Die oben angesprochenen Einflüsse auf den lokal gemessenen Temperaturwert sind bei weitem nicht vollständig. Es wird aber verdeutlicht, dass auch innerhalb einer relativ eng begrenzten Region von etwa 35x35 km an unterschiedlichen Orten gemessene Temperaturreihen nur grobe Information zu den Verhältnissen an einer anderen Messstelle enthalten. Als Beispiel für diese These werden die Jahrgänge der Temperatur an unterschiedlichen Stationen im Annapurna-Gebiet in *Abbildung 1* gezeigt. Die Klimastationen Pokhara Airport und Malepatan sind in etwa gleicher Höhenlage nur etwa 5km voneinander entfernt in einem eher flachen Gebiet gelegen. Die Station Lumle liegt in einem E-W gerichteten Hochtal mit Vegetation auf einem Sattel, Machapuchare B.C. dagegen am Fuß des Annapurnamassivs in einem nahezu vegetationslosen Becken. Die Entfernung nach Pokhara beträgt Luftlinie etwa 37 km.

Als wichtigste Einflussgröße für das Temperaturniveau der einzelnen Stationen wirkt natürlich die Seehöhe. Wenn man auch vereinzelt ähnliche Strukturen in allen 4 Zeitreihen finden kann, so ist doch in den meisten Zeiträumen der Verlauf überwiegend lokal geprägt. Die Jahrgänge an den Stationen Pokhara und Malepatan sind praktisch identisch, da sich dort sowohl die Höhenlage als auch die Geländebeschaffenheit nicht wesentlich unterscheiden. Mit der Höhe nimmt die Varianz der Datenreihe zu. Dies ist ein Indikator für zunehmend extremere Klimaverhältnisse an den höher gelegenen Stationen, die überwiegend auf die Effekte des Untergrundes und der Orographie zurückführbar sind, weniger auf den zunehmenden Einfluss der Witterung in der höheren Atmosphäre an den Bergstationen. Typisch ist weiterhin die saisonal stärkere Varianz an den hochgelegenen Stationen während der Trockenzeit, die in der Monsunperiode weniger ausgeprägt ist.

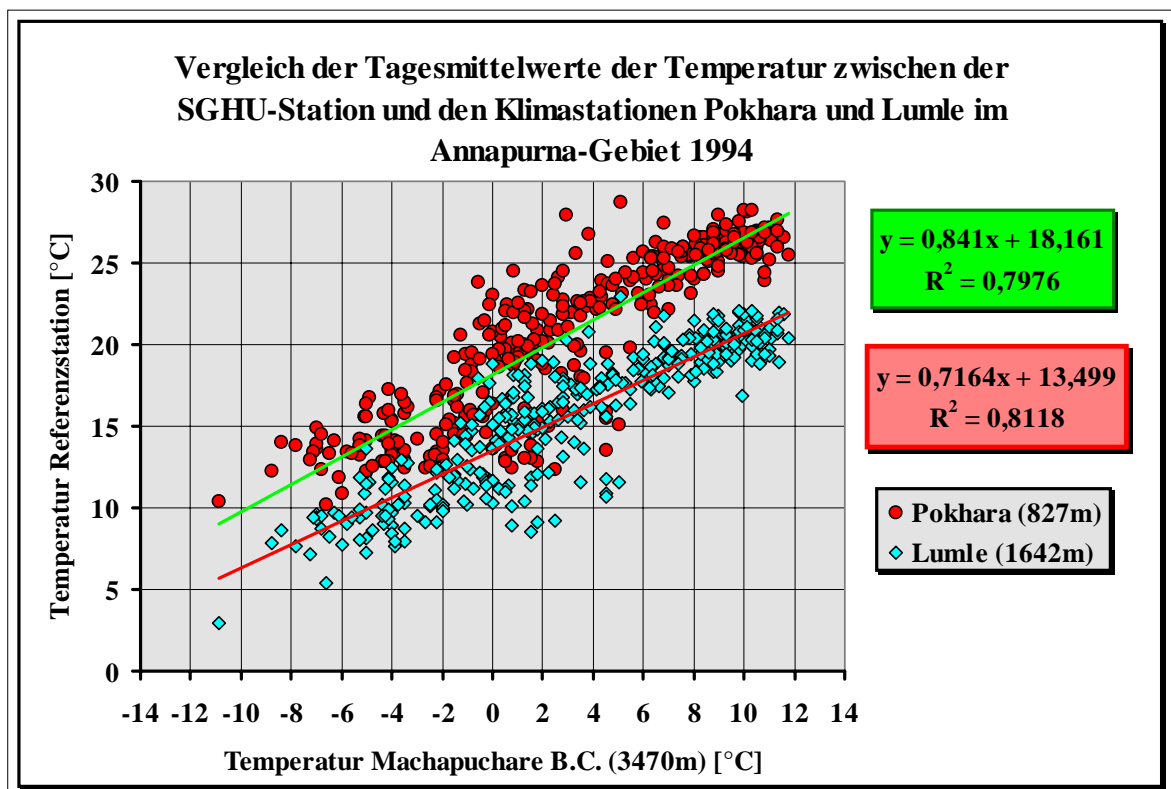


Abb. 2: Vergleich der Tagesmittelwerte der Klimastationen Pokhara Airport und Lumle mit den Werten der SGHU-Station Machapuchare B.C. sowie die jeweilige lineare Regression.

Trägt man wie in *Abbildung 2* die Messwerte der Stationen linear gegen die Reihe der SGHU-Station auf, so wird durch die beträchtliche Streuung von $> \pm 5K$ und die schlechte Korrelation um $R^2=0.8$ noch deutlicher, dass die Ähnlichkeit der Temperaturverläufe nicht sehr groß ist. Die Über-

einstimmung der Datenreihen von Lumle und Pokhara ($R^2=0.93$) ist dagegen sehr viel besser. Der Y-Abschnitt der Regressionsgerade entspricht in etwa der mittleren jährlichen Temperaturdifferenz zwischen den Stationen und damit dem vertikalen Temperaturgradienten, der sich für die Distanz Pokhara-SGHU zu $-0.68 \text{ K}/100\text{m}$ und für Lumle-SGHU $-0.73 \text{ K}/100\text{m}$ errechnet. Die Klimastation Lumle ist also im Mittel tatsächlich etwas wärmer als gemäß der Temperaturabnahme in der freien Atmosphäre von etwa $-0.65 \text{ K}/100\text{m}$ zu erwarten wäre. Die Steigung der Ausgleichsgeraden kleiner als 1 ist durch die höhere Varianz an der SGHU-Station bedingt. Die Anwendung einer Regression dieser Art liefert nur in seltenen Fällen einen Extrapolationswert in der gewünschten Güte. Eine mathematisch exakte Abbildung der Zeitreihen aufeinander ist unmöglich.

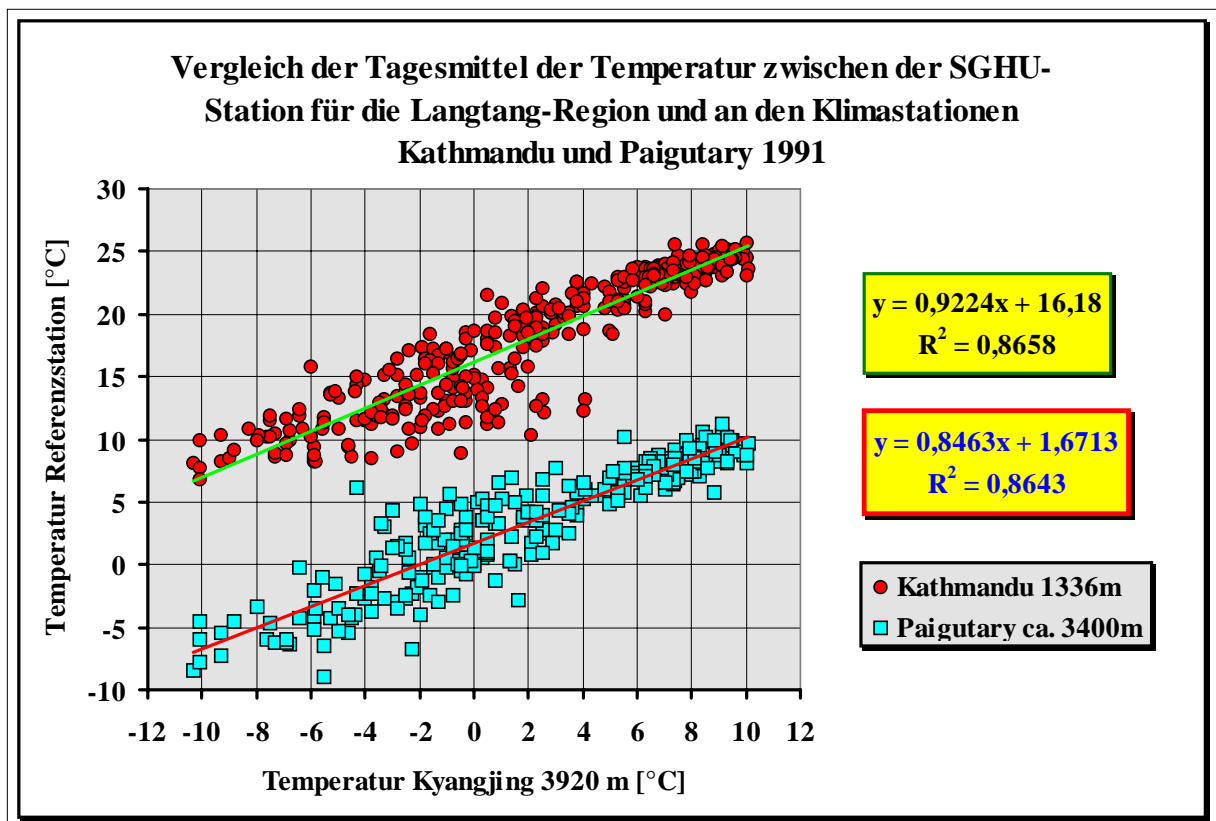


Abb. 3: Vergleich der Tagesmittelwerte der Klimastationen Kathmandu und Paigutary mit den Werten der SGHU-Station Kyanchjing in der Region Langtang

In anderen Regionen (Abbildung 3) kann in Einzelfällen eine geringfügig bessere Korrelation der Tagesmittel gefunden werden. Es bringt aber nicht unbedingt Vorteile, eine höher oder näher an der SGHU-Station gelegene Klimastation als Referenz zu wählen, wie das Beispiel in Abbildung 3 für die Langtang-Region zeigt.

2.1 Die Bedeutung und Bestimmung des Tagesmittelwertes der Temperatur

Die in der Meteorologie übliche Anwendung von Mittelwerten der Temperatur dient nicht nur der Datenreduzierung. Die Mittelung über wohl definierte Zeiträume liefert einen Temperaturwert, der für eine größere, in Luvrichtung orientierte, Fläche als repräsentativ betrachtet werden kann. Weiterhin handelt es sich damit um eine grobe Tiefpassfilterung zur Ermittlung von Trends, die unabhängig von den hochfrequenten turbulenten Schwankungen sind. Die Filterfunktion durch die a-

rithmetische Mittelung ist allerdings nicht sehr wirksam, so dass sogenannte Aliasingeffekte unvermeidbar sind. Im strengen Sinne darf sie nur auf bereits gefilterte Datenreihen angewandt werden. Meist erfolgt diese Vorfilterung durch die Trägheit der verwendeten Messfühler, so dass hochfrequente turbulente Schwankungen nicht mehr in den Daten enthalten sind.

Da die Tagesgänge der Temperatur auf Stundenmittelbasis nur in seltenen Fällen wirklich symmetrisch und schwankungsfrei sind, wird der Tagesmittelwert dennoch durch den Tagesgang geprägt. Es wird umso signifikanter erfasst, je größer die Zahl der Stützstellen ist. An den mit einer Datenerfassung ausgerüsteten **SGHU**-Stationen wird das Tagesmittel aus einer großen Zahl von Einzelwerten bestimmt. An den Klimastationen liegen dagegen nur Einzelwerte vor. Im günstigsten Fall sind dies die Extrema und die Werte an den Terminen 8:45 und 17:45. Oft sind sogar nur die Terminwerte vorhanden. Zur Ermittlung von klimatologischen Größen, wie beispielsweise Monatsmittel, ist diese Datendichte ausreichend, da über einen längeren Zeitraum die positiven und negativen Abweichungen vom Mittelwert gleich groß sind. Unterscheiden sich die Tagesgänge nur unwesentlich in ihrem zeitlichen Verlauf und hauptsächlich nur in ihrer Amplitude, dann kann der Tagesmittelwert T_M mit der hinreichenden Genauigkeit von etwa $\pm 0,2$ K aus den Minima und Maxima in der Form $T_M = (T_{Min} + T_{Max})/2$ berechnet werden.

Liegen jedoch nur die beiden Terminwerte vor, liegt ein systematischer Samplingerror vor, der je nach Form des Tagesgangs zu einer Abweichung von mehreren Grad vom tatsächlichen Mittelwert führt. Da aber die Form des Tagesgangs einen typischen Jahresgang zeigt, ist eine Korrektur der erhaltenen Werte mittels einer regressiv bestimmten Korrekturfunktion möglich. Auf diese Weise wird der Fehler in der Bestimmung der wahren Tagesmittel im Falle des Vorliegens nur der Terminwerte auf etwa ± 0.5 K reduziert. Die Korrektur wurde, soweit erforderlich, an allen in dieser Studie verwendeten Klimastationen durchgeführt. Trotzdem ist selbst unter der Annahme, dass die Temperaturextrapolation exakt deterministisch bestimmbar wäre eine Streuung in der obigen Größenordnung auf Grund der Ungenauigkeit bei der Bestimmung der Tagesmittel an den Referenzstationen unvermeidbar.

2.2 Approximative Extrapolation der Tagesmittel

In der Klimatologie werden zur Regionalisierung von Temperaturdaten im Hochgebirge regressive Ansätze in der Form (z.B. *Hormann, 1994*)

$$T = T_0 + \gamma_z \cdot z + \gamma_x \cdot x + \gamma_y \cdot y + g \quad (1)$$

verwendet, wobei z die Vertikalkoordinate, x und y die Breiten- bzw. Längenkoordinaten, γ_i die Gradienten in die jeweilige Koordinatenrichtung und g eine Korrekturgröße für die speziellen Schichtungsbedingungen in Tälern bedeuten. T_0 , γ und g werden regressiv bestimmt. Ein Regressionsmodell dieser Art ist für klimatologische Zwecke bei einer genügend hohen Anzahl verfügbarer Stationen sicherlich bestens geeignet. Für die Anwendung auf Tagesmittel wäre jedoch eine sehr hohe Anzahl von Stationen erforderlich, die in den nepalesischen Regionen nicht zur Verfügung steht.

Aus diesem Grund muss im vorliegenden Fall zunächst auf eine Abhängigkeit von den Horizontalkoordinaten verzichtet werden. Sämtliche Information muss sich aus dem aktuellen vertikalen Gradienten ergeben:

$$T_{SGHU} = T_{Ref} + \gamma_i \cdot \Delta z \quad (2)$$

Der Verzicht auf die Berücksichtigung der horizontalen Änderungen kann insofern gerechtfertigt werden, dass man innerhalb des betrachteten kleinräumigen Gebietes und hinsichtlich der Verwendung von Tagesmittelwerten den synoptischen Einfluss auf alle Stationen als gleich betrachtet. Dadurch werden aber sämtliche Abweichungen vom mittleren Vertikalgradienten im Gebiet den lokal unterschiedlichen Zuständen der Grenzschicht zugeordnet.

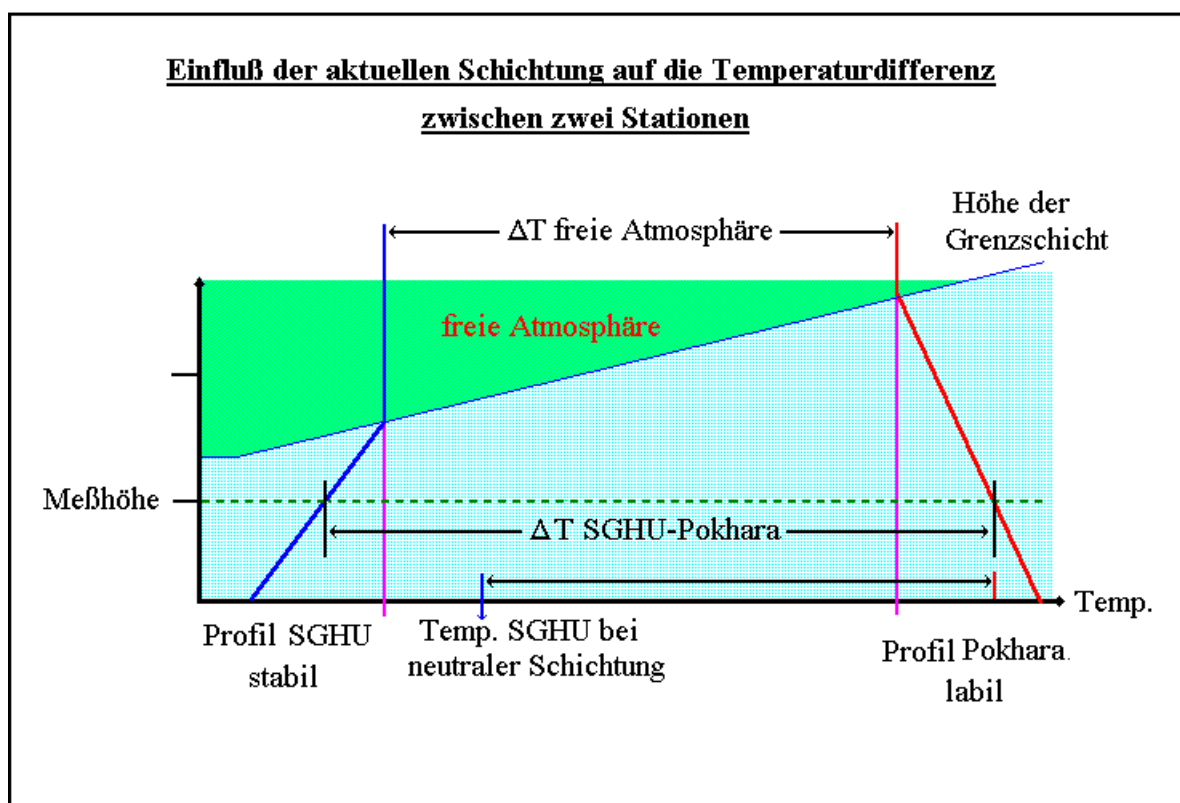


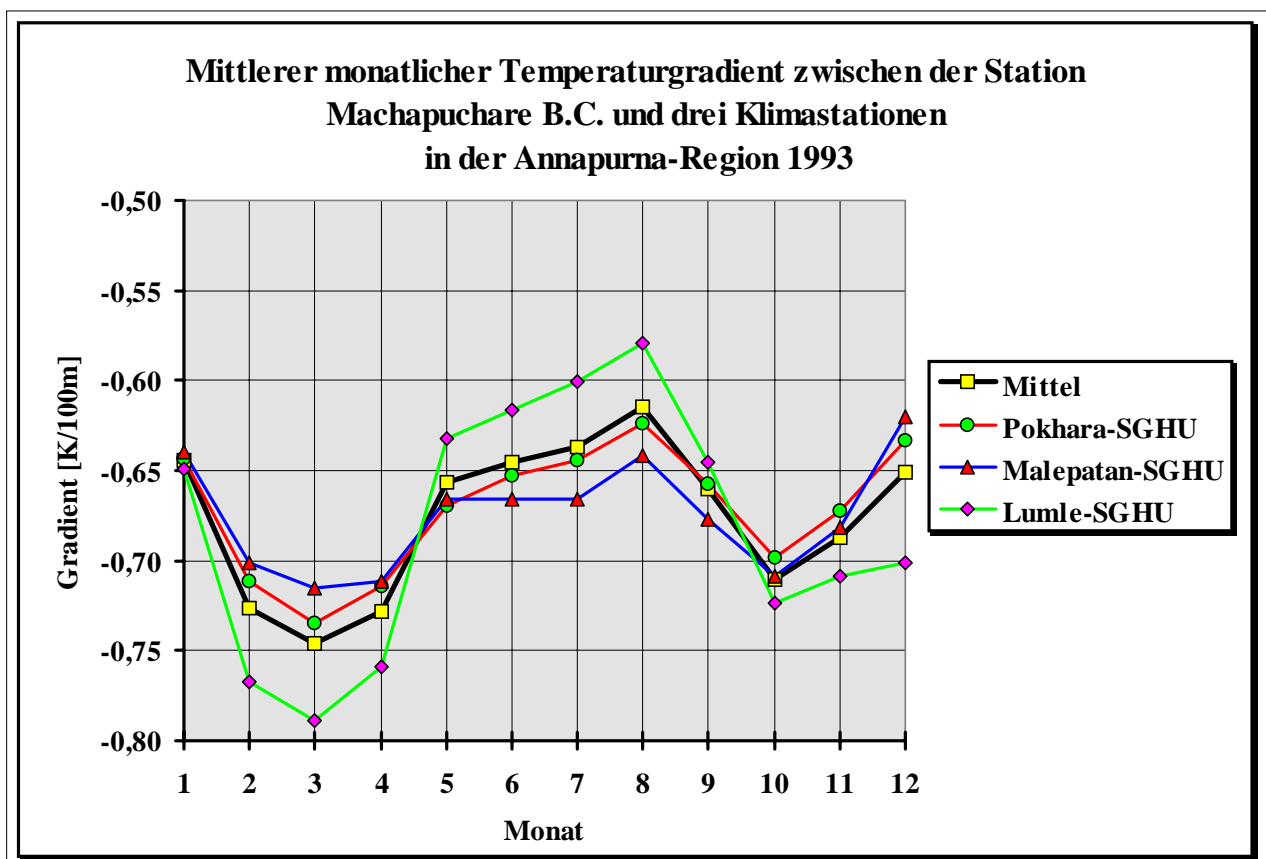
Abb.4: Schematisches Beispiel für den Einfluss der lokalen Schichtung an den einzelnen Stationen auf die erhaltene Temperaturdifferenz bei einer an beiden Stationen identischen Messhöhe

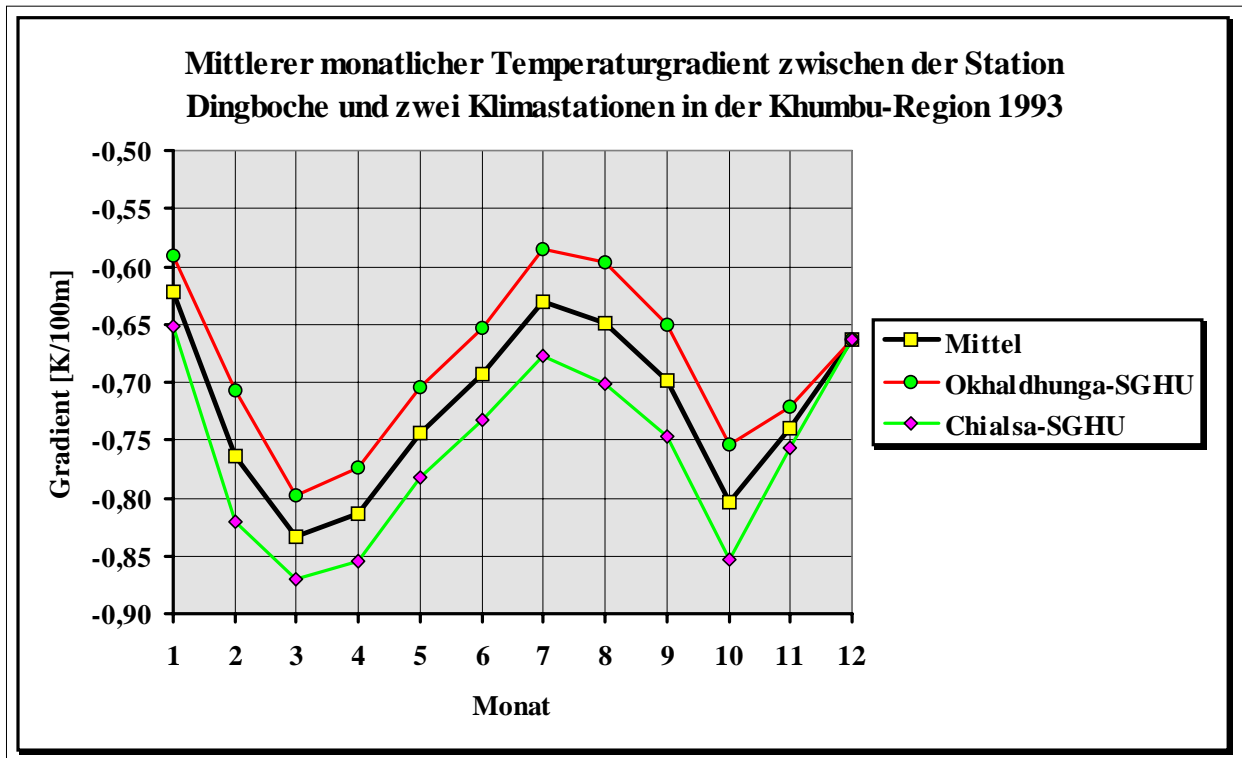
Die unterschiedlichen Schichtungsbedingungen vergrößern oder verkleinern die Temperaturdifferenz gegenüber der in der freien Atmosphäre je nach Situation. Ein für die Hochgebirgsklimatologie relativ häufiges Beispiel zeigt die *Abbildung 4*. Sie zeigt schematisch die Temperaturprofile innerhalb der bodennahen Grenzschicht an einer Bergstation und einer Flachlandstation. Eine Schneedecke oder bodennahe Kaltluft an der **SGHU**-Station sollen zu einer stabilen Schichtung der Grenzschicht führen, während die Talstation gleichzeitig eine labile Schichtung zeigt. Demnach ist die Bergstation deutlich kälter als es sich aus der Temperaturabnahme außerhalb der bodennahen Grenzschicht ergeben würde. Es sind aber auch andere Kombinationen denkbar, wie beispielsweise an beiden Lokalitäten unterschiedlich labile Schichtungen. In diesem Fall ist die **SGHU**-Station wärmer als erwartet. Im übrigen wird an dieser Stelle noch ein weiteres Problem aufgezeigt: Nur geringe Unterschiede in der Realisierung der effektiven Messhöhen kann zu einem systematischen Fehler bei der Bestimmung der Temperaturdifferenz führen.

Im Detail können die schichtungsabhängigen Effekte dem Datenmaterial ohne tiefergehende Analysen nicht entnommen werden. Bei der Anwendung eines linearen Regressionsansatzes werden diese Einflüsse über das Jahr gemittelt und in dieser Form in die Regressionsparameter eingerechnet. Die saisonalen Unterschiede werden dabei nicht weiter berücksichtigt. Eine Betrachtung des Jahres-

gangs der Monatsmittel der mittleren Gradienten in der Region (*Abbildung 5a*) zeigt aber sehr wohl einen signifikanten Unterschied zwischen der Trockenzeit und der Monsunperiode. Während letzterer beträgt an fast allen Stationen die mittlere Temperaturabnahme den Wert um $-0,65 \text{ K}/100\text{m}$, der sich im Mittel auch in der freien Atmosphäre findet. Die Klimastation Lumle zeigt in den Sommermonaten sogar einen etwas kleineren Gradienten, der darauf zurückgeführt werden kann, dass diese Station besonders viel Niederschlag erhält und damit gegenüber Pokhara und Malepatan durch relativ kühlere Witterung charakterisiert ist. In der Trockenzeit ist der Gradient zur **SGHU**-Station von allen Referenzstationen aus deutlich größer als die erwähnten mittleren $-0,65 \text{ K}/100\text{m}$. Die Ursache liegt einerseits darin, dass in der Trockenzeit auch der Temperaturgradient in der freien Atmosphäre sich etwas vergrößert und damit mehr zum trockenadiabatischen Gradienten tendiert. Andererseits treten in dieser Zeit verstärkt schichtungsspezifische Effekte auf.

Dieselbe Struktur zeigt auch der Jahresgang der Gradienten zwischen einer Auswahl von Stationen in der Khumbu-Region (*Abbildung 5b*). Bei diesem Beispiel sind die Gradienten insgesamt geringfügig größer, offensichtlich bedingt durch die etwas höhere Seehöhe der Stationen. In allen drei Untersuchungsgebieten wird beobachtet, dass der mittlere Temperaturgradient von einer höher gelegenen Referenzstation zur **SGHU**-Station immer größer ist als der von einer tiefer gelegenen. Man beachte beispielsweise, dass die Werte für die Stationen Odhaldhunga und Lumle, beide auf etwa 1700m a.s.l. , in etwa gleich sind. Die weiter oben angesiedelte Station Chialsa (2770m) in der Khumbu-Region zeigt gegenüber Dingboche noch größere Temperaturabnahmen. Andererseits sind die Gradienten zwischen den tiefer gelegenen Klimastationen untereinander allgemein kleiner als der Standardwert $-0,65 \text{ K}/100\text{m}$.





*Abb.5: a) Jahrgang der Monatsmittel des vertikalen Temperaturgradienten zwischen drei Klimastationen und der SGHU-Station Machapuchare B.C. im Annapurnagebiet (vorangegangene Seite)
b) Dasselbe für zwei Klimastationen und der SGHU-Station Dingboche in der Khumbu-Region (oben)*

Aus der Analyse der Gradienten kann die Schlussfolgerung gezogen werden, dass in den Wintermonaten allgemein die Tagesmitteltemperaturen an den SGHU-Stationen etwas niedriger sind als sie sich aus dem mittleren Gradienten ergeben würden. Andererseits ist die Temperaturabnahme in der warmen Jahreszeit unterdurchschnittlich. Zur Berücksichtigung dieser Erkenntnisse bei der Extrapolation wäre eigentlich die Einführung einer zeitabhängigen empirischen Funktion erforderlich, die individuell an jeden Fall anzupassen wäre. Da aber die Extrapolation im Einzelfall mit Hilfe dieser Funktion nur unwesentlich genauer würde, ist es einfacher, einen universelleren Regressionsansatz zu wählen, der analog zur linearen Regression nur von den Temperaturen selbst abhängt und den Gradienten nicht direkt benötigt. Da der Jahrgang des Gradienten relativ gut mit dem Gang der Temperatur selbst korreliert ist, bietet sich eine Funktion der Form

$$T_{\text{Ref}} = A \cdot T_{\text{SGHU}}^2 + B \cdot T_{\text{SGHU}} + C \quad (3)$$

an. Die Koeffizienten A , B und C werden dabei regressiv aus Monatsmittelwerten bestimmt. Der Wert C gibt in etwa die mittlere jährliche Temperaturdifferenz zwischen den Stationen, respektive den mittleren Gradienten multipliziert mit der Höhendifferenz, wieder. Der Wert von B sollte in der Nähe von 1 liegen. A bestimmt hauptsächlich den Einfluss des Schichtungseffekts. Für gewöhnlich ist er negativ und müsste etwa einen Wert um $-0,03$ besitzen. Weichen die Regressionsparameter stark von den angegebenen Werten ab, werden die Verhältnisse unrealistisch beschrieben.

Wichtig ist, dass die Regression in der Form der Gleichung (3) durchgeführt wird, denn nur dann passen der Wertebereich der SGHU-Station und der Referenzstation zusammen. Nur innerhalb des

Wertebereichs der **SGHU**-Station besitzt die Kurve die richtige Krümmung. Wird die Krümmung zu stark ($A < -0.05$), dann wird der Wertebereich der Funktion für T_{Ref} für hohe Temperaturwerte unrealistisch beschränkt.

Sollen nun Werte mit Hilfe der Beziehung (3) extrapoliert werden, muss die Gleichung in die Standardform einer quadratischen Gleichung umgeformt und gelöst werden. Als gültige Lösung kommt nur diejenige in Frage, die sich im realistischen Wertebereich für die SGHU-Station befindet. Die andere mögliche Lösung wird verworfen. Liegt der Eingangswert der Referenzstation außerhalb des gültigen Wertebereichs für die Beziehung, ist keine Extrapolation möglich. Unter Umständen kann in diesem Fall doch noch die Umkehrfunktion von (3) einen Schätzwert liefern, aber eben nur für diese Extremfälle.

Die Koeffizienten für (3) wurden für die drei Einzugsgebiete Annapurna, Khumbu und Langtang an den Referenzstationen, für die genügend Datenmaterial im Zeitraum 1991 bis 1994 zur Verfügung stand, bestimmt und die Höhe der SGHU-Stationen extrapoliert. Das Ergebnis wird mit den vorhandenen Messwerten der SGHU-Stationen verglichen. *Abbildung 6* zeigt als Beispiel die resultierenden Funktionen für die Stationen des Anapurna-Gebiets im Jahr 1993. Die Korrelation sind für die Beziehungen erheblich besser als für den linearen Fall. Allerdings muss bei der Bewertung berücksichtigt werden, dass die Funktionen mit Monatsmittelwerten gewonnen wurden.

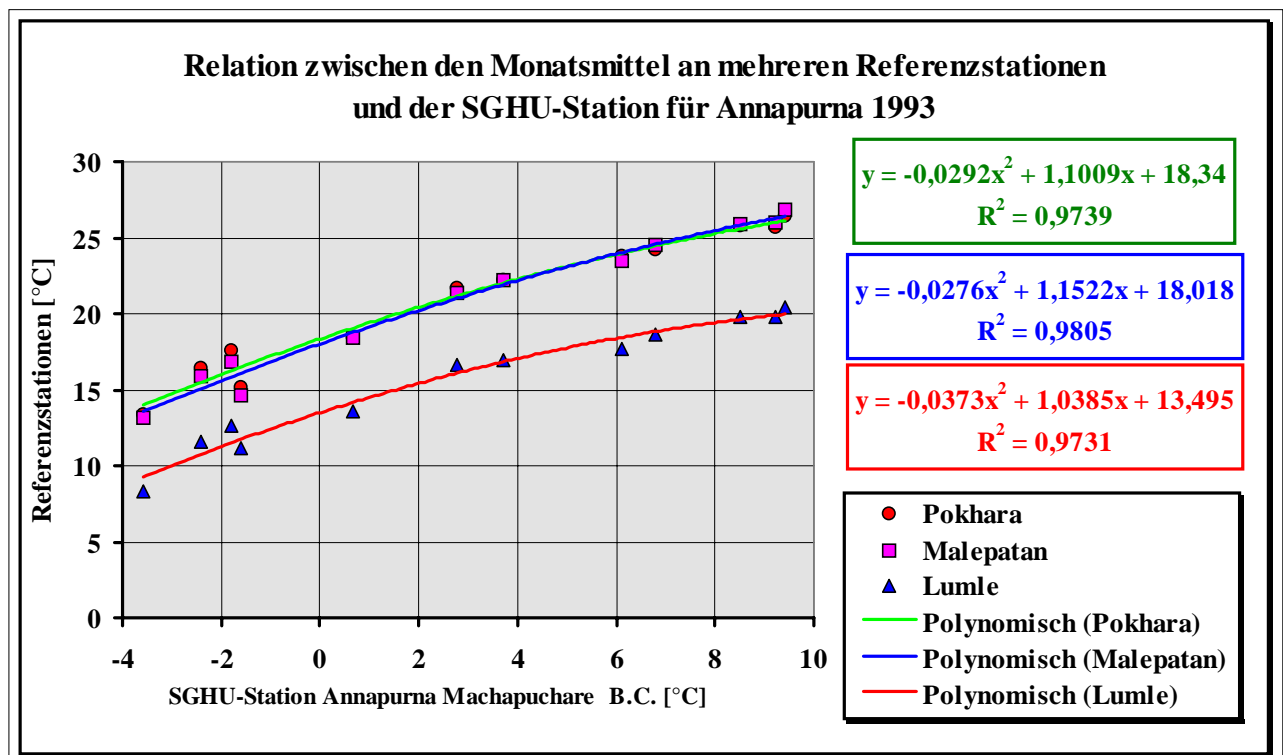


Abb. 6: Empirische Beziehungen zwischen der **SGHU**-Station Machapuchare B.C. (3470m) und den Klimastationen Pokhara Airport (827m), Malepatan (856m) und Lumle (1642m) für das Jahr 1993

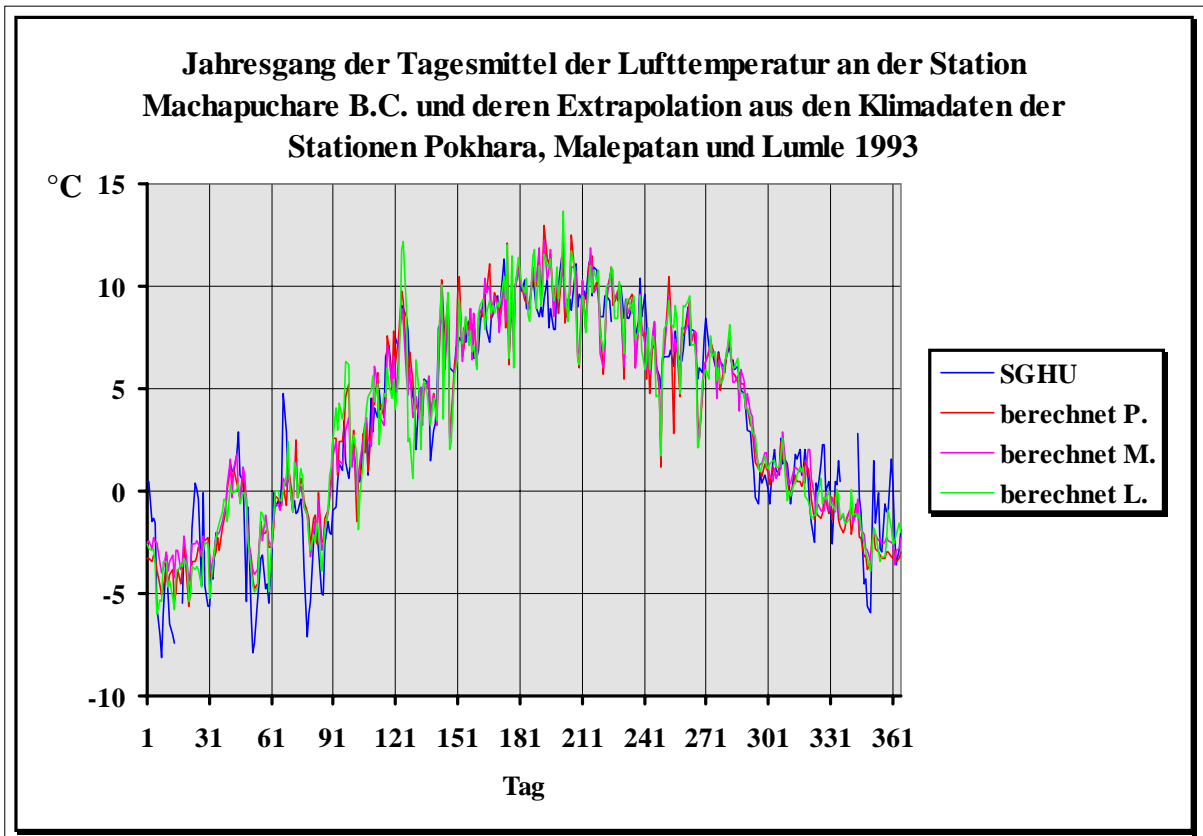


Abb.7: Jahresgänge der extrapolierten Temperaturreihen im Vergleich zu den gemessenen Werten

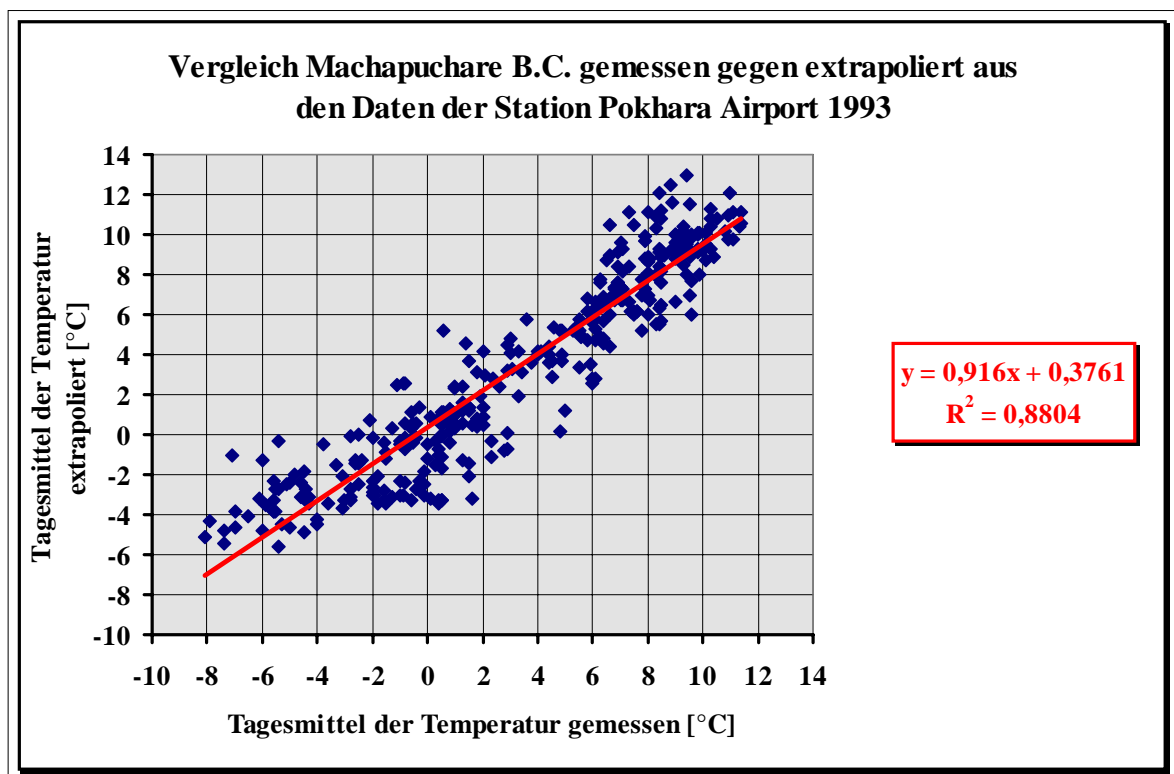


Abb. 8: Güte der Extrapolation aus den Daten der Station Pokhara Airport (827m)

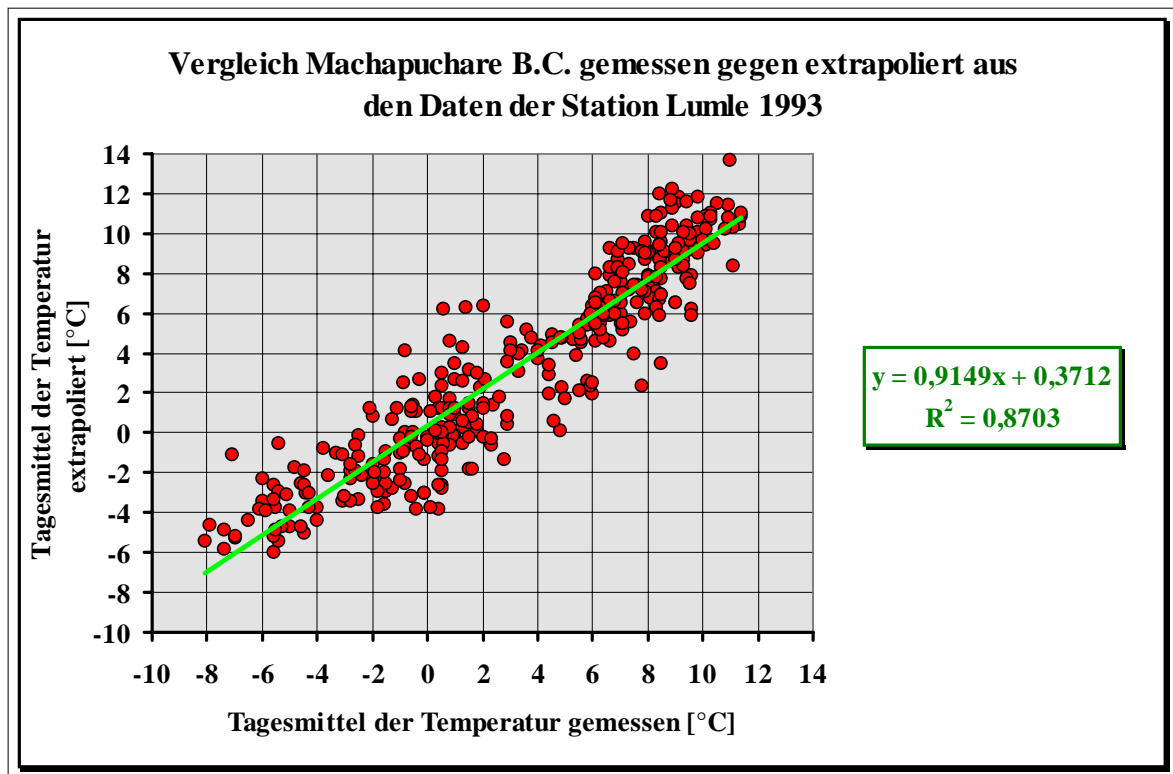


Abb. 9: Güte der Extrapolation aus den Daten der Station Lumle (1642m)

Die Werte der Koeffizienten stimmen ebenfalls sehr gut mit den Erwartungswerten überein. Es sei an dieser Stelle angemerkt, dass sie von Jahr zu Jahr für die einzelnen Stationen wenig variieren, sofern die Datensätze ausreichend vollständig sind. Sie dürfen in gewissem Rahmen für eine Station als universell angesehen werden.

Der Vergleich der extrapolierten Reihen mit den Messungen an der **SGHU**-Station, dargestellt in *Abbildung 7*, sieht zunächst einmal sehr gut aus. Der Jahresgang wird von aus der Extrapolation von allen Stationen mehr oder weniger gut getroffen und auch einzelne Strukturen werden realistisch modelliert. Auch die größeren Amplituden der Variationen während der Trockenzeit werden wiedergegeben. Allerdings werden manche Spitzen durch einzelne Stationen besonders in der Monsunzeit etwas übertrieben. Dies ist aber nicht weiter verwunderlich, da die Extrapolationsbeziehung nur Trends berücksichtigen kann, ansonsten aber auf den Informationsgehalt der Messreihe an der Referenzstation angewiesen ist.

Die objektivere Darstellung zur Qualitätsprüfung zeigen die *Abbildungen 8* und *9*, in denen die extrapolierten Reihen gegenüber den gemessenen Werten in Punktediagrammen aufgetragen sind. Die Parameter der linearen Regressionsgeraden weichen immer noch von einer sauberen **1:1**-Beziehung ab und es muss immer noch mit einem Fehler von mehreren K im Einzelfall gerechnet werden. Dennoch ist eine Verbesserung gegenüber der einfachen linearen Regression zu beobachten.

In der Praxis liegen jedoch für die überwiegenden Zeiträume Messwerte vor, die letztlich ein zusätzliches Kriterium für die endgültige Wahl der Substitutionswerte liefern. So werden beim Füllen der Datenlücken die Schätzwerte aus der Extrapolation als objektiver Vorschlag (*First Guess*) betrachtet und in deren Bereich ein Wert subjektiv gewählt, der außerdem gefühlsmäßig am besten zu den vorhandenen Messwerten passen soll. In *Abbildung 10* ist ein Beispiel für diese Vorgehensweise dargestellt. Der Verlauf der eingefügten Werte wird sowohl durch den Verlauf der extrapolierten

Reihen als auch durch die vorhandenen Messwerte bestimmt. Damit dürfte sich der Fehler für den Lückenwert weiter vermindern. Er ist somit keinesfalls Null, dürfte aber in den meisten Fällen unter 1 K liegen. Somit können die Lücken in der Temperaturmessung mit Hilfe dieser Mischung aus objektiver Analyse und subjektivem Expertenwissen mit hoher Wahrscheinlichkeit für die Simulationsrechnung mit dem **ETH5**-Modell befriedigend gefüllt werden. Und dies war zunächst der eigentliche Zweck dieser Methode.

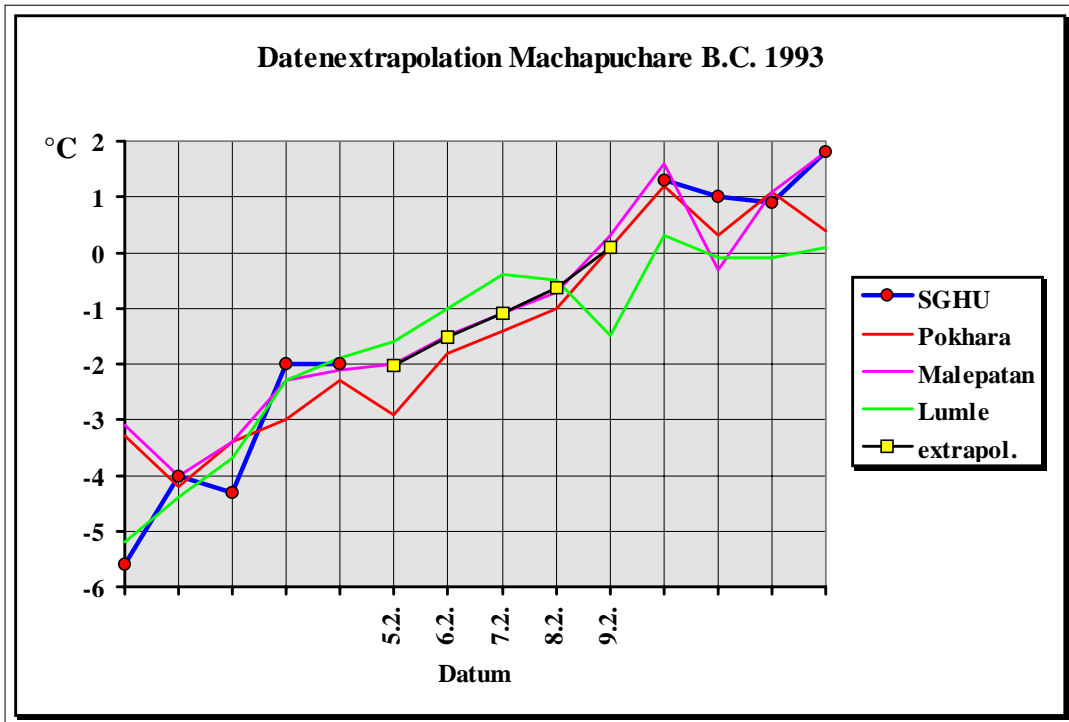


Abb. 10: Beispiel für die Substitution von Datenlücken an der SGHU-Station Machapuchare B.C. mit Hilfe der extrapolierten Datenreihen aus den Referenzstationen (markiert die Fehlwerte).

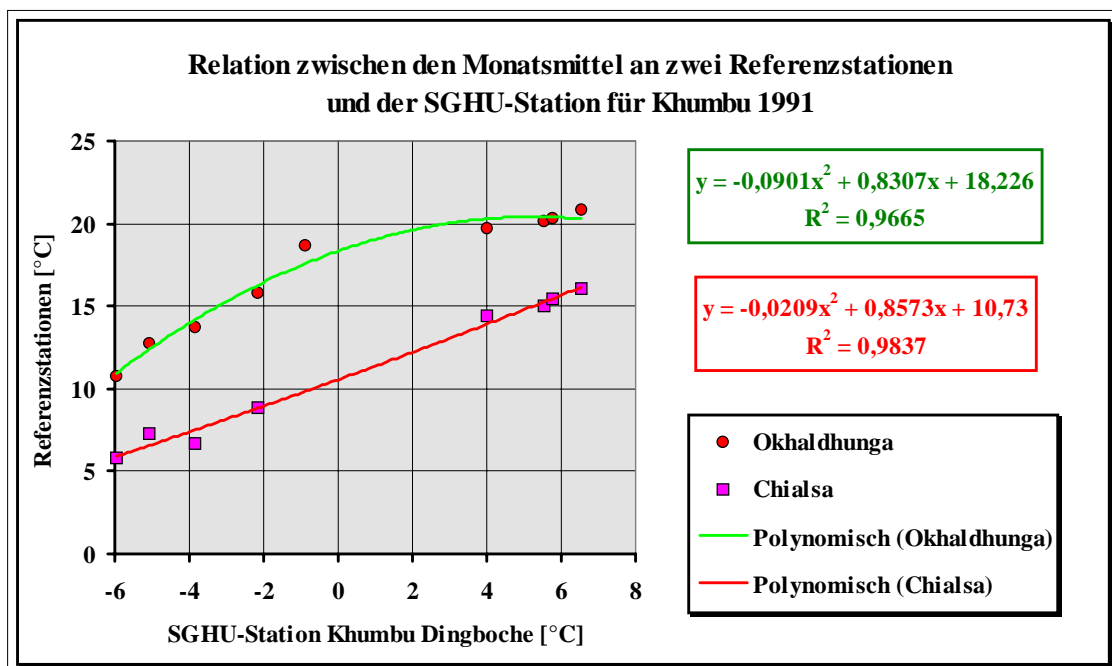


Abb. 11: Empirische Beziehungen zwischen der SGHU-Station Dingboche (4355m) und den Klimastationen Okhaldhunga (1720m) und Chialsa (2770m) für das Jahr 1991

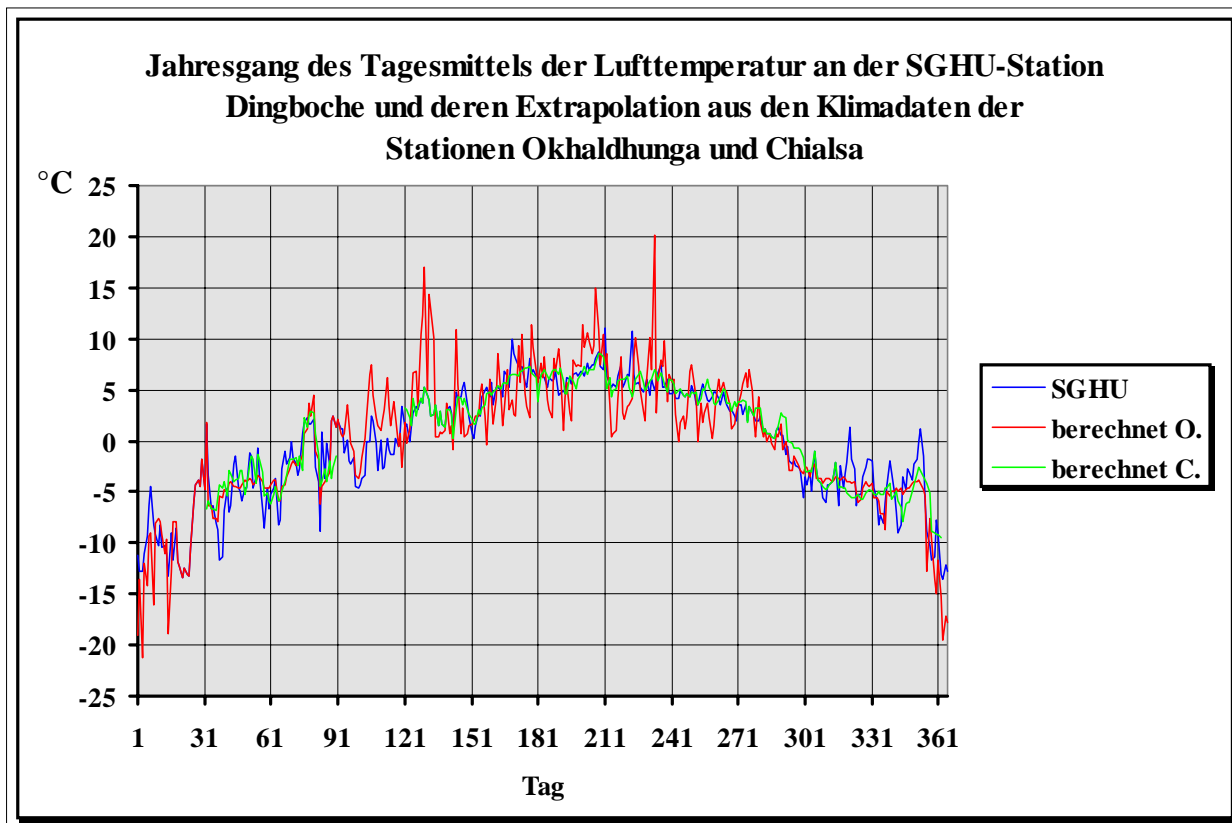


Abb.12: Jahresgänge der extrapolierten Temperaturreihen im Vergleich zu den gemessenen Werten in der Region Khumbu für das Jahr 1991

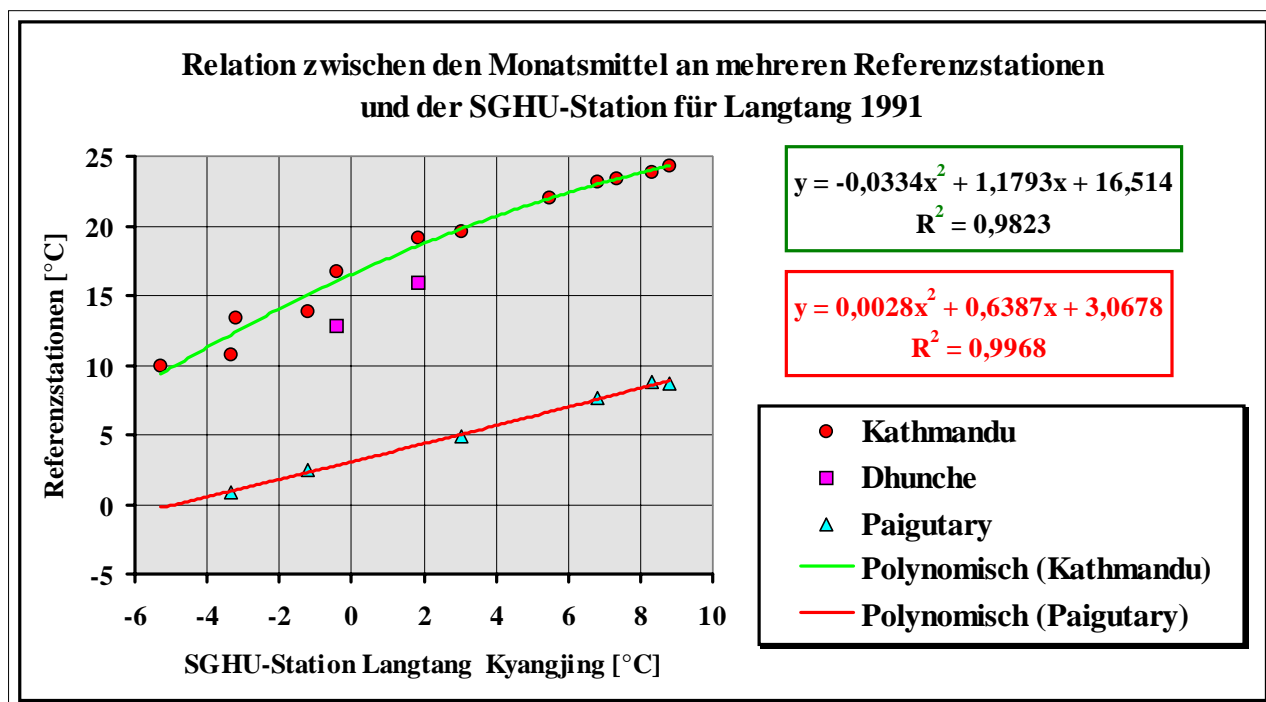


Abb. 13: Empirische Beziehungen zwischen der SGHU-Station Kyanchjing (3920m) und den Klimastationen Kathmandu Airport (1336m) und Paigutary (ca. 3400m) für das Jahr 1991

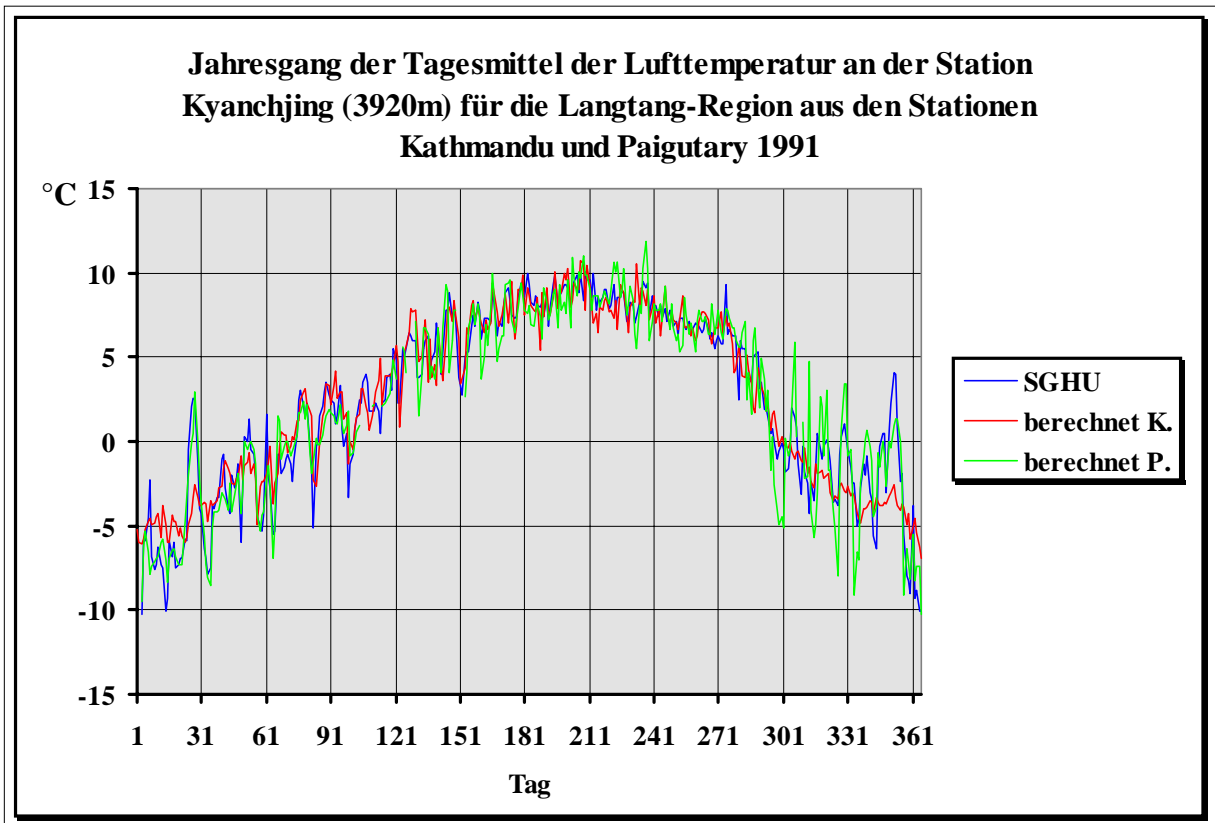


Abb.14: Jahresgänge der extrapolierten Temperaturreihen im Vergleich zu den gemessenen Werten in der Region Langtang für das Jahr 1991

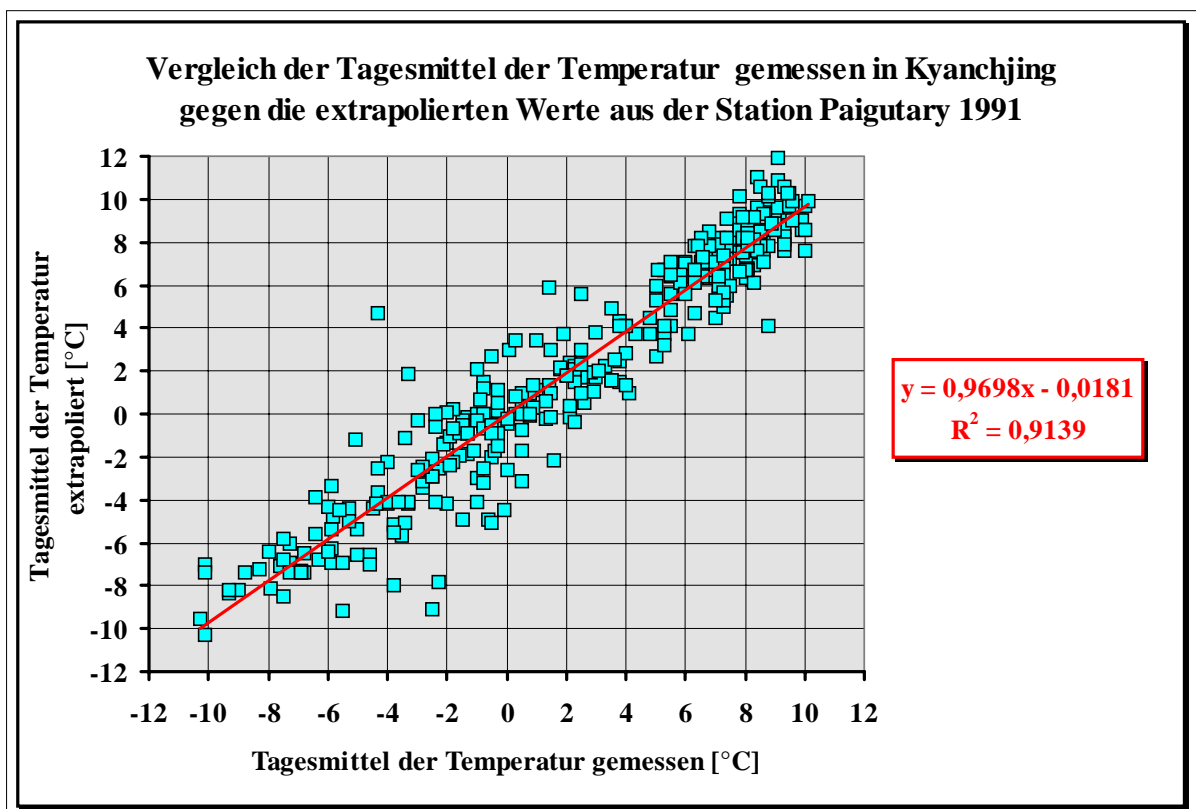


Abb. 15: Güte der Extrapolation aus den Daten der Station Paigutary (ca. 3400m) 1991

Die Anwendbarkeit des Konzeptes zur Ergänzung von Lücken in den Temperaturdaten in weiteren Regionen von Zentralnepal ist prinzipiell gegeben, wenn auch nicht immer in der gleichen Qualität. Die *Abbildungen 11* und *12* zeigen ein nicht so optimales Beispiel aus der Khumbu-Region im Jahre 1991. Die Parameter der empirischen Funktion für die Daten der Klimastation Okhaldhunga liegen deutlich außerhalb des für die Methode günstigen Wertebereichs. Die Krümmung der Kurve ist zu groß, dass der Scheitelpunkt der Parabel innerhalb des Wertebereichs der Station Dingboche zu liegen kommt. Dementsprechend schlecht ist auch die Extrapolation der Daten in diesem Temperaturbereich. Sie zeigt eine unrealistisch hohe Varianz. In diesem Fall greift man besser auf die Werte der Station Chialsa zurück, die realistischere Ergebnisse der Extrapolation liefert. Die Station Okhaldhunga scheint generell wenig gemeinsame Charakteristiken mit der Station Dingboche zu haben. Mit den Klimadaten von Chialsa aber können Lücken mit der nötigen Genauigkeit ergänzt werden.

In der Langtang-Region werden die erforderlichen Kriterien für die Extrapolationsmethode wieder besser erfüllt. Die *Abbildungen 13* bis *15* zeigen ebenfalls die Ergebnisse für das Jahr 1991. Interessant ist dabei, dass in diesem Gebiet mit der Station Paigutary eine relativ hochgelegene Referenzstation zur Verfügung steht (ca.3400m, die genaue Höhe konnte bislang nicht ermittelt werden). Es zeigt sich, dass mit Hilfe deren Daten die großen Schwankungen an der Station Kyanchjing in der Trockenzeit wesentlich besser erfasst werden als über das ferne Kathmandu. Deshalb ist die Übereinstimmung zwischen extrapolierten und gemessenen Werten (*Abbildung 15*) deutlich besser als bei anderen Stationen. Allerdings ist immer noch eine relativ hohe Streuung festzustellen. Die Daten liegen auch nicht für den gesamten Zeitraum vor. Man beachte ferner den Unterschied gegenüber der linearen Regression in *Abbildung 3*. Die bessere Übereinstimmung rechtfertigt auch bei hochgelegenen Stationen die Anwendung der Beziehung (3).

2.3 Weiterführende Überlegungen

Anhand der Beispiele konnte gezeigt werden, dass die einfache Extrapolationsmethode zu brauchbaren Ergebnissen führt, solange nicht allzu lange Datenlücken in der Temperaturmessung gefüllt werden müssen. Mit Hilfe der weitgehend vollständigen Datensätze der drei untersuchten Einzugsgebiete lässt sich das Verfahren gut überprüfen. Mit den dabei gewonnenen Erkenntnissen könnten unter Umständen auch die sehr langen Lücken in den Datensätzen der Einzugsgebiete Humla, Kanchiroba und Makalu geschlossen werden. Dazu sind einige Zusatzuntersuchungen zur Verallgemeinerung des Regressionsansatzes notwendig, da dort nicht immer genug Messwerte für eine Regressionsanalyse mit der erforderlichen Genauigkeit vorhanden sind. Die Regressionsparameter müssen daher teilweise durch Analogieüberlegungen bestimmt werden. Aber immerhin stehen auch in diesen Gebieten vereinzelt Messungen zur Überprüfung des erweiterten Verfahrens zur Verfügung.

Die in dieser Studie gezeigten Ansätze erscheinen primitiv, da lediglich empirische Beobachtungen eingehen und die physikalischen Zusammenhänge nicht direkt behandelt werden können. Allerdings sind in der Grenzschichtmeteorologie empirische Ähnlichkeitsansätze nicht selten. Im Rahmen der Erweiterung der Methode auf die drei weiteren Einzugsgebiete könnte die Frage nach der Allgemeingültigkeit des hier verwendeten empirischen Ansatzes weiterverfolgt werden. Ein Fernziel wäre dabei, Eingangsdatensätze für das **ETH5**-Modell aus den Daten der Klimastationen auch für Regionen zu gewinnen, an denen bislang keine Messungen durchgeführt werden oder auch durchführbar sind. Dazu wäre zunächst einmal die Kenntnis über die Grenze der Genauigkeit der Eingangsdaten vonnöten, bis zu der das korrekt kalibrierte **ETH5**-Modell noch hinreichend realistische Simulationen liefert. Diese Frage könnte anhand der inzwischen nach bestem Wissen und Gewissen vervollständigten Eingangsdaten der Regionen Annapurna, Khumbu und Langtang geklärt werden.

Von den Erkenntnissen aus diesen Untersuchungen hinge die weitere Vorgehensweise ab. Erweist sich die Genauigkeitsschranke als sehr hoch, sind weitere Maßnahmen zur Verbesserung der Genauigkeit der Extrapolation nötig. Eventuelle Ansätze könnten spektraler oder gar fraktaler Art sein. Im finanziellen Rahmen dieser Studie konnten derartige Untersuchungen nicht ansatzweise durchgeführt werden. Sind die Ansprüche des **ETH5**-Modells jedoch nicht so hoch, könnte auch das bereits vorhandene Verfahren soweit ausgebaut werden, dass es auch Zeitreihen an einem beliebigen Ort liefert. Dazu müssen die jetzigen Regressionsparameter auf andere Weise ermittelt werden. Nach rudimentären Vorstudien liefern die Gradienten der Referenzstationen untereinander einen erfolgversprechenden Ansatz dazu. Allerdings wären dazu zusätzlich die Kenntnis des mittleren Temperaturgradienten in der freien Atmosphäre erforderlich. Dieser könnte eventuell den auch in Nepal durchgeführten Routinesondierungen oder auch den Modellen des Wetterdienstes entnommen werden.

In diesem Zusammenhang stellt sich sofort die Frage, warum man die Temperaturgänge nicht direkt mit einem mesoskaligen Modell bestimmt. Dies würde auf gar keinen Fall zu genaueren Ergebnissen führen, denn jedes Modell muss zunächst mit Messdaten initialisiert werden. Und kein Modelloutput kann besser sein als die Initialisierung. Es handelt sich um zwei völlig verschiedene Problemstellungen auf unterschiedlichen Ebenen. Zunächst benötigt man ein Modell, mit dem man fehlende Information aus den Messungen möglichst realistisch ergänzen kann. Der einzig wahre Weg wäre in diesem Fall, die Dichte der Messungen zu erhöhen.

3. Die Extrapolation des Niederschlags

An fast allen Klimastationen in den nepalesischen Untersuchungsgebieten sind die gemessenen Niederschlagsreihen sehr lückenhaft. Dies gilt leider auch für die **SGHU**-Stationen, an denen in vielen Fällen die Niederschlagsreihe sogar über Zeiträume von mehreren Monaten unterbrochen ist. Aber gerade die täglichen Niederschlagssummen sind eine besonders wichtige Eingangsgröße für das **ETH5**-Modell. Deshalb muss ein gangbarer Weg gefunden werden, diese Fehlwerte realistisch zu rekonstruieren.

In welcher Form der Niederschlag gefallen ist, ob als Regen oder Schnee, ist zunächst einmal ohne Bedeutung. Allerdings sind die Probleme bei der Niederschlagsmessung im Hochgebirge und sogar im Flachland hinlänglich bekannt, so dass kaum erwartet werden kann, dass die Messungen im Himalaya vertrauenswürdiger sein sollen als die in Europa. Fällt der Niederschlag in Form von Schnee, so muss beispielsweise davon ausgegangen werden, dass die Mengen infolge von Windverwehungen unterschätzt werden. Noch größer werden die Messfehler im geneigten Gelände (z.B. Möller, 1974). in der Klimatologie sind für gewöhnlich nur die Monatssummen oder besser die Jahressummen eine für Vergleiche geeignete Größe. Zu deren korrekter Bestimmung müssen die Messreihen jedoch lückenlos sein. Im günstigsten Fall stehen in Datensammlungen Tagessummen zur Verfügung, die zwischen zwei festen Terminen am Messinstrument abgelesen werden müssen. Ob diese Termine in dem zum Teil unwegsamen Gelände immer pünktlich eingehalten werden können, ist fraglich. Für klimatologische Fragestellungen ist dies auch von untergeordneter Bedeutung. Ein hydrologisches Modell mit einer zeitlichen Auflösung von einem Tag benötigt normalerweise den wirklichen 24-Stunden-Wert für eine korrekte Simulation. Dies gilt insbesondere in den Situationen, in denen der Niederschlag in flüssiger Form fällt und gleichzeitig die Speicher weitgehend gesättigt sind.

In Nepal sind die Niederschläge von kontinentalem Typ und überwiegend konvektiv. Das bedeutet, dass es eine ausgeprägte Trocken- und Regenzeit gibt und dass die einzelnen Niederschlagsereignisse meist zwar von kurzer Dauer, aber dafür sehr ergiebig sind. In der Trockenzeit sind Regenfälle sehr selten, in der Monsunperiode dagegen Trockenperioden nur sehr kurz. Diese Charakteristik ermöglicht überhaupt einen Ansatz zur Rekonstruktion der Niederschlagsreihe an einer Station mit täglicher Auflösung und einer einigermaßen realistischen Wahrscheinlichkeit. Dies ist eine Zielvorgabe, die unter europäischen Verhältnissen praktisch unmöglich erscheint.

Besitzt man allerdings den Ehrgeiz, die Niederschlagssumme binnen 24 Stunden an einer der nepalesischen **SGHU**-Stationen mit Hilfe der Daten einer Hand voll von willkürlich verteilten Niederschlagsstationen bis auf den Millimeter zu bestimmen, so wird man mit Sicherheit Schiffbruch erleiden. Bei einer Integrationszeit von 24 Stunden kann das einzelne Niederschlagsereignis nicht mehr betrachtet werden. Daher ist der regressive Vergleich der Niederschlagshöhen zweier Stationen auch über kurze räumliche Distanzen nicht mehr möglich. Auch in der Bundesrepublik gelingt der direkte Vergleich von Niederschlagsmengen an zwei direkt benachbarten Stationen mit einer Auflösung im Stundenbereich allenfalls in den Wintermonaten während Westwetterlagen (Weber, 1996), aber keinesfalls mehr im Falle von sommerlichen Konvektionsniederschlägen. Dann strebt die Korrelation gegen null, selbst wenn oder gerade weil man Tagessummen vergleicht. Konvektiver Niederschlag ist nicht nur ein boolesches *Ja/Nein*-Ereignis, sondern auch räumlich sehr heterogen verteilt. Für die Niederschlagsmenge pro Ereignis können allenfalls statistische Obergrenzen angegeben werden.

Die möglichen Kombinationen von lokalen Niederschlagsereignissen aus Ort, Zeit und Menge sind derartig umfangreich, dass die Ableitung der korrekten Niederschlagsreihe an einer Messstelle aus

den Messungen benachbarter Stationen dem Ziel der Vorhersage der Zahlen im Samstagslotto auf der Basis der bislang erfolgten Ziehungen entspricht. Es gibt aber einen höchst bedeutsamen Unterschied zwischen der Problemstellung dieser Studie und der Lottovorhersage: die Lottozahlen müssen exakt getroffen werden, sonst gibt es keinen Gewinn. Bei der Niederschlagsreihe ist es nach den nachfolgend erläuterten Überlegungen hinreichend, wenn die Situation nur annähernd realistisch erfasst wird, denn der kurzperiodische Niederschlag wirkt hier meist nur als Offset.

Fallen die Niederschläge in Form von Schnee, werden sie zunächst den Rücklagen zugeordnet und unter Umständen erst Wochen oder Monate später in Form von Schmelzwasser zum Abfluss beitragen. In diesem Fall ist also nur wichtig, dass die Schneemenge innerhalb eines längeren Zeitraums richtig erfasst wird. Strengere Maßstäbe müssen Niederschlägen in Form von Regen angelegt werden. Sind alle Speicher gesättigt, wird der Regen nach nur kurzer Verzögerung unverzüglich die Abflussmenge erhöhen. Wird das Regenwasser jedoch auch nur für einen kurzen Zeitraum zwischengespeichert, so wird die Niederschlagsspitze im Gang des Abflusses verschmiert, so dass auch hier nur die Gesamtregenmenge innerhalb eines kurzen Zeitraum von 2 bis 3 Tagen wichtig ist, nicht so sehr der Einzelwert binnen 24 Stunden. Bei der Abflussmodellierung mittels einem konzeptuellen Niederschlags-Abfluss-Modell wie dem **HBV3-ETH5** sind so viele weitere Einflussparameter maßgebend, dass die exakte Mengen- und Zeitzuordnung des Niederschlags nur ein Faktor unter vielen weiteren ist. Wichtiger ist für das Modell die zeitlich korrekte Bestimmung der Schmelzwasserproduktion, die aber eng an die Temperaturreihe gekoppelt ist. Dennoch sollte der Niederschlag natürlich auch zeitrichtig möglichst genau erfasst werden, damit auch die kurzperiodischen Schwankungen im Abflussverhalten realitätsnah simuliert werden können.

3.1 Die Methode zur Approximation der täglichen Niederschlagssummen

Da keine flächendeckenden zusätzlichen Informationen in Form von beispielsweise Feuchte- und Bewölkungsdaten mit hoher zeitlicher und räumlicher Auflösung vorliegen, bleiben zur Problemlösung eigentlich nur zwei einigermaßen erfolgversprechende Strategien:

- ◆ man findet entweder unter den Referenzstationen eine, an der praktisch die identischen Verhältnisse wie an der Zielstation herrschen, und extrapoliert mit einer ähnlichen Methode wie bei der Temperatur oder
- ◆ man stellt eine geeignete Statistik über eine Anzahl von Referenzstationen auf und bestimmt mit deren Hilfe aus dem gesamten Cluster der Referenzstationen die Wahrscheinlichkeit für Niederschlag an der Zielstation und dessen wahrscheinliche Menge.

Da sich für den ersten Lösungsweg keine einzige der Niederschlagsstationen als geeignet erwies, blieb nur der zweite Ansatz. Konvektive Niederschläge betreffen meist ein Gebiet mit einer Ausdehnung von nur wenigen Quadratkilometern. Dementsprechend sollte die Stationsdichte möglichst hoch sein, um eine aussagefähige Statistik über die flächenhafte Verteilung der Niederschläge zu gewinnen. Es stehen aber in den Untersuchungsgebieten jeweils nur maximal 7 Stationen für eine Analyse zur Verfügung. Das ist eine Stichprobe von sehr geringem Umfang. Anschließend wird das komplette Datenmaterial nach den vier folgenden Kriterien analysiert:

- ◆ **1. Bestimmung der mittleren täglichen Eintrittswahrscheinlichkeit für Niederschlag in Abhängigkeit von der Jahreszeit an jeder Station:** Das Kriterium dafür ist die Anzahl der Tage mit Niederschlag $> 1 \text{ mm}$ innerhalb eines Monats.

- ◆ **2. Bestimmung der Wahrscheinlichkeit für den übereinstimmenden Eintritt eines Niederschlagsereignisses an der Zielstation und einer Referenzstation in Abhängigkeit von der Jahreszeit:** Dazu wird die Anzahl der Fälle innerhalb eines Monats bestimmt, in denen es an beiden Stationen entweder geregnet hat oder niederschlagsfrei war.
- ◆ **3. Bestimmung des mittleren monatlichen Verhältnisses der Niederschlagsmengen an der Zielstation und jeder Referenzstation:** Dieser Quotient liefert ein Maß für die Menge Niederschlag, die an der Zielstation während eines Ereignisses zu einer Jahreszeit erwartet werden kann. Im Flachland findet man häufig den Trend einer Niederschlagszunahme mit der Höhe. Im Hochgebirge ist dieser Trend nicht mehr eindeutig. Dort spielen lokale Luv- und Leeffekte die dominierende Rolle für die Niederschlagsmengen. Außerdem kann die potentiell mögliche Niederschlagsmenge mit der Höhe nicht beliebig zunehmen, da der absolute Wassergehalt durch die Temperaturabnahme mit der Höhe ständig geringer wird. Deshalb ist die potentielle Niederschlagsmenge an sehr hoch gelegenen Zielstationen allgemein geringer als an den tiefer gelegenen Talstationen.
- ◆ **4. Bestimmung oder Abschätzung der aktuellen Monatssummen an der Zielstation in dem betreffenden Jahr:** Dieser Wert wird zum anschließenden Abgleich der Reihe benötigt, die möglichst die aktuellen Verhältnisse widerspiegeln soll. Es ist ein besonders heikler Punkt, denn häufig fehlen gerade zu dieser Bestimmung die Daten. Man kann unter Umständen eine Hochrechnung auf der Basis der vorhandenen Werte und der Niederschlagswahrscheinlichkeit durchführen. Ist dies nicht möglich, muss der Wert intuitiv geschätzt werden.

Auf der Basis dieser Informationen wird die tägliche Menge des Niederschlags P_S nach der folgenden Beziehung abgeschätzt

$$P_S = \frac{1}{N} K_m \cdot \sum_{i=1}^N (P_i \cdot F_{i,m} \cdot W_{i,m}), \quad (4)$$

wobei P_i den gemessenen Niederschlag an der Referenzstation i bedeutet, $F_{i,m}$ das mittlere Verhältnis der Niederschlagsmenge zwischen der Station i im Monat m und der Zielstation, $W_{i,m}$ die Gewichtung dieser Station im Verhältnis zu ihrer Wahrscheinlichkeit bei der Ereignisübereinstimmung. K_m ist ein Korrekturfaktor für die Wahrscheinlichkeiten. Die P_S werden anschließend mittels der über sie gebildeten mittleren Monatssumme in Verbindung mit der Niederschlagswahrscheinlichkeit auf die aktuelle Monatssumme an der Zielstation proportional abgeglichen. Ist diese nicht ermittelbar, wird sie geschätzt.

In der Theorie erscheint dieser Ansatz relativ einfach, die Anwendung auf die Datensätze der Einzugsgebiete Annapurna, Khumbu und Langtang ist in der Praxis aber höchst aufwendig, da die Ausgangsdaten sehr lückenhaft sind. Die Monatssummen können deshalb nicht in allen Fällen bestimmt werden. Oft werden auch die Niederschlagsmengen über mehrere Tage zu einem Tageswert zusammengefasst. Falls ein Tageswert in einer der Referenzstationen fehlt, wird die Station nicht berücksichtigt, was eine Reduzierung der Stationsanzahl N zur Folge hat. Zusätzlich müssen noch Schwellenwerte für die Begrenzung der Niederschlagsmengen auf realistische Werte eingeführt werden.

Die praktische Anwendung des Verfahrens wurde in Form eines PC-Programms realisiert, das die Ermittlung der statistischen Parameter und die Berechnung der Reihe ausführt. In vielen Fällen

reicht die Dichte der vorhandenen Messwerte nicht aus, um die Matrizen für die Koeffizienten **F** und **W** sowie die Monatssummen vollständig zu belegen. In diesen Fällen können sie objektiv ergänzt und neu eingelesen werden. Das Programm liefert ferner eine ereignisbezogene Statistik in Form von Klassen der Niederschlagsmengen. Mit Hilfe dieser Informationen können die Eingangsdaten auf Plausibilität geprüft werden und auch die Niederschlagssummen detektiert werden, bei denen ein längerer Zeitraum zusammengefaßt wurde. Prinzipiell könnten diese Informationen auch in die Bestimmung der Niederschlagswahrscheinlichkeiten eingehen und damit ein weiteres Kriterium für die Niederschlagsmenge im Einzelfall geschaffen werden. Da aber bei der Analyse nur ein einigermaßen vollständiger Datensatz über 4 Jahre zur Verfügung stand, wurde wegen der damit verbundenen statistischen Unsicherheit auf diesen Punkt vorläufig verzichtet.

Mittlere Monatssummen des Niederschlags 1991-1994 in der Region Annapurna

Monat	SGHU	Ghandruk	Lumle	Bhadaure D.	Lamachaur	Siklesh	Pokhara	Malepatan
1	43	16	40	20	26	49	17	22
2	87	49	47	10	34	61	29	38
3	136	25	56	15	13	46	45	43
4	336	44	86	30		122	96	132
5	90	135	305	312	621	269	336	401
6	203	511	786	564		472	576	526
7	236	610	1163	705	1234	572	894	983
8	321	1080	1500	878		857	841	976
9	147	369	911	693		427	638	646
10	28	27	183	118		92	174	212
11	8	23	20	12	0	20	3	6
12	29	20	18	12	6	27	15	11
Jahr	1664	2909	5115	3369	1934	3014	3664	3996
Faktor		0,5720	0,3253	0,4939	0,8604	0,5521	0,4541	0,4164
Höhe	3470	1960	1642	1600	1070	1820	827	856

Tab. 1: Mittlere Niederschlagssummen [mm] in der Annapurnaregion, die mittleren Jahressummen und das mittlere jährliche Verhältnis der Mengen zur SGHU-Station. Kursiv wiedergegebene Werte sind statistisch nicht gesichert. Die in Rot eingetragenen Werte sind Schätzungen.

Mittleres monatliches Verhältnis der Summen 1991-1994

Monat	SGHU	Ghandruk	Lumle	Bhadaure D.	Lamachaur	Siklesh	Pokhara	Malepatan
1	1,000	2,688	1,075	2,150	1,654	0,878	2,529	1,955
2	1,000	1,776	1,851	8,700	2,559	1,426	3,000	2,289
3	1,000	5,440	2,429	9,067	10,462	2,957	3,022	3,163
4	1,000	7,636	3,907	11,200	5,000	2,754	3,500	2,545
5	1,000	0,667	0,295	0,288	0,145	0,335	0,268	0,224
6	1,000	0,397	0,258	0,360	0,210	0,430	0,352	0,386
7	1,000	0,387	0,203	0,335	0,191	0,413	0,264	0,240
8	1,000	0,297	0,214	0,366	0,210	0,375	0,382	0,329
9	1,000	0,398	0,161	0,212	0,150	0,344	0,230	0,228
10	1,000	1,037	0,153	0,237	0,150	0,304	0,161	0,132
11	1,000	0,348	0,400	0,667	1,000	0,400	2,667	1,333
12	1,000	1,450	1,611	2,417	4,833	1,074	1,933	2,636

Tab. 2: Mittleres monatliches Verhältnis der Niederschlagssummen zwischen der SGHU-Station Machapuchare B.C. und den Klimastationen nach den Daten in Tabelle 1. Die kursiv wiedergegebenen Werte sind aus Schätzungen ermittelt.

Aus den Summen in *Tabelle 1* wurde die Matrix der mittleren Verhältnisse der Niederschlagssummen zu denen an der **SGHU**-Station bestimmt. Die in der *Tabelle 2* wiedergegebenen Werte gehen in der Beziehung (4) als $F_{i,m}$ ein. In der Monsunzeit ist die Variation nicht besonders groß, in der Trockenzeit dagegen sind die Werte eher unsicher, spielen aber in der Beziehung (4) wegen der geringen Niederschlagswahrscheinlichkeit eine untergeordnete Rolle.

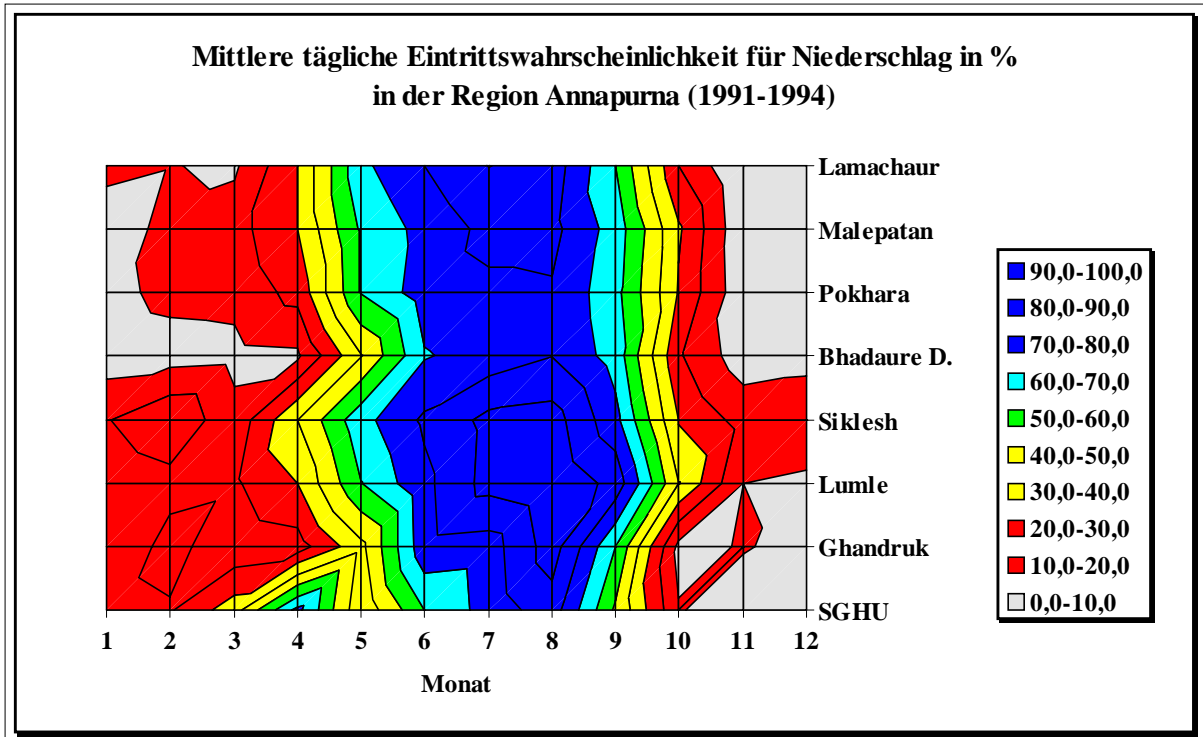


Abb. 16: Wahrscheinlichkeit für den Eintritt von Niederschlag in der Annapurna-Region

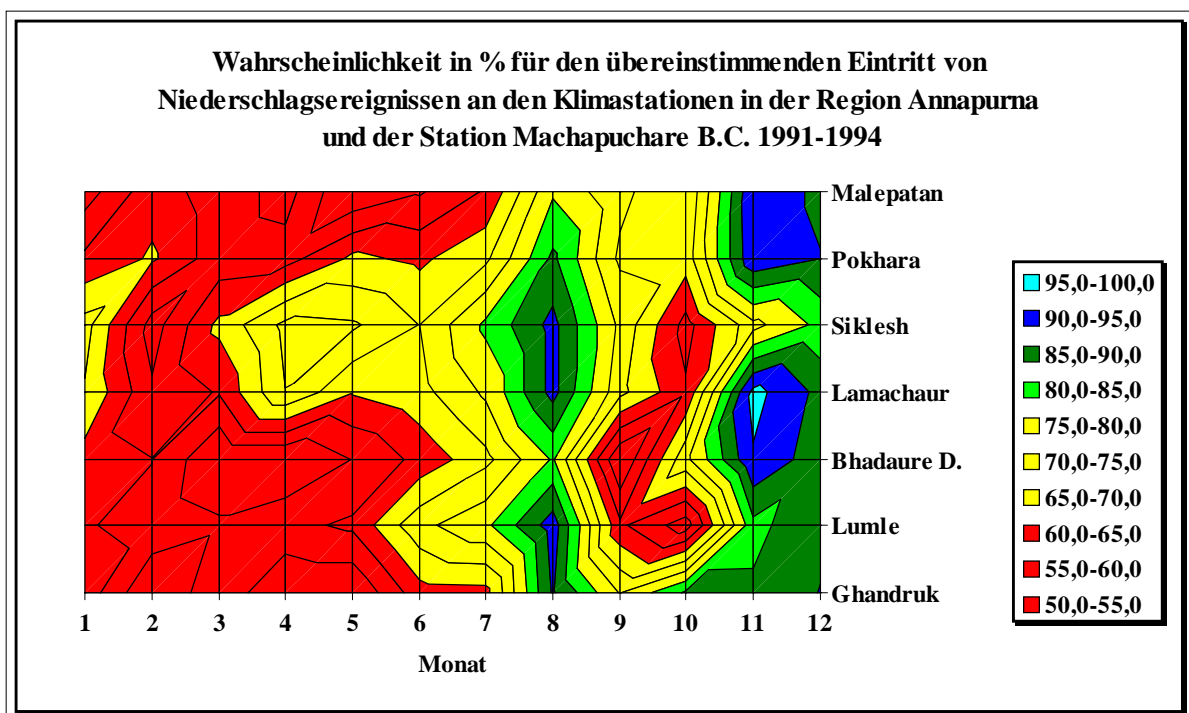


Abb. 17: Wahrscheinlichkeit dafür, dass das Ereignis „Niederschlag“ oder „kein Niederschlag“ übereinstimmend an der SGHU-Station und an den anderen Stationen beobachtet wird.

Die *Abbildung 16* zeigt in einer Isolinien-Darstellung die mittlere tägliche Eintrittswahrscheinlichkeit für Niederschlag im Untersuchungsgebiet der Annapurna-Region. Die Stationen sind von oben nach unten in der Rangfolge angeordnet, welche sich aus ihrer Aussagekraft bezüglich der Verhältnisse an der Station Machapuchare B.C. ergibt. Dabei stellt die räumliche Distanz ein Kriterium dar, ein weiteres aber auch die individuelle Lage innerhalb des Gebietes. Die Eintrittswahrscheinlichkeit ist in % angegeben. Sie kann auch als prozentuale Anzahl der Tage mit Niederschlag innerhalb eines Monats interpretiert werden. Demnach fällt zum Beispiel in Lumle während der Monate Juli und August praktisch an jedem Tag Regen, in Pokhara dagegen nur an 22 von 31 Tagen. Die Station Bhadaure-Deorali ist südlich von Lumle im Leebereich gelegen, deshalb ist dort die Niederschlagswahrscheinlichkeit durchgehend etwas geringer. Allgemein kann der *Abbildung* entnommen werden, dass in der gesamten Region die tägliche Wahrscheinlichkeit für Niederschlag in der Monsunzeit sehr hoch, in der herbstlichen Trockenzeit dagegen am geringsten ist. Die maximale Anzahl von Regentagen zeigt die Station Lumle. An der **SGHU**-Station muss auch im April nahezu an jedem zweiten Tag mit Niederschlägen gerechnet werden. Dies ist für den Rest der Region eher untypisch, obwohl auch dort von Januar bis April eine höhere Niederschlagsdisposition als im Frühwinter und Herbst festgestellt werden kann. Obwohl das Aprilmaximum aus den Daten der **SGHU**-Station mit hoher Signifikanz abgeleitet werden kann, sind in dieser Zeit die geschätzten Niederschlagsmengen mit dem höchsten Fehler behaftet, da die anderen Stationen die Anomalie weniger gut belegen.

Diese These bestätigt auch die *Abbildung 17*. Sie zeigt in einer zur *Abbildung 16* analogen Darstellung die Wahrscheinlichkeit dafür, dass an der Zielstation und an einer Vergleichsstation am gleichen Tag übereinstimmend Niederschlag bzw. Trockenheit beobachtet wurde. Es hebt sich keine Station hervor, welche die Verhältnisse bei Machapuchare B.C. besonders gut widerspiegelt. Wirklich gute Übereinstimmungen finden sich nur im Monsunmonat August und in den Trockenmonaten November und Dezember. In den erwähnten Zeiträumen gehen alle Referenzstationen praktisch mit gleicher Gewichtung in die Schätzung ein. In den restlichen 7 Monaten kann allgemein nur jeden zweiten Tag mit einer Übereinstimmung der Ereignisse gerechnet werden.

Als Beispiel zur Demonstration der Funktion des Algorithmus zur Rekonstruktion der Niederschlagsreihen an den **SGHU**-Stationen werden in den *Abbildungen 18* und *19* die Originalmessreihen (hintere Säulenreihe) der Station Machapuchare B.C. mit dem Ergebnis aus der Approximation (vordere Säulenreihe) für jeweils einen Zeitraum von 2 Monaten verglichen. Es handelt sich um Datenmaterial aus dem Jahr 1991, das besonders ausgedehnte Lücken aufweist. Wie bereits erwähnt, sind in den Jahrbuchwerten offenbar häufig Tagessummen über einen Zeitraum von mehreren Tagen willkürlich zusammengefasst. In der Realität verteilt sich deren Regenmenge aber über mehrere Tage. In der *Abbildung 18* wurden die plausiblen Summen der Originalwerte unverändert in die neu generierte Niederschlagsreihe übernommen, nicht plausible Mengen dagegen mittels des Algorithmus (4) auf die vorangegangenen Tage aufgeteilt. Ferner wurden echte Lücken ergänzt. Die neu entstandene Reihe zeigt mit Sicherheit nicht zu 100% die wahren Verhältnisse, gibt sie aber mit hoher Wahrscheinlichkeit und Plausibilität wieder.

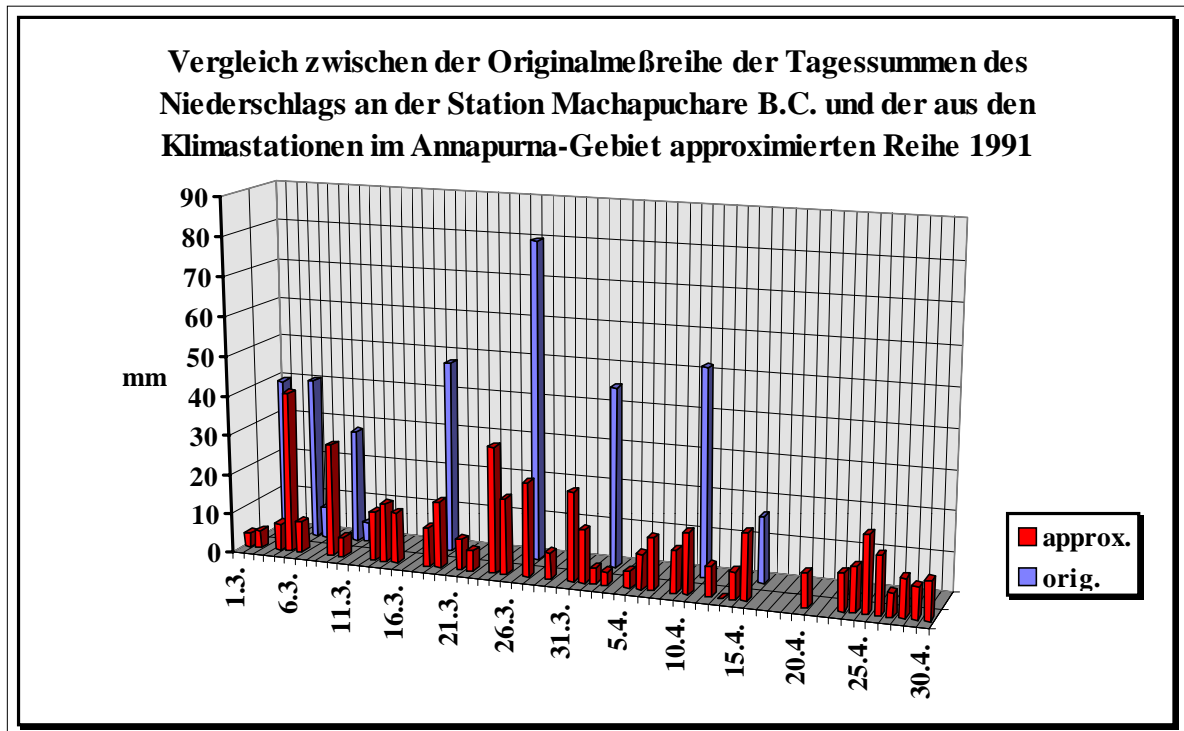


Abb 18: Beispiel für die Wirkung des Algorithmus zur Rekonstruktion der Niederschlagsreihe an der Station Machapuchare B.C. aus Daten der Klimastationen in der Annapurna-Region für einen Zeitraum im Frühjahr 1991. (Korrekte Tagessummen der Originalreihe sind übernommen)

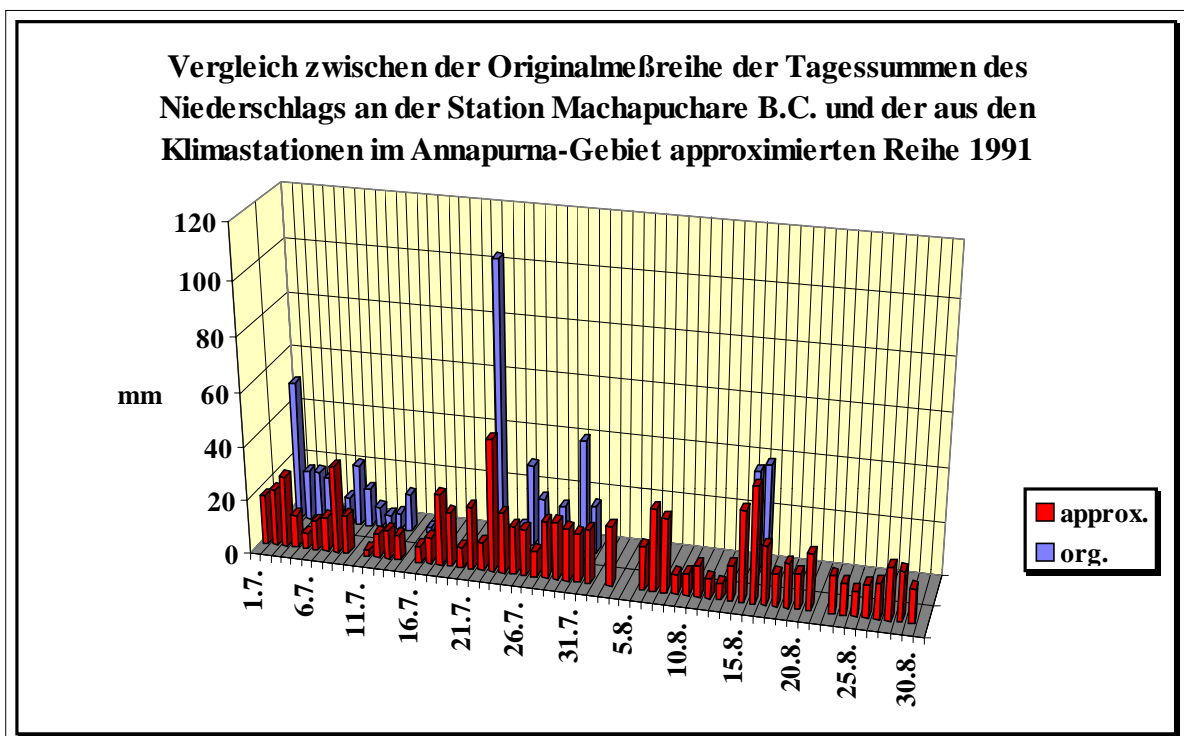


Abb 19: Beispiel für die Wirkung des Algorithmus zur Rekonstruktion der Niederschlagsreihe an der Station Machapuchare B.C. aus Daten der Klimastationen in der Annapurna-Region für einen Zeitraum während der Monsunzeit 1991. Hier sind die zum Teil mit Lücken behafteten Originalmessungen der rein aus der Synthese erhaltenen Reihe gegenübergestellt.

In der *Abbildung 19* wird der statistisch relativ hoch signifikante Zeitraum über die Monsunmonate Juli und August 1991 wiedergegeben. In diesem Beispiel sind im Gegensatz zur *Abbildung 18* die plausiblen Messwerte der Originalreihe nicht in die aus den Referenzstationen abgeleitete Reihe übernommen, sondern beide Reihen sind unverändert einander gegenübergestellt. Im Monat August sind aber nur an zwei Tagen Originalwerte vorhanden. Diese *Abbildung* dient somit auch als Demonstration zur Qualität des Verfahrens. Es zeigen sich teilweise beachtliche Abweichungen zwischen den Originalmessungen und den synthetischen Werten. Diese sind aber nicht weiter verwunderlich, denn die rekonstruierte Reihe basiert rein auf Wahrscheinlichkeiten. Es handelt sich nicht um eine Extrapolation wie bei der Temperaturreihe. Diese ist ja mangels gesicherter Korrelationen nicht durchführbar. Dennoch beschreibt die künstliche Reihe die Verhältnisse nicht völlig unrealistisch, zumal auch im Beispiel der *Abbildung 19* mindestens zwei Originalwerte Summen über mehrere Tage darstellen.

(Fortsetzung siehe Seite 29)

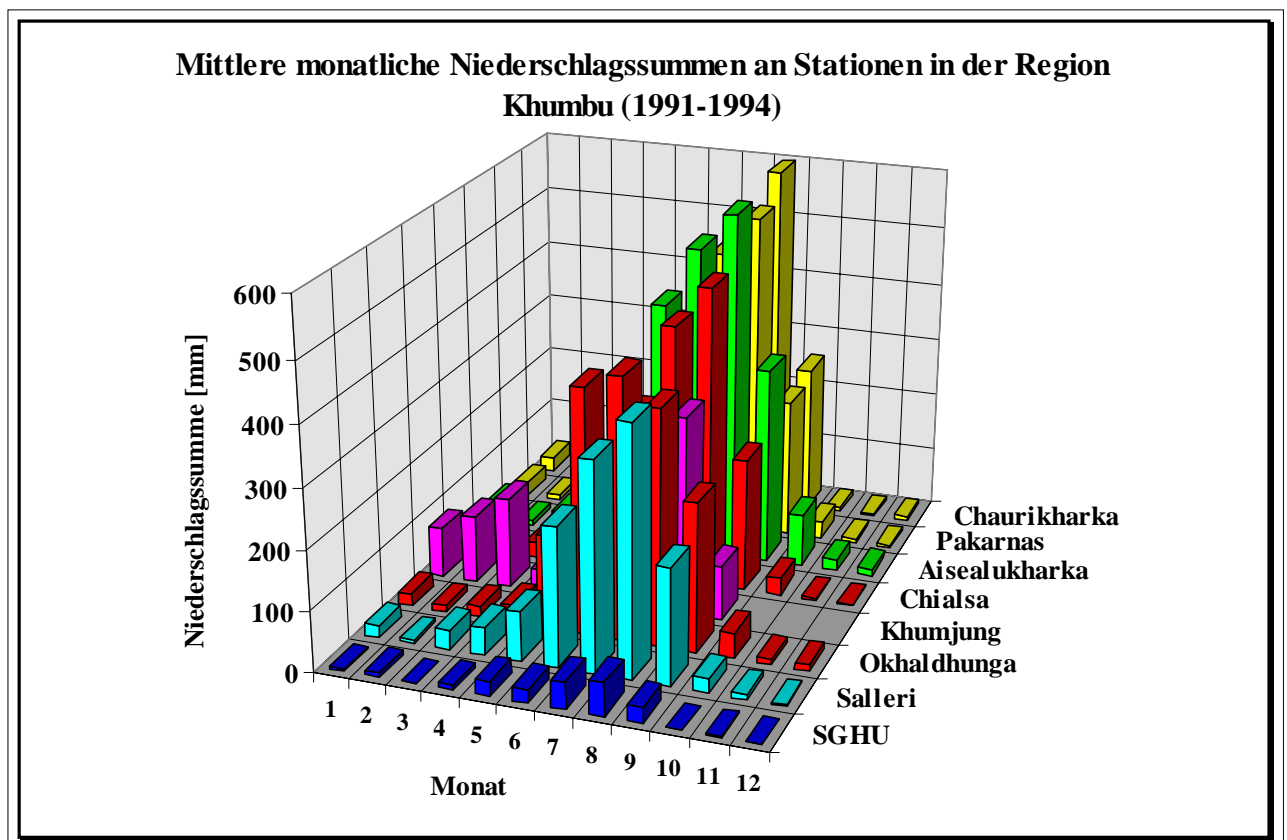


Abb. 20: Mittlere Monatssummen an 8 Stationen im Bereich der Region Khumbu 1991-1994

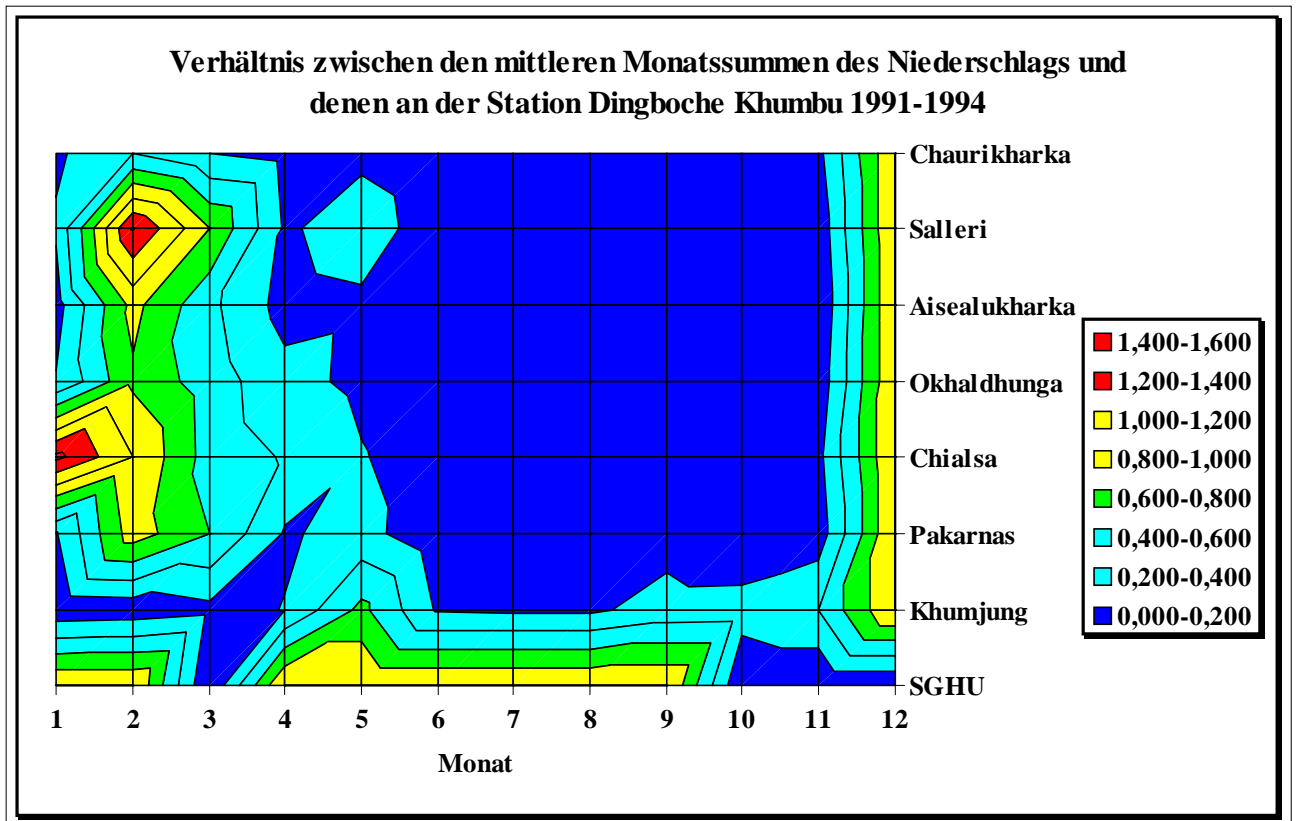


Abb. 21: Mittleres Verhältnis der monatlichen Niederschlagssummen zwischen der SGHU-Station Dingboche und den Referenzstationen in der Khumbu-Region über den Zeitraum 1991-1994

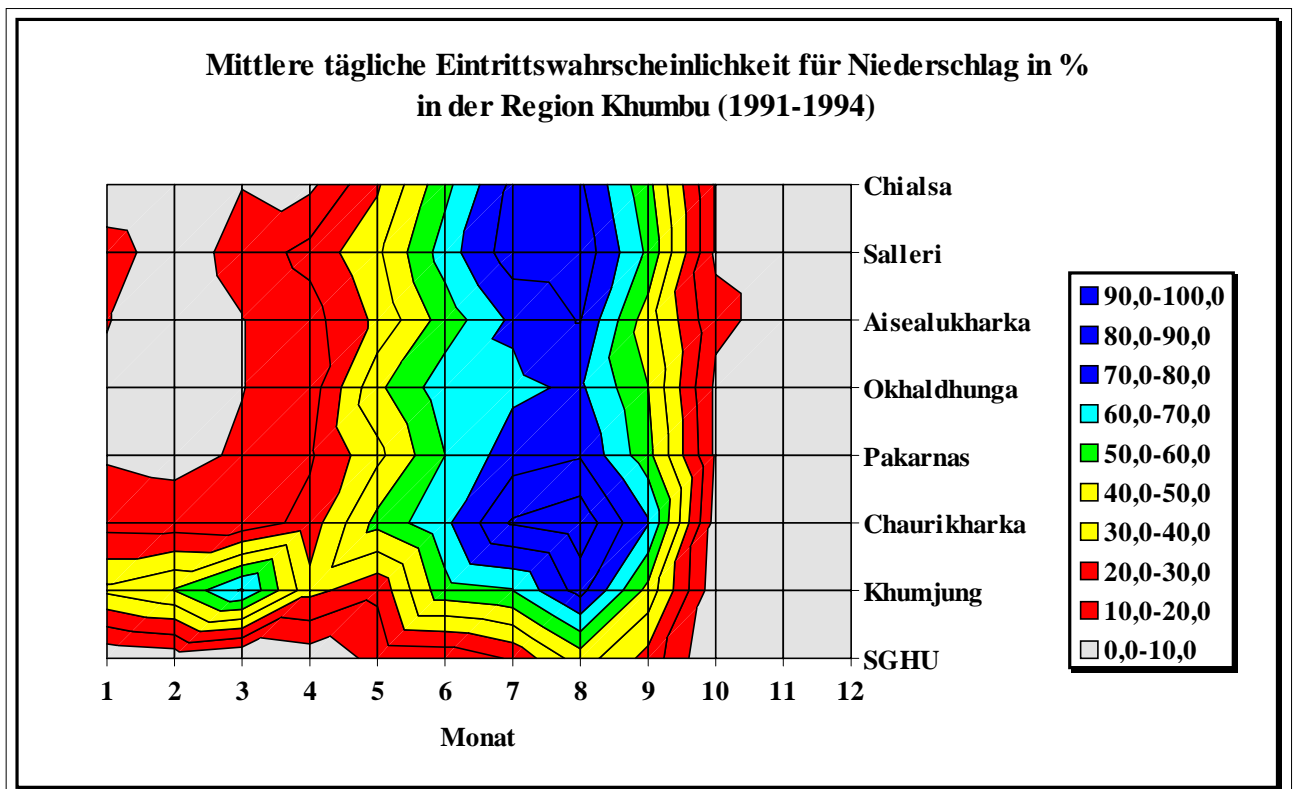


Abb. 22: Wahrscheinlichkeit für den Eintritt von Niederschlag in der Khumbu-Region 1991-1994

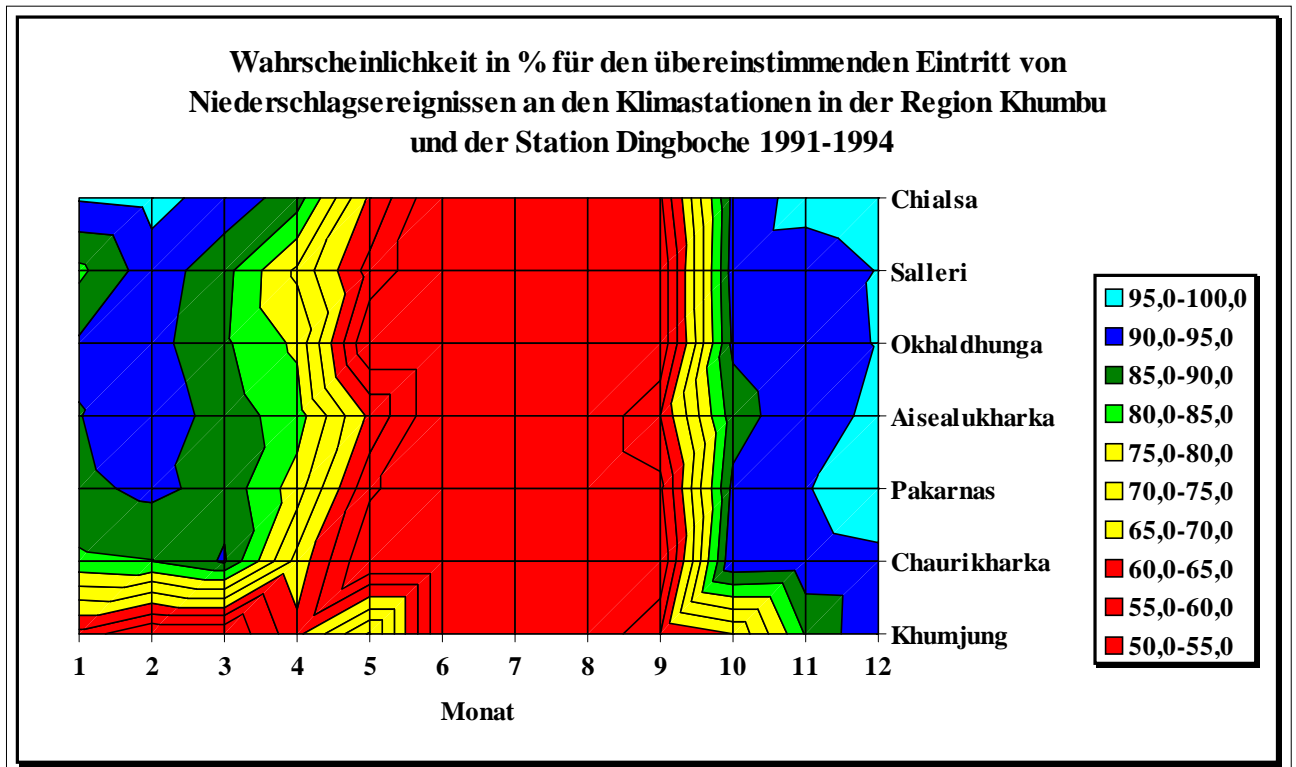


Abb. 23: Wahrscheinlichkeit dafür, dass das Ereignis „Niederschlag“ oder „kein Niederschlag“ übereinstimmend an der SGHU-Station Dingboche und an den anderen Stationen in der Khumbu-Region beobachtet wird

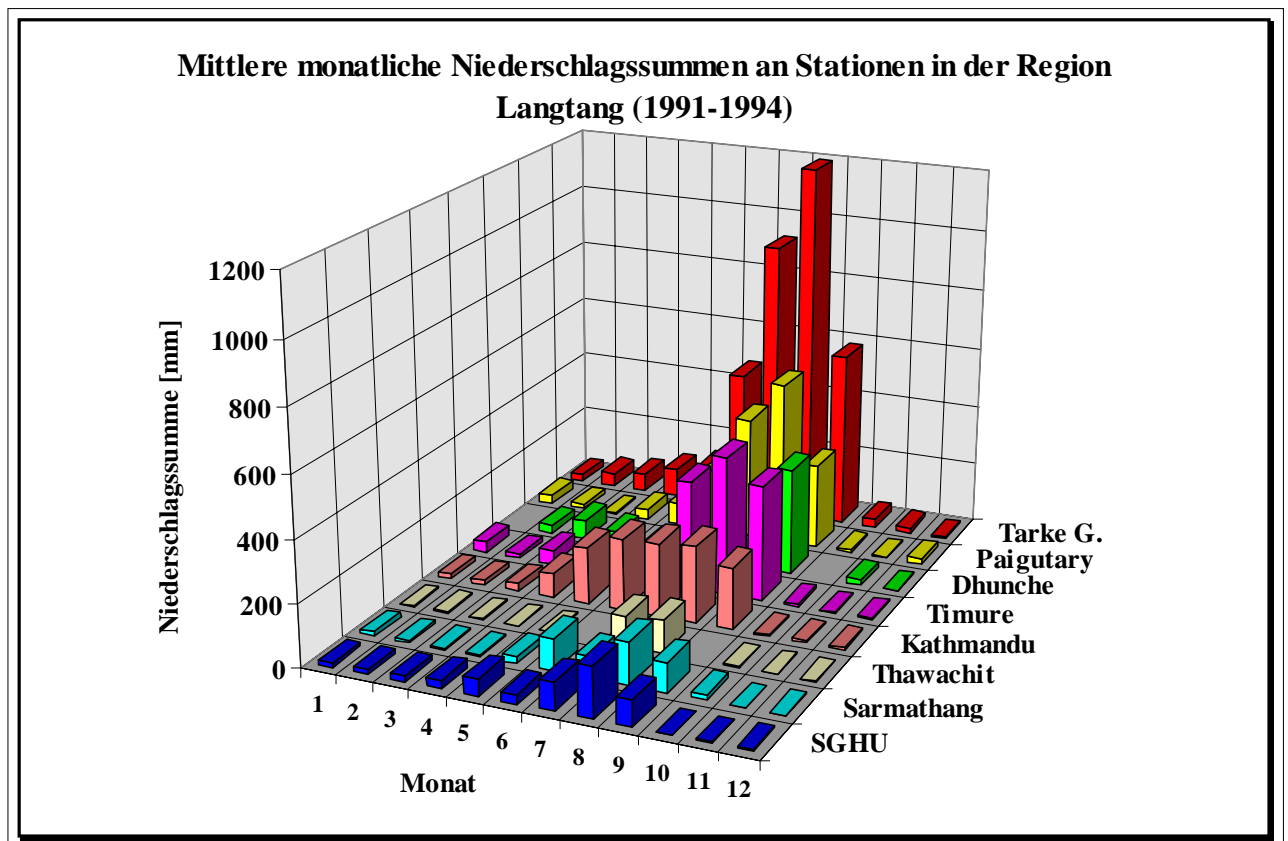


Abb. 24: Mittlere Monatssummen an 8 Stationen im Bereich der Region Langtang 1991-1994

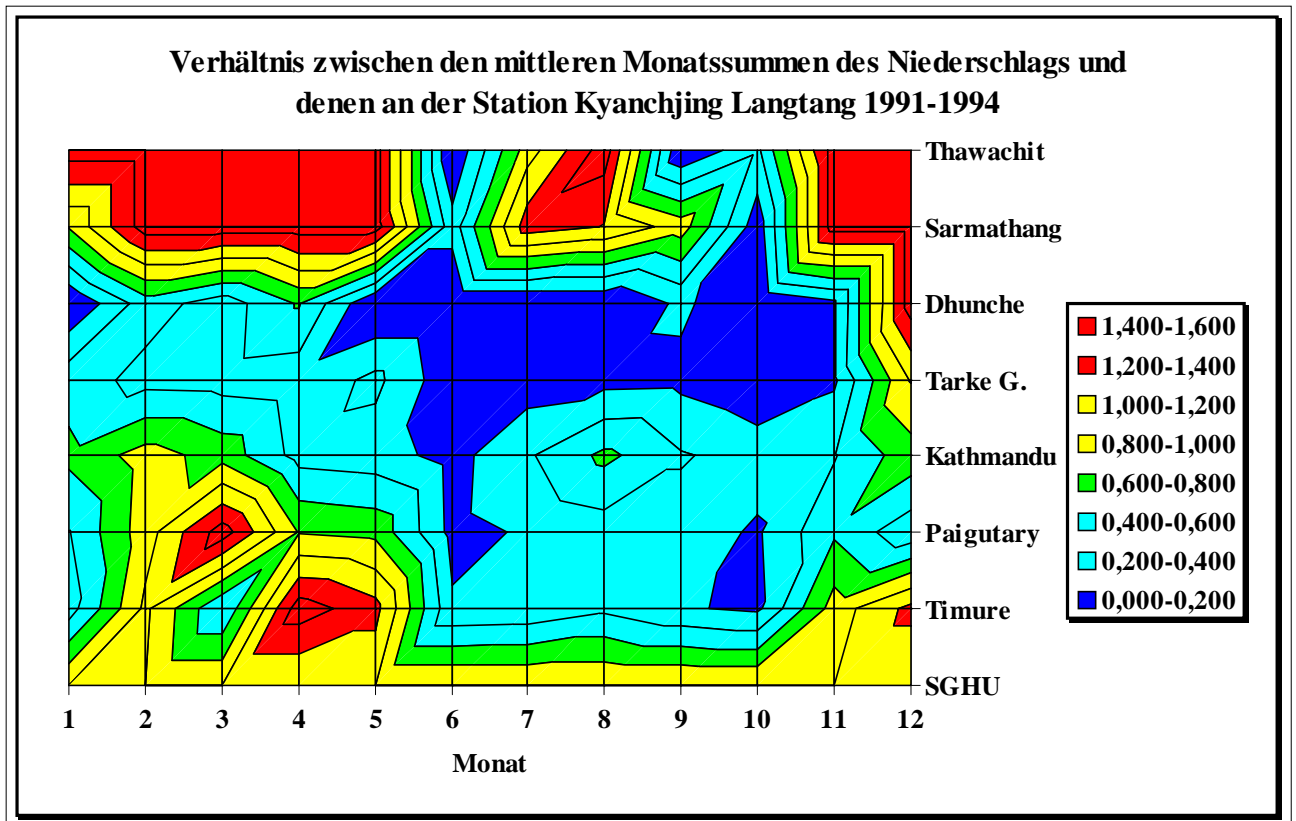


Abb. 25: Mittleres Verhältnis der monatlichen Niederschlagssummen zwischen der SGHU-Station Kyanchjing und den Referenzstationen in der Langtang-Region über den Zeitraum 1991-1994

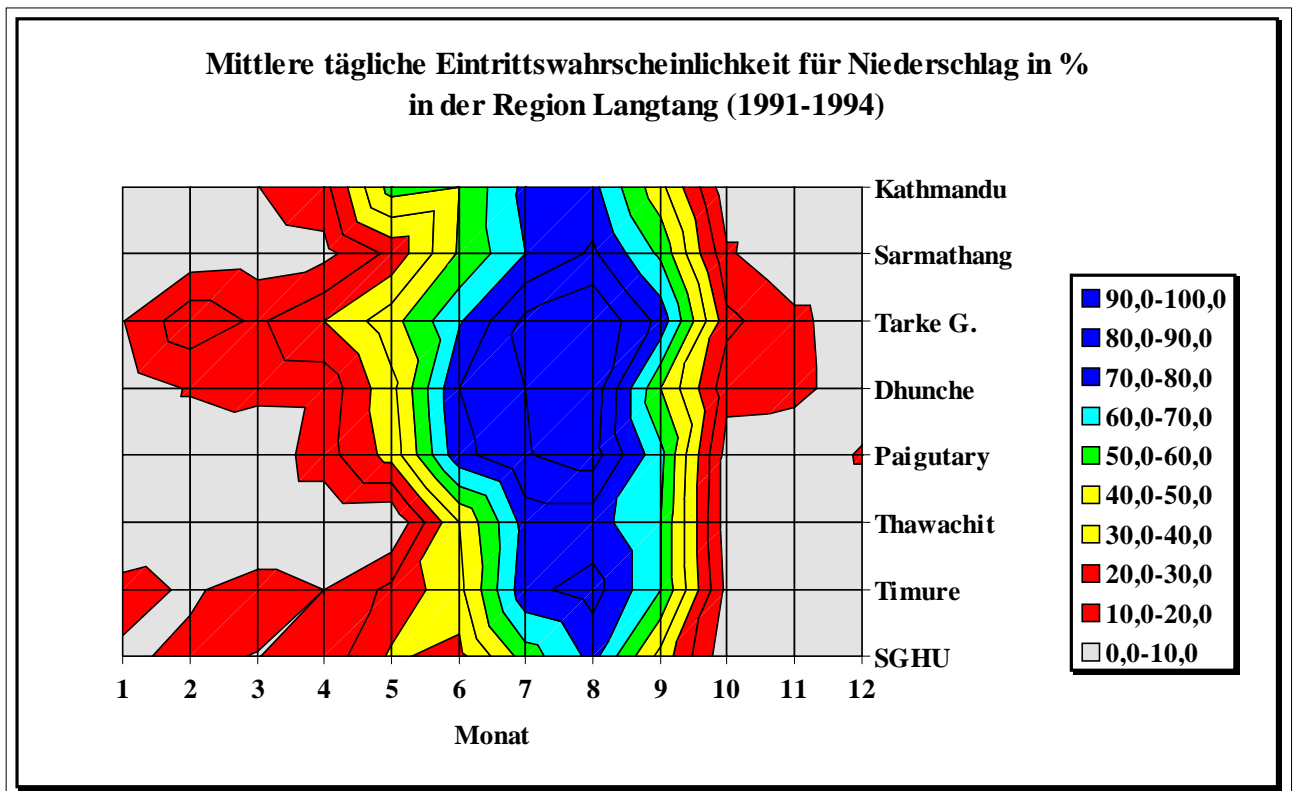


Abb. 26: Wahrscheinlichkeit für den Eintritt von Niederschlag in der Langtang-Region 1991-1994

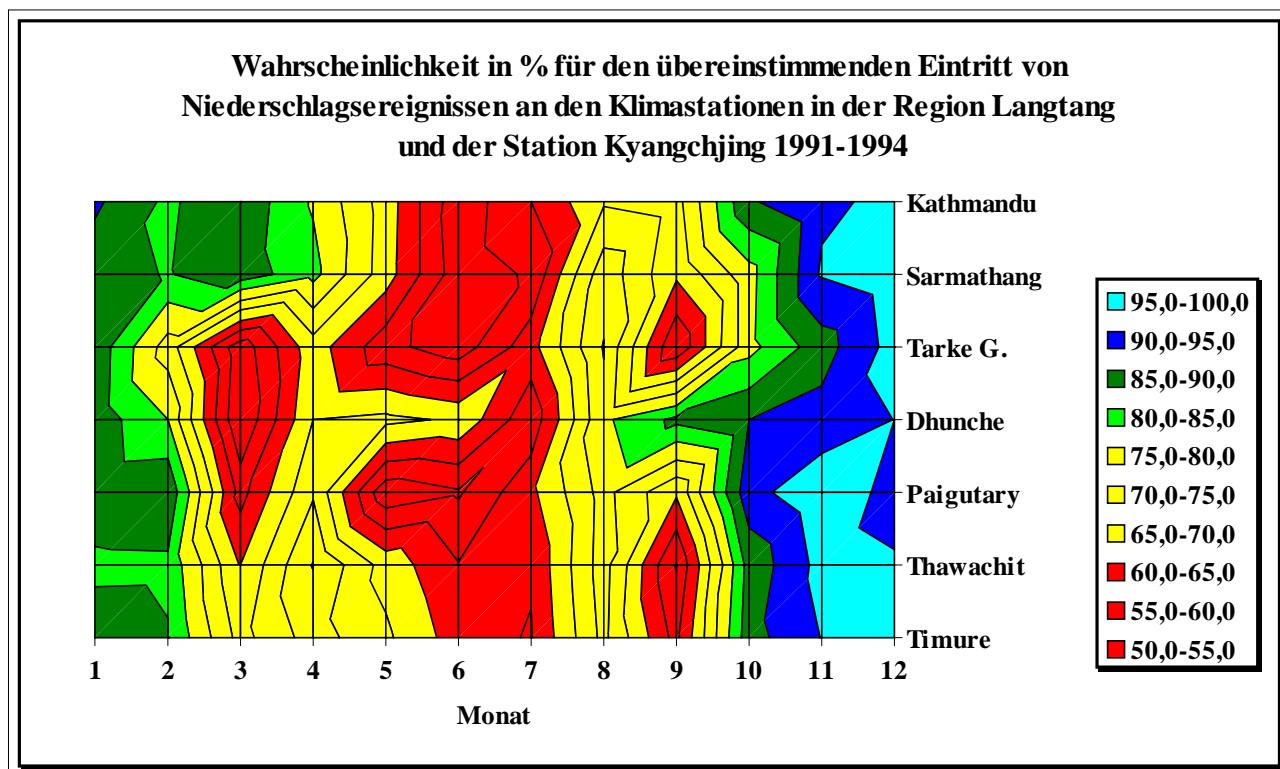


Abb. 27: Wahrscheinlichkeit dafür, dass das Ereignis „Niederschlag“ oder „kein Niederschlag“ übereinstimmend an der SGHU-Station Kyanchjing und an den anderen Stationen in der Langtang-Region beobachtet wird

(Fortsetzung von Seite 25)

Manche der Niederschlagssummen werden in guter Übereinstimmung zu den ursprünglichen Messungen wiedergegeben, wie beispielsweise um den 15.8., andere größere Summen auf zwei Tage aufgeteilt. In einigen weiteren Fällen verschiebt sich der abgeleitete Niederschlag um einen Tag vor dem in der Originalregistrierung oder auf den darauf folgenden Tag. Bei den Mengen ergeben sich keine gravierenden Abweichungen, da die Summen immer auf die aktuellen Verhältnisse abgeglichen sind. Die resultierenden Zeitverschiebungen in dieser Größenordnung haben für die Abflusssimulation nicht immer große Folgen, wie eingangs bereits erläutert wurde. Es muss auch berücksichtigt werden, dass die Niederschlagstätigkeit innerhalb der gesamten Region keinesfalls immer gleichzeitig und stationärer Natur ist. Ein Ereignis, das an mehreren Stationen im Gebiet stattfand kann sich auf Grund der Größe des betrachteten Gebietes durchaus mehrere Stunden früher oder später an der Zielstation auswirken. Dieser Effekt kann bei der statistischen Methode an keiner Stelle berücksichtigt werden. Fällt an irgendeinem Tag an einer Referenzstation am Abend Regen, so regnet es laut Algorithmus an der **SGHU**-Station am selben Abend, obwohl in der Realität das Niederschlagsereignis möglicherweise erst am nächsten Vormittag stattfindet. Auf diese Weise kann es selbst bei einer engen Kopplung zwischen Region und Zielstation zu zeitlichen Verschiebungen der approximierten Niederschlagssummen kommen.

Diese künstliche Anbindung der lokalen an die regionalen Verhältnisse muss nicht unbedingt schlecht sein. Es darf nicht vergessen werden, dass im eigentlich betrachteten Modellgebiet außer an der **SGHU**-Station keine weiteren Messungen zur Sicherung von deren Repräsentativität für das Areal vorliegen. Möglicherweise liefert daher die mehr regionalisierte Information sogar die realistischen Ergebnisse. Auf jeden Fall ist die regionale Information besser als gar keine Information.

Die Annapurna-Region ist außerordentlich niederschlagsreich. Die beiden anderen Einzugsgebiete Khumbu und insbesondere Langtang sind im Bereich der SGHU-Stationen dagegen geradezu trocken. Sie zeigen deshalb etwas einfachere und einheitlichere Verhältnisse. In den *Abbildungen 20 bis 23* werden die statistischen Parameter zur Rekonstruktion der Niederschlagsreihe für das Khumbu-Gebiet dargestellt, in *Abbildung 24-27* dasselbe für die Langtanggebiet. Auch in diesen Regionen findet sich keine Niederschlagsstation, die ausgesprochenen gut die Verhältnisse an der SGHU-Station wiedergibt. Hohe Übereinstimmungswahrscheinlichkeiten (*Abbildung 23 und 27*) finden sich analog zu den Bedingungen in der Annapurna-Region nur in der Trockenzeit. In der Khumbu-Region sind die Talstationen auch in der Monsunzeit wenig repräsentativ für die Bergstation. Die Bilder zur Eintrittswahrscheinlichkeit (*Abbildungen 16, 22 und 26*) ähneln sich für alle drei Untersuchungsgebiete. Die Matrizen mit den Verhältnissen der monatlichen Niederschlagssummen zur SGHU-Station dagegen zeigen dagegen sehr individuelle Strukturen.

3.2 Weiterführende Überlegungen zur Verallgemeinerung der Methode

Ein Manko bei der hier demonstrierten Methode zur Ableitung der Niederschlagsreihen ist sicherlich die nur unzureichend abgesicherte Statistik über vier Jahre. Eine umfangreichere Datenstichprobe würde die Signifikanz der gebietstypischen Charakteristiken sicherlich erhöhen und damit möglicherweise zu einer realistischeren Approximation der Niederschlagsreihen führen.

Im Gegensatz zu den Erkenntnissen bei der Temperaturextrapolation können für die Parametersätze zur Extrapolation des Niederschlags zumindest in den untersuchten Einzugsgebieten kaum universelle Eigenschaften abgeleitet werden. Die Konstanten der Matrizen müssen jeweils individuell aus den Messungen abgeleitet werden. Dazu müssen hinreichend Messungen zu deren statistischen Absicherung verfügbar sein. Prinzipiell sind sogar reale Messungen an der Zielstation zur Ableitung von aktuellen monatlichen Niederschlagssummen und Aussagen zur Niederschlagshäufigkeit unverzichtbar bzw. eine Voraussetzung. Damit sind der universellen Anwendung der Methode zur Ableitung von Daten für fiktive Stationen sehr enge Grenzen gesetzt. Inwieweit die Parameter eventuell mit Hilfe von Analogieschlüssen mit hinreichender Genauigkeit abgeleitet werden können, bedarf noch weitergehender Untersuchungen. Ein erster Ansatz läge in der Anwendung auf die noch ausstehenden Untersuchungsgebiete Humla, Kanjiroba und Makalu. Die Möglichkeiten zur Rekonstruktion der Datenreihe für die Makalu-Region ist auf Grund der Verfügbarkeit von Daten durchaus erfolgversprechend. Für die anderen beiden Gebiete ist die Datenlage jedoch so unbefriedigend, dass bereits dort eine ganze Reihe von Annahmen und Abschätzungen zu ihrer Bearbeitung erforderlich wären. Andererseits ist diese Vorgehensweise nach dem jetzigen Stand der Dinge die wohl einzige Möglichkeit, um auch für diese Regionen einen kompletten Datensatz zu erhalten, der die Durchführung von Abflusssimulationen mittels dem HBV3-ETH5-Modell erlauben würde.

4. Zusammenfassung und Empfehlungen

In der vorliegenden kurzen Studie wurde ein Verfahren zur Extrapolation der Tagesmittel und der täglichen Niederschlagssummen aus regionalen Klimadaten zur Ergänzung von Datenlücken in den Messreihen von hochgelegenen Gebirgsstationen in Nepal entwickelt und getestet. Es basiert weitgehend auf einfachen statistischen und empirischen Methoden. Weiterhin wurde es im Rahmen der Möglichkeiten erfolgreich auf die drei Untersuchungsgebiete Annapurna, Khumbu und Langtang angewandt und dort die Datenreihen nach bestem Wissen und Gewissen vervollständigt.

Die Methodik ist generell erweiterbar und kann sicherlich noch verbessert werden. Es ist zu erwarten, dass sie auch bei der Anwendung auf die stärker lückenbehafteten Datensätze in den Regionen Humla, Kanjiroba und Makalu brauchbare Ergebnisse liefern wird. Allerdings muss die Datenqualität der Referenzstationen in diesen Regionen mindestens in der gleichen Weise wie bei den behandelten Untersuchungsgebieten gewährleistet sein.

Der universelle Charakter der Ergebnisse bei der Temperaturextrapolation läßt die Möglichkeit einer generellen Erweiterung der Methode auch unter den Umständen, dass keine direkte Messungen am Zielort verfügbar sind, durchaus zu. Eine Extrapolation der Niederschlagsdaten in der gleichen Weise ist aber mittels der vorgestellten Methode ohne Informationen am Zielort noch nicht möglich. Inwieweit Analogieüberlegungen und zusätzliche Ergebnisse aus den anderen Untersuchungsgebieten in dieser Richtung weiterhelfen, muss zum jetzigen Zeitpunkt offen bleiben. Dieses Fernziel darf aber nicht aus den Augen verloren werden und muss schwerpunktmäßig weiterverfolgt werden, denn es liefert einen wichtigen Schlüssel für die Durchführung von allgemeinen Abflusssimulationen im gesamten Himalaya.

Bei dieser Studie stand die methodische Verfahrensentwicklung und der Test der Verfahren anhand konkreter Beispiele mehr im Vordergrund als die Erstellung operationeller Werkzeuge für Anwender, die mit der Materie nicht so sehr vertraut sind. Deshalb beschränkte sich die Entwicklung der notwendigen Computerprogramme mehr auf deren Funktionalität als auf eine bequeme und unkomplizierte Benutzerführung. In vielen Bereichen wurde auch verfügbare Standardsoftware eingesetzt, die zwar kurzfristig Programmierarbeit einspart, andererseits aber für den operativen Einsatz der Methodik nur bedingt geeignet ist und ein nicht unerhebliches Fachwissen voraussetzt. Sollten tatsächlich noch weitere Datensätze ergänzt bzw. untersucht werden, dann wäre es auf jeden Fall sinnvoll, die einzelnen Arbeitsschritte in Form eines benutzerfreundlichen Programmpaketes mit grafischer Oberfläche zu integrieren. Die operationelle Anwendung mit den derzeit verfügbaren Werkzeugen erfordert zunächst noch zuviel Spezialwissen und wäre schlichtweg zu aufwendig.

5. Literatur

Hormann, K. , **1994**, *Computer-based Climatological Maps for High Mountain Areas- New Methods and Their Application, with Examples from the Himalayas*
ICIMOD, MEM Series No 12, 31p

Hottelet, C., Braun, L., Lang H., **1996**, *Snow and Glacier Hydrology Project in Nepal - Follow-up of Subproject „Snow Cover Measurements and Runoff Simulations“ -Final Report -*
Kommission für Glaziologie der BAdW, München, 82p

Weber,M. , **1996**, *Landschaftspotential Klima und Luft im Schwäbischen Donauried Beitrag zum Gesamtökologischen Gutachten*
Ing.- Büro Zettler, Memmingen, 115p

ferner wurden als Datenquelle verwendet

die *Jahrbücher 1993 und 1994 , Supplement No. IV , Snow and Glacier Hydrology Section*

herausgegeben von

Department of Hydrology and Meteorology,
Hydrology Division
His Majesty´s Government of Nepal
Ministry of Water Resources

Weitere Informationen unter WWW.Glaziologie.de