

Nutzung von SAPOS-Referenzstationen zur Wettervorhersage und Klimaforschung

Gerd Gendt, Galina Dick, Sibylle Göbell, Markus Ramatschi, Christoph Reigber, Maria Tomassini

Zusammenfassung

Für Wettervorhersage und Klimaforschung ist eine genaue Kenntnis der atmosphärischen Wasserdampfverteilung besonders wichtig. Bestehende Defizite können durch den Einsatz der GPS-Technologie teilweise geschlossen werden. Nach einer kurzen Einführung in internationale Aktivitäten wird auf das GASP-Projekt, in dem ein System zur quasi-operationellen Bestimmung des Wasserdampfes in einem deutschlandweiten GPS-Netz realisiert wird, eingegangen. Validierungen mit verschiedenen Instrumenten und mit dem Lokal-Modell des Deutschen Wetterdienstes bestätigten eine erreichte Genauigkeit von 1–2 mm im Wasserdampfgehalt, was für die Anwendung in der Wettervorhersage ausreichend ist. Fallstudien zeigten bereits einen positiven Einfluss der Einbeziehung von GPS, es bedarf jedoch weiterer Feinabstimmungen auf beiden Seiten.

Summary

For weather forecast and climate research an exact knowledge of the atmospheric water vapor distribution is very important. Existing shortcomings can partly be closed by the GPS technology.

After a short introduction into the international activities, the GASP Project, which will realize a quasi-operational determination of atmospheric water vapor in a German GPS network, will be described. Validations with different instruments and with the Local Model of the German Weather Service proved an obtained accuracy of 1–2 mm in the water vapor content, which is sufficient for application in the weather forecast. Case studies demonstrated already a positive impact of the use of GPS, however, further fine-tuning of both sides is necessary.

1 Einleitung

Zuverlässige Aussagen über mögliche anthropogen verursachte Klimaveränderungen sind ebenso wie die weitere Verbesserung operationeller numerischer Wettervorhersagen nur auf der Basis von Daten und Modellen mit hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung möglich. Insbesondere der Einsatz der verschiedensten Fernerkundungssysteme hat seit den späten siebziger Jahren nicht nur zu einer Verbesserung in der operationellen Wettervorhersage geführt, sondern auch unser Verständnis über das globale Klimasystem erheblich erweitert. Trotzdem gibt es immer noch Lücken in unserem Wissen über wichtige Detailprozesse des Wetter- und Klimageschehens. Sie sind vorwiegend auf die nicht ausreichend vor-

handenen oder zu ungenauen Messungen der relevanten atmosphärischen Parameter zurückzuführen. So ist beispielsweise unsere Kenntnis der globalen Wasserdampfverteilung – immerhin das wichtigste natürliche Treibhausgas in der Atmosphäre – noch unzureichend. Und seit Jahren geht die Zahl täglicher Temperaturmessungen in der oberen Atmosphäre – diese gilt als wichtiger Indikator für einen anthropogen verursachten Treibhauseffekt – kontinuierlich zurück.

Das Global Positioning System (GPS), das die Geodäsie im letzten Jahrzehnt durch die inzwischen erreichbare Sub-Millimeter-Genauigkeit bei der Bestimmung von Positionen und Geschwindigkeiten revolutioniert hat, entwickelt sich zu einem Kandidaten, der diese Defizite zu einem Teil schließen könnte. Mit der raschen Entwicklung permanenter globaler und dichter regionaler GPS-Bodennetze, verbunden mit verbesserten Kommunikationssystemen sowie mit der steigenden Anzahl von GPS-Empfängern an Bord niedrigfliegender Satelliten für die atmosphärische Limb-Sondierung bieten das GPS-System und zukünftige globale Navigationssysteme eine gute Aussicht, wertvolle Beiträge zur operationellen Meteorologie zu liefern. Dank ihres permanenten, wetterunabhängigen und kalibrationsfreien Monitorings atmosphärischer Parameter könnten diese Systeme zudem wichtige Informationen zur Klimabeobachtung liefern.

Durch die Analyse der von Bodenstationen empfangenen GPS-Radiosignale kann die Gesamtmenge des Wasserdampfes oberhalb der GPS-Empfangsstationen abgeleitet werden. Der Einsatz von GPS-Empfängern auf niedrig fliegenden, kleinen und daher vergleichsweise preiswerten Satelliten ermöglicht die Messung vertikaler Profile von Temperatur, Druck und – in der Troposphäre – Feuchte. Die theoretisch erreichbaren Messgenauigkeiten sind mit denen der traditionellen meteorologischen Messmethoden vergleichbar.

Nach einer kurzen Einführung in die zugrundeliegende Technik werden globale und regionale Projekte vorgestellt. Insbesondere wird dabei auf die Aktivitäten am GFZ innerhalb dieser Projekte eingegangen, wobei der Schwerpunkt auf dem »GPS Atmospheric Sounding Project« (GASP) liegt, und hier insbesondere auf der Nutzung von GPS-Bodennetzen. Das GASP-Projekt (Laufzeit 1999 bis 2002), das vom GFZ zusammen mit den Helmholtz Zentren AWI, DLR und GKSS initiiert wurde, bündelt die Expertise von GPS-Spezialisten, Klimaexperten und Meteorologen und kombiniert die boden- und satellitengestützte Anwendung der GPS-Technologie. Es wird in Kooperation mit dem Deutschen Wetterdienst (DWD),

dem Max Planck Institut für Meteorologie Hamburg und einer Vielzahl weiterer Partner realisiert. Mit diesem Projekt soll in Deutschland eine Infrastruktur für die meteorologische Anwendung aufgebaut und der Nutzen für die meteorologische Praxis und Forschung abgeschätzt werden. So soll vor allem eine quasi-operationelle Schätzung von troposphärischen Parametern realisiert und Verfahren zur Assimilation von GPS-Produkten in existierende globale und regionale Modelle sowohl für Klimastudien als auch zur numerischen Wettervorhersage entwickelt werden.

2 Grundlagen der GPS-Atmosphärensondierung

2.1 Wasserdampfschätzungen von GPS-Bodenstationen

Seit Beginn der 90er Jahre wird GPS zur Bestimmung des atmosphärischen Wasserdampfes genutzt (Tralli et al. 1992; Bevis et al. 1992; Rocken et al. 1993). Der Wasserdampf, der hauptsächlich in den unteren 3 bis 5 km verteilt ist, kann mit einer einzelnen Bodenstation nur in einem Radius von 7 bis 15 km gemessen werden. Der nur kleine Radius macht den Aufbau dichter Netze erforderlich. Das Produkt ist der vertikal integrierte Wasserdampf oberhalb der Station, zusätzlich können horizontale Gradienten (Bar-Sever et al. 1998) oder der integrierte Wasserdampf entlang des Weges zum Satelliten (sog. Slant-Delays) abgeleitet werden.

Die Mikrowellensignale auf den beiden Trägerfrequenzen (f_i) L1 und L2, die vom GPS Satelliten (*sat*) ausgesendet werden, erfahren auf dem Weg zum Empfänger (*rec*) am Boden eine Laufzeitverzögerung durch die Ionosphäre und die neutrale Atmosphäre.

$$L_i(f_i) = R_{geo} - \Delta_{ion}(f_i)_{rec}^{sat} + \Delta_{trop}_{rec}^{sat} + c \cdot (\Delta t_{rec} - \Delta t^{sat}) - \frac{c}{f_i} N_i + err_i; \quad i = 1, 2$$

R_{geo} – geometrischer Abstand sat-rec, c – Lichtgeschwindigkeit, Δt – Uhrkorrektur, N_i – Ambiguity, err_i – restliche Fehler

Die ionosphärische Refraktion ist dispersiv und wird gewöhnlich durch die Verwendung der beiden Frequenzen eliminiert. Die Refraktion in der neutralen Atmosphäre ist nicht dispersiv, und ihr Betrag kann nicht unmittelbar aus den Messungen abgeleitet werden. Hierzu ist eine Ausgleichung gemeinsam mit allen anderen Parametern erforderlich. Die »neutrale« Refraktion wird verursacht durch trockene Luft, Wasserdampf, Wolken und Regen, und ist proportional zu den Massen der spezifischen Komponenten entlang des Messweges. Die Verzögerung ist am kleinsten im Zenit und steigt etwa reziprok mit dem Sinus des Höhenwinkels. Diese Abhängigkeit wird

durch eine Mapping-Funktion beschrieben. Die totale atmosphärische Verzögerung (Delay) des GPS-Signals kann unterteilt werden in die beiden Anteile:

$$\Delta_{trop}_{rec}^{sat} = ZHD_{rec} \cdot m_{hyd}^{sat}(elev) + ZWD_{rec} \cdot m_{wet}^{sat}(elev)$$

wobei ZHD und ZWD = hydrostatischer bzw. feuchter Anteil im Zenit, m_{hyd} und m_{wet} = hydrostatische bzw. feuchte Mapping-Funktion. Die totale Verzögerung im Zenit (ZPD) ist dann die Summe von ZHD und ZWD . ZHD ist proportional der atmosphärischen Masse und beträgt etwa 2,5 m im Zenit. Die Verzögerung durch den Wasserdampf (ZWD) hat eine sehr viel höhere Variabilität und schwankt zwischen wenigen mm in ariden Gebieten bis 400 mm in feuchten Regionen. Die Refraktivität, die durch das Dipolmoment des Wassermoleküls verursacht wird, ist pro Mol etwa 17-mal größer als bei trockener Luft und kann daher leicht geschätzt werden. Der Einfluss von Wolken und Regen ist normalerweise klein und kann mit GPS nicht berechnet werden. In extremen Wetterlagen kann ihr Einfluss 10 % des ZWD betragen, normalerweise aber weniger als 5 % (Solheim et al. 1999).

Nachdem der ZPD mit mm-Genauigkeit aus den GPS-Daten bestimmt ist, kann durch Einführung von Druck und Temperatur an der Station eine Konvertierung in den integrierten Wasserdampf (IWV; als »precipitable water vapor« (PWV) in mm) vorgenommen werden. Als erstes wird der Bodendruck verwendet, um den ZHD -Wert zu berechnen und ihn vom ZPD zu subtrahieren. Der resultierende ZWD wird mit dem Faktor $\Pi(T_m)$ (etwa 1/6) in PWV umgerechnet. Für die Konvertierung muss die mittlere Temperatur der Atmosphäre bekannt sein. Verwendet man Vorhersagemodelle für T_m , so ist der Konversionsfehler kleiner als 1 %, und bei einer Regression aus der Oberflächentemperatur erhält man als typischen Fehler etwa 2 % (Bevis et al. 1992).

2.2 Limb-Sondierungen

Die zweite, Mitte der 90er Jahre erstmals angewandte Nutzung von GPS-Signalen in der Meteorologie erfolgt durch einen GPS-Empfänger an Bord eines niedrig fliegenden Satelliten (Melbourne et al. 1994). Ein Beispiel für dieses Messverfahren sind die Limb-Sondierungen, wie sie mit dem deutschen Geoforschungssatelliten CHAMP (Reigber et al. 2000) durchgeführt werden (Wickert et al. 2001). Während einer der GPS-Satelliten aus Sicht von CHAMP hinter dem Horizont der Erde untergeht (Abb. 1), durchlaufen die vom CHAMP-Empfänger empfangenen GPS-Radiosignale in immer kürzeren Abständen zur Erdoberfläche die Erdatmosphäre (zur Lösung von Uhrparametern werden noch Messungen eines Referenz-GPS-Satelliten und einer Bodenstation benötigt). Während einer solchen Okkultation, die etwa 1–2 Minuten dauert, durchstreift der Sichtstrahl die Atmosphäre zwi-

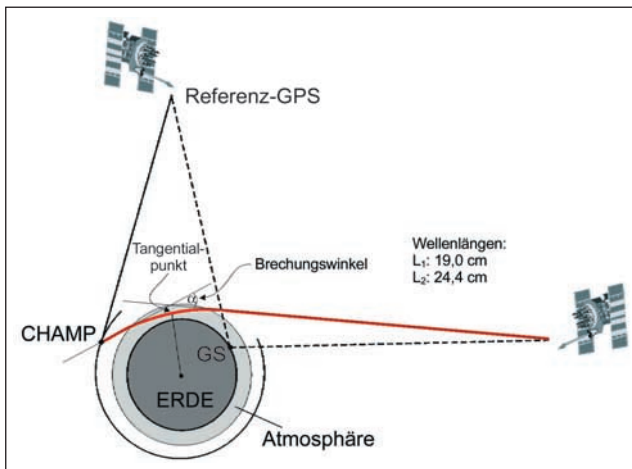


Abb. 1: Messprinzip von GPS-Radiookkultationen

schen 120 km Höhe und dem Boden. Längs des Strahls besitzen solche Limb-Sondierungen eine horizontale Auflösung von ca. 300 km; senkrecht dazu sowie in der Vertikalen eine Auflösung zwischen 500 m (in der Troposphäre) und 2 bis 3 km (in der oberen Stratosphäre).

Aufgrund der Brechung der Radiowellen in der Atmosphäre wird der Strahl auf seinem Weg durch die Atmosphäre abgelenkt. Unter Annahmen der geometrischen Optik lässt sich daraus der Brechungswinkel α und schließlich ein Profil des atmosphärischen Brechungsindex N als Funktion der geometrischen Höhe bestimmen. In besonders trockenen Regionen der Atmosphäre – etwa in der Stratosphäre, der Tropopausenregion oder polaren Breiten – lassen sich Druck und Temperatur als Funktion der Höhe mit beachtlicher Genauigkeit berechnen (1 bis 1.5 K; Rocken et al. 1997; Marquardt et al. 2001). Enthält die Atmosphäre in nennenswertem Maß Wasserdampf, liefert die Messung des Brechungsindex allein keine direkte Aussage über die üblichen meteorologischen Parameter mehr. Die Hinzunahme externer Information, etwa eines Temperaturprofils aus einer meteorologischen Analyse, erlaubt aber die Ableitung von Wasserdampfprofilen.

GPS-basierte Radiookkultationsmessungen stellen ein wetterunabhängiges Messverfahren für Temperatur,

Feuchte und Geopotential (durch Umrechnung der geometrischen Höhe) dar. Mit einem einzigen Satelliten können zwischen 200 und 250 Okkultationen pro Tag aufgenommen werden, und zwar auch über bislang datenarmen Regionen der Erde. Damit stellen Radiookkultationen eine wichtige Ergänzung zu dem vorhandenen globalen Mess- und Beobachtungsnetz der Meteorologie dar.

bodengestützt	satellitengestützt
■ wetterunabhängig ■ vertikal integriert (bzw. entlang des Weges) ■ horizontale Auflösung durch Netzdichte bestimmt ■ auf Kontinente und Inseln beschränkt (ggf. auf Bojen in Küstennähe)	■ wetterunabhängig ■ vertikale Profile ■ horizontal integriert (ca. 300 km) ■ globale Überdeckung (200 Profile/Tag/Satellit)

Tab. 1: Merkmale von boden- und satellitengestützten troposphärischen Schätzungen

3 Wasserdampf aus GPS-Bodennetzen

3.1 Internationale Aktivitäten

Im Rahmen des Internationalen GPS Service (IGS) wird seit 1997 routinemäßig ein Troposphärenprodukt erzeugt. Sieben IGS-Analysezentren berechnen mit maximaler Genauigkeit und einem Verzug von 3–4 Wochen die Troposphären-Lösungen in einem globalen Stationsnetz. Um die Zuverlässigkeit des Produktes zu erhöhen, werden die individuellen Beiträge zu einem kombinierten Produkt vereinigt (Gendt 2000; Gendt et al. 2000). Derzeit beinhaltet das Produkt etwa 200 Stationen (Abb. 2). Seit Mitte dieses Jahres gibt es ein analoges Produkt für ein verdichtetes europäisches Stationsnetz (EUREF-Netz, Abb. 3). Die IGS-Kombination wird am GFZ Potsdam sowie die EUREF-Kombination beim BKG und GFZ

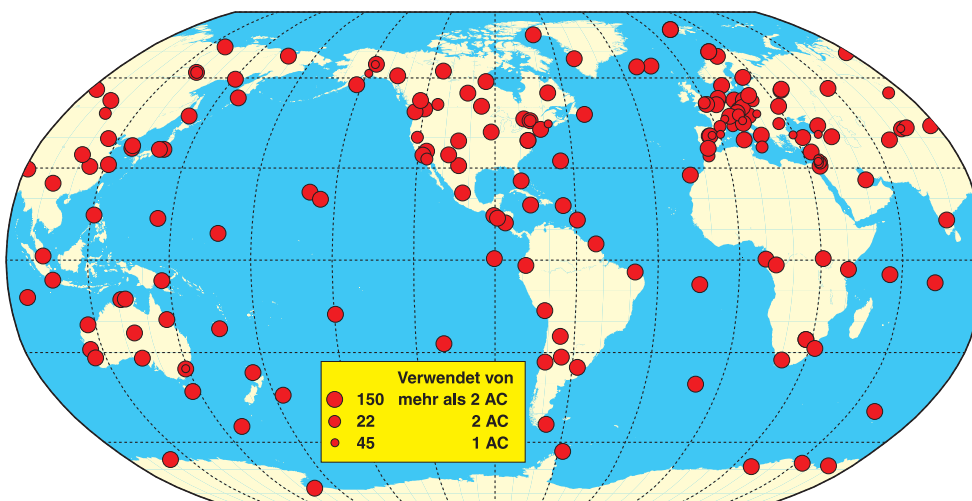


Abb. 2: IGS-Stationsnetz mit kombinierten ZPD-Produkten. Die Beiträge aller Analysezentren (AC) beinhalten Produkte für über 200 Stationen

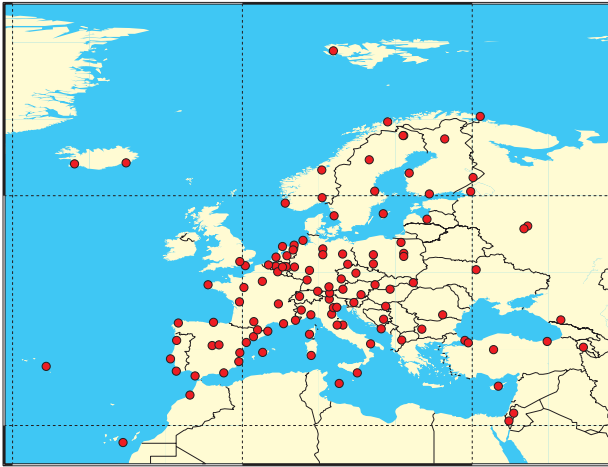


Abb. 3: EUREF-Stationsnetz, für das ab Mitte 2001 ein kombiniertes ZPD-Produkt zur Verfügung steht

durchgeführt. Die Produkte sind für Anwendungen in der Klimaforschung gedacht.

Mit den steigenden Möglichkeiten der operativen Auswertung von GPS-Netzen haben in vergangenen Jahren weltweit verschiedene Gruppen begonnen, die Nützlichkeit von GPS-Troposphären-Schätzungen für die numerische Wettervorhersage zu untersuchen.

Das umfangreichste Stationsnetz mit über 1000 GPS-Empfängern ist in Japan zur tektonischen Überwachung des Landes installiert worden. Wurden anfänglich geschätzte Troposphärenparameter nur zur Verbesserung der Genauigkeit der geodätischen Überwachung verwendet, so finden jetzt auch verstärkt Untersuchungen statt, um das Netz für die operationelle Meteorologie einzusetzen.

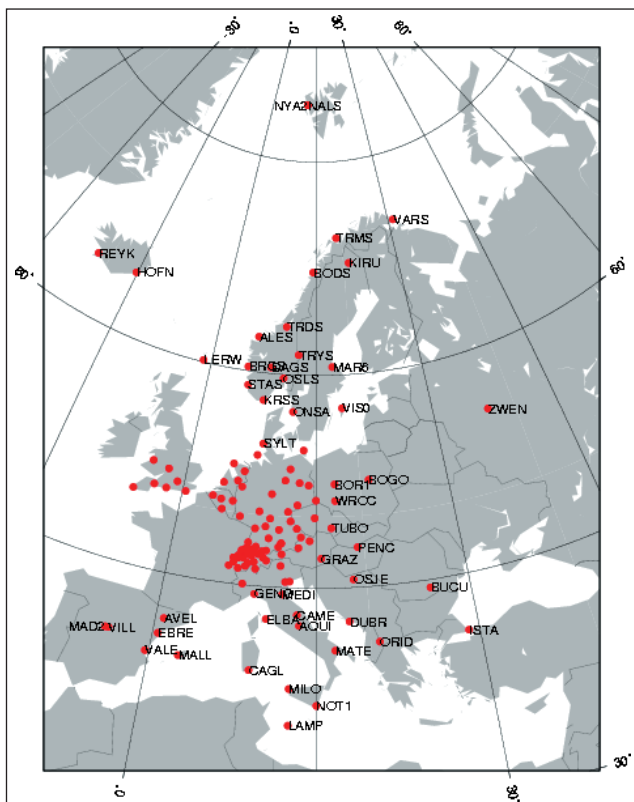


Abb. 4: Stationsnetz des Projektes COST-716

Hierzu zählen auch neueste Aktivitäten in den USA, in denen 55 GPS-Stationen seit Ende 1999 im Routinebetrieb ausgewertet und assimiliert werden, um den Einfluss auf die Qualität von Vorhersagen abschätzen zu können. Statistiken der ersten Monate (Gutman et al. 2001) haben gezeigt, dass beste Ergebnisse für die 3-Stunden-Vorhersage erzielt wurden, und das besonders in Situationen von schnellen Veränderungen wie beispielsweise Frontdurchgängen.

In Europa gibt es eine Reihe von Projekten wie z.B. WAVEFRONT, MAGIC und BALTEX, in denen koordiniert Untersuchungen durchgeführt werden, um die Optimierung der Verfahren zur Schätzung des Wasserdampfes aus GPS-Daten voranzutreiben und die Ergebnisse mit unabhängigen Verfahren und Modellen zu validieren. Während diese Aktivitäten vorrangig auf Untersuchungen der einzelnen Komponenten und Verfahren angelegt waren, wird mit der COST-Aktion-716 »Exploitation of ground-based GPS for climate and numerical weather prediction application« (1999–2003) eine neue Qualität angestrebt. So soll im Rahmen dieser Aktion die operationelle Anwendung der GPS-Technik demonstriert werden. Insbesondere kommt es darauf an, die Produkte zuverlässig in hoher Qualität und mit geringer Verzögerung zu berechnen und sie in die operationelle numerische Wettervorhersage einzubeziehen. Dies stellt nicht nur auf der GPS-Auswertestrecke, sondern bereits bei der Datengewinnung und Übertragung neue Anforderungen. Für eine Wettervorhersage sind großräumige Datenerfassungen erforderlich, so dass sinnvolle Ergebnisse nur in enger internationaler Kooperation zu erwarten sind. Insgesamt 14 Länder beteiligen sich an COST-716. Dabei wird erwartet, dass sich jedes Land mit der Einrichtung von GPS-Stationen (Abb. 4) und wenn möglich auch mit Datenanalysen und Assimilationsstudien beteiligt.

3.2 Aktivitäten im deutschen Projekt GASP – Nutzung von SAPOS-Stationen

Wie bereits in der Einleitung erwähnt, soll im Teilprojekt 1 von GASP ein System zur operationellen, kontinuierlichen Bestimmung des atmosphärischen Wasserdampfes in einem dichten, gut verteilten Netz von GPS-Bodenstationen in Deutschland realisiert werden (s. auch Reigber et al. 2002). Dessen Produkte sollen schließlich an Wetterdienste weitergeleitet werden und sowohl in der numerischen Wettervorhersage ihren Einsatz finden als auch zur Klimaforschung beitragen. Die wesentlichen Ziele sind

- NRT (near real-time)-Datengewinnung und Übertragung,
- Entwicklung von Techniken und Methoden für eine quasi-operationelle Bestimmung des vertikal integrierten Wasserdampfes,
- Entwicklung von Strategien für die meteorologische Praxis und Forschung.

In Deutschland existiert bereits eine große Zahl permanent arbeitender GPS Stationen. Das wichtigste und bekannteste dieser Netze ist das GPS-Referenzstationsnetz der Landesvermessungsämter, genannt SAPOS. Bereits heute sind über 200 Stationen in Betrieb und das endgültige Netz wird über dem Gebiet der Bundesrepublik Deutschland einen Stationsabstand von etwa 50 km haben. Diese Infrastruktur, aufgebaut für Vermessungs- und Navigationszwecke, kann mit relativ geringen zusätzlichen Aufwand für meteorologische Anwendungen nutzbar gemacht werden. Eine multidisziplinäre Nutzung umfangreicher Netze ist wegen der laufenden Betriebskosten und der ständig erforderlichen Modernisierung sinnvoll und daher unbedingt anzustreben.

Die Anzahl der im GASP-Projekt verwendeten Stationen wurde im Laufe der Projektbearbeitung ständig erhöht und beträgt derzeit etwa 120 (Abb. 5). Aufgrund der vorherrschenden Westwind-Wetterlage ist es sinnvoll, von den nichtdeutschen Stationen vor allem die niederländischen einzubeziehen. Die Daten der meisten Stationen liegen bereits nach wenigen Minuten am GFZ vor. Einige Stationen sind jedoch noch nicht an schnelle Internet-Verbindungen angeschlossen, so dass derzeit erst nach 25 Minuten mit der Analyse der Daten begonnen wird.

Die Anforderungen an die Bereitstellung der Ergebnisse für die numerische Wettervorhersage liegt momentan bei etwa 45 Minuten nach Abschluss der Messungen der letzten Stunde, sodass für die Auswertung noch etwa 20 Minuten verbleiben. Für die bereits recht große Stationsanzahl mussten daher effektive Methoden entwickelt und implementiert werden, die vor allem eine Parallelisierung der Verarbeitung auch unter Nutzung mehrerer Rechner gestatten. Die Daten werden in einem gleitenden Fenster von 12 Stunden verarbeitet, wobei in einer NRT-Anwendung die jeweils letzte Stunde das entscheidende Produkt darstellt. Als Voraussetzung für die NRT-Analysen müssen Vorhersagen der Satellitenpositionen mit möglichst hoher Genauigkeit (10–20 cm) bekannt sein. Unter Nutzung globaler GPS-Daten berechnet das IGS-Analysezentrum am GFZ mehrmals täglich diese Vorhersagen, in jüngster Zeit sogar alle drei Stunden. Die in NRT erzeugten Ergebnisse des gesamten GPS-Netzes werden unmittelbar dem DWD zur weiteren Verarbeitung übermittelt sowie eine ausgewählte Menge von Stationen dem COST-716-Projekt. Die zeitliche Auflösung der Produkte beträgt derzeit 30 Minuten.

Zusätzlich zu der NRT-Auswertung wird nach etwa zwei Wochen eine sogenannte 'post-processing' Lösung berechnet, die unter Nutzung der besten bekannten Parameter (Satellitenpositionen) auf einer üblichen tagesbasierten Analyse erfolgt. Diese mit maximaler Genauigkeit ermittelte Lösung dient zum einen den Studien in regionalen Wettermodellen (z. B. BRIDGE, BALTEX) und bietet zum anderen eine unmittelbare Möglichkeit, die NRT-Lösungen zu validieren. Dies ist zwar nur ein interner Konsistenztest, liefert aber wichtige Rückschlüsse auf die

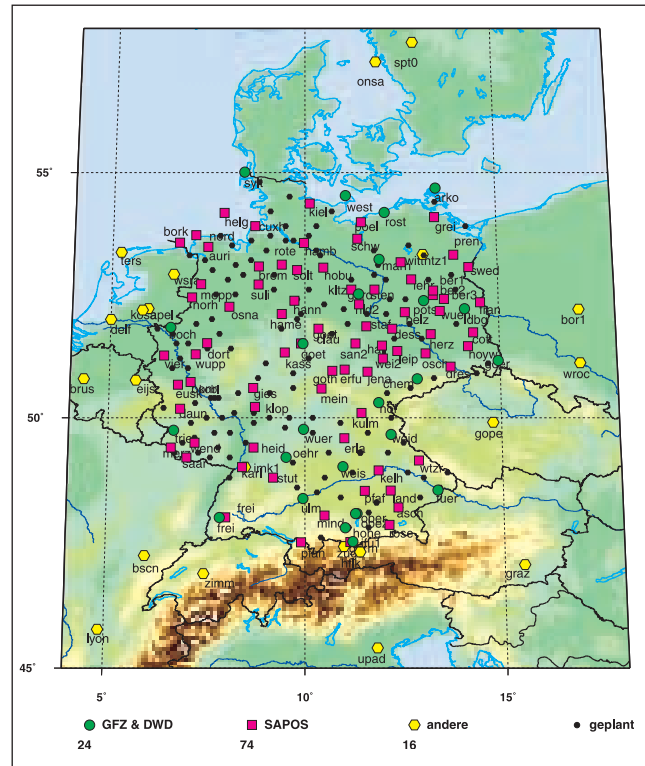


Abb. 5: Stationsnetz des Projektes GASP (Stand: Dez. 2001)

Verbesserung der operativen Auswertung. Die internen Vergleiche zeigen (Abb. 6), dass die NRT-Ergebnisse keine systematische Abweichung aufweisen. Der Bias ist im Mittel sehr klein und hat tägliche Schwankungen, die bis maximal 1 mm gehen. Die Streuung liegt bei etwa 1 mm und darunter.

Unabhängige Validierungen (Abb. 6) werden mit Wasserdampfadiometern, Radiosonden und mit Ergebnissen aus dem Lokal Modell des DWD durchgeführt. Der Vergleich mit einem Wasserdampfadiometer ist nur in Potsdam möglich, wo der DWD eine Station in 500 m Entfernung vom GPS-Punkt betreibt. Die Differenzen liegen sowohl im Bias als auch in der Streuung bei 1 mm und darunter; die beiden Techniken stimmen damit im Bereich ihrer Fehler miteinander überein. Ähnliches gilt auch für Radiosonden, die an der Station Lindenberg verglichen wurden. Die Differenzen sind nur geringfügig größer. Dabei sollte beachtet werden, dass Radiosonden vom Wind abgetrieben werden und die Messorte somit nicht identisch sind. Etwas größere Differenzen treten zum Lokalen Modell des DWD auf, die aber mit Werten von 1.5 bis 2.5 mm (für alle betrachteten Stationen) doch noch zufriedenstellend sind (Abb. 7). Die höheren Differenzen zum Lokalen Modell (LM) können in dem Sinne positiv interpretiert werden, dass die zukünftige Einbeziehung von GPS-Daten einen positiven Effekt auf die Analyse- und Vorhersagequalität liefern sollte.

Durch die kontinuierlich bereitgestellten Zeitreihen ist der größte Einfluss von GPS vor allem in einer besseren Modellierung des Tagesganges in der Wasserdampfverteilung und von schnellen Frontdurchgängen zu erwarten.

Abb. 6: Vergleich von NRT-Ergebnissen mit anderen Instrumenten und dem LM-Modell des DWD

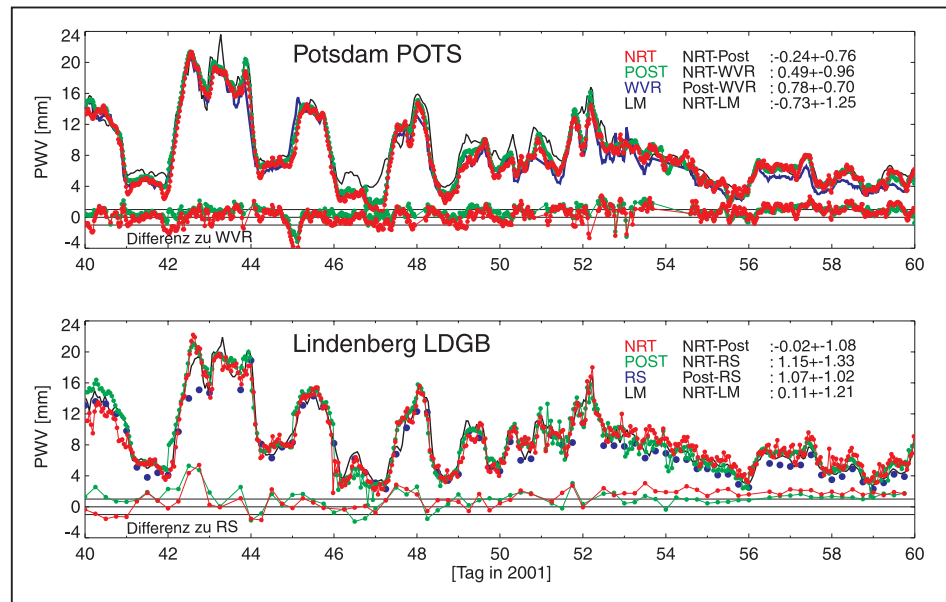
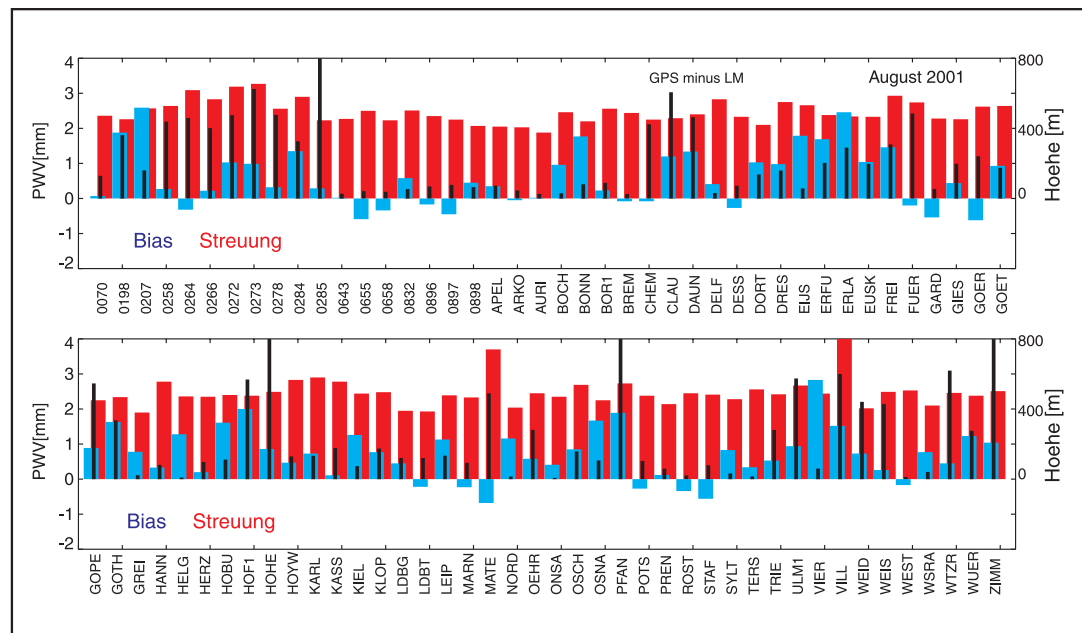


Abb. 7: Statistik der Differenzen zwischen GPS und LM-Modell für alle Stationen im August 2001. Die Höhe der Stationen ist angegeben



In Abb. 8 zeigen die Differenzen zwischen GPS und LM-Modell einen deutlichen Tagesgang. Dass die Probleme mit den Modelllösungen verknüpft sind, lässt sich aus der guten Übereinstimmung von GPS mit dem Wasserdampfradiometer (WVR) schließen.

Nachdem die Validierungen bestätigt haben, dass die Genauigkeit der GPS-Lösungen für eine Assimilation ausreichend ist, wurden numerische Experimente durchgeführt, um die Nutzung von GPS IWV im LM-Modell zu testen und zu tunen. Die aktuelle Version des LM, ein nicht-hydrostatisches Regionalmodell für Zentral- und West-Europa, hat eine horizontale Auflösung von 7 km und 35 vertikale Schichten. Die Einbeziehung der GPS IWV wurde nach Kuo et al. (1993) als ein »pseudo-beobachtetes« Profil der spezifischen Feuchte basierend auf der GPS-Lösung und der vertikalen Struktur aus dem Modell implementiert, d. h. es werden die Modellwerte bis

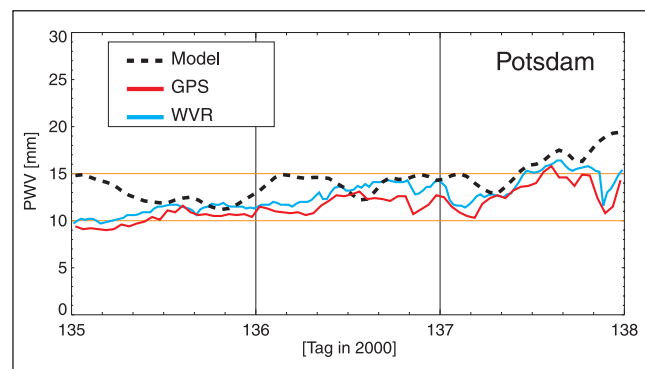


Abb. 8: Differenzen zwischen LM-Modell und GPS mit deutlichem Tagesgang an der Station Potsdam. Wasserdampfradiometer zum Vergleich

500 hPa Höhe so verändert, so dass sie dem GPS-Integral entsprechen. In den höheren Schichten ist der Beitrag der

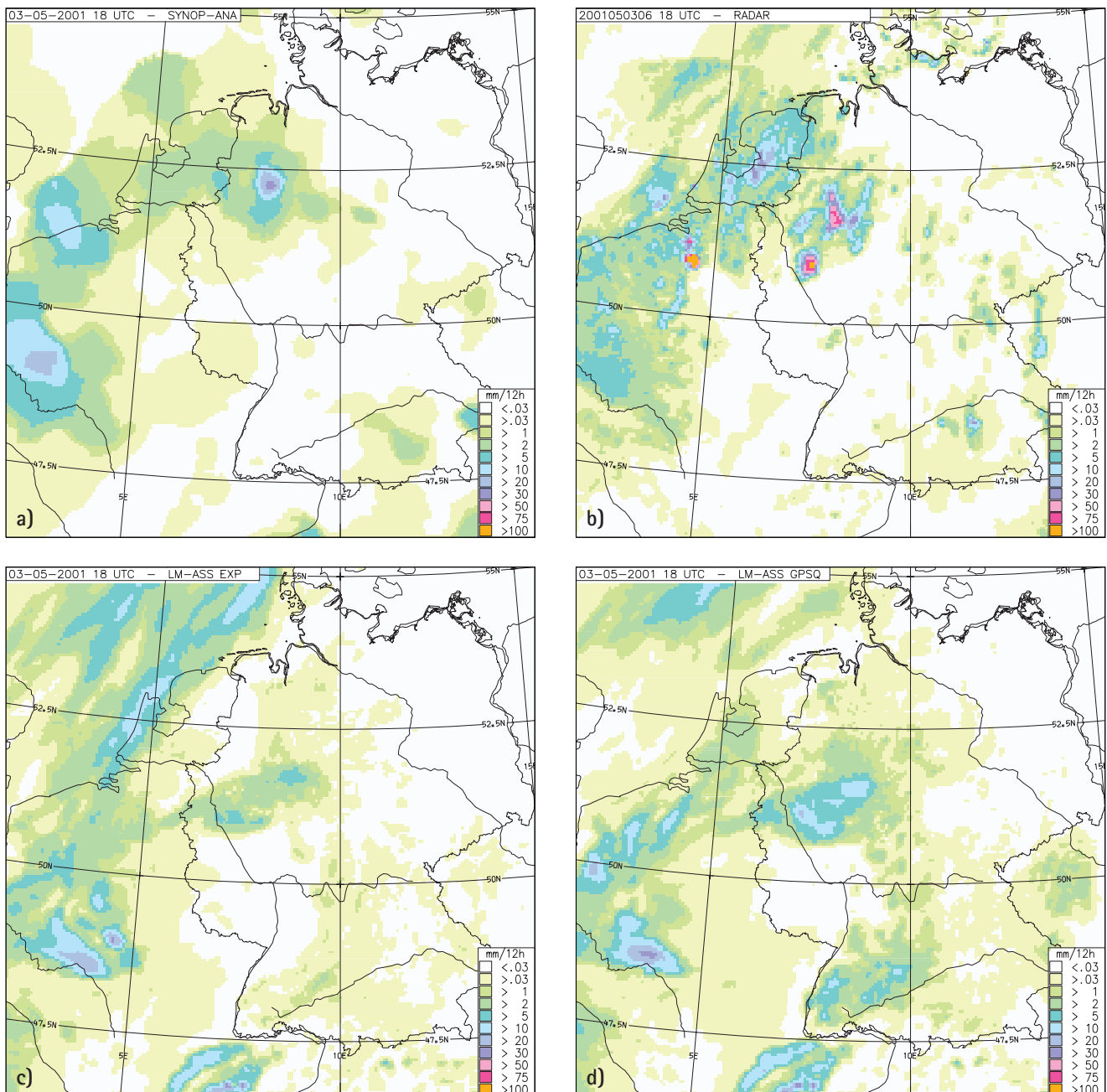


Abb. 9: Akkumulierter Niederschlag von 6 bis 18 UTC am 3. Mai 2001 aus a) SYNOP Beobachtungen, b) Radardaten, c) operationeller Analyse d) experimenteller Analyse mit GPS-Daten

GPS-Messungen sehr gering und das Modell soll dort nicht modifiziert werden. Momentan werden die GPS-Messungen wie Radiosondenprofile behandelt, d.h. sie haben einen Einflussradius von ~120 km, was jedoch in Abhängigkeit von der Netzdichte noch reduziert werden müsste.

Um den Einfluss von GPS auf die Analyse zu testen, wurden einige 24-h-Experimente zu verschiedenen Jahreszeiten durchgeführt und mit der operationellen Analyse verglichen. Das Modell reagierte insgesamt positiv auf den neuen Datentyp, die Differenz zwischen Modell und GPS-Messungen konnte deutlich verringert werden (von 2,0 mm auf 1,3 mm). An einem Beispiel (3. Mai 2001) mit extremen Niederschlägen in Nordrhein-Westfalen wurde der Einfluss auf die Niederschlagsmodellierung studiert.

Für 18 UTC zeigt der über 12 h akkumulierte Niederschlag basierend auf den SYNOP Beobachtungen (Abb. 9a) sehr hohe Werte an der Station Osnabrück (34 mm). Die Radardaten (obwohl quantitativ weniger genau) geben ein realistischeres Bild (Abb. 9b) mit zwei Niederschlagszellen. Die operationelle Analyse (Abb. 9c) erfasst weder die detaillierte Struktur noch erzeugt sie mehr als 5 mm Niederschlag in der Region. Die Einbeziehung von GPS nach 00 UTC (Abb. 9d) analysiert das Ereignis wesentlich besser, mit zwei Zellen von über 10 mm akkumuliertem Niederschlag. Gleichzeitig jedoch ergab die neue Analyse im Schwarzwald mehr Niederschlag als beobachtet. Das wurde verursacht durch GPS-Werte von zwei Stationen, die steigende Feuchte am Tage registrierten. Satelliten-aufnahmen lassen darauf schließen, dass diese höheren

Werte realistisch sind, aber eine inkorrekte vertikale Feuchteverteilung durch fehlerhafte konvektive Prozesse modelliert wurde. Darum sind weitere Anstrengungen nötig, um den Einfluss der GPS-Daten auf die Niederschlagsbildung zu evaluieren, zu verstehen und zu verbessern.

4 Ausblick

Im Rahmen des GASP-Projektes konnte die operationelle Bestimmung des Wasserdampfes in einem GPS-Netz von 120 Stationen in der geforderten Zeit von 40–45 Minuten demonstriert werden. Die Ergebnisse haben eine Genauigkeit von 1–2 mm im integrierten Wasserdampf. Vorhandene systematische Differenzen zum Wettermodell müssen noch näher untersucht und GPS-seitig minimiert werden. Eine weitere Verkürzung der Zeit für die Produktbereitstellung auf etwa 15–20 Minuten ist realistisch, sobald für alle beteiligten Stationen eine schnelle Internetverbindung realisiert und somit die Datenübertragung, wie bereits in Teilnetzen demonstriert, in wenigen Minuten abgeschlossen ist.

In Auswertung der Assimilationsteste beim DWD werden die weiteren Schritte festgelegt, wobei eine Netzver-

dichtung, insbesondere aber eine optimale Stationsverteilung, und eine höhere zeitliche Auflösung der GPS-Produkte zur Diskussion stehen. Die bereits durchgeführten Tests ergaben, dass die Einbeziehung von GPS positive Effekte hat, aber in besonderen Wettersituationen (starke vertikale Feuchtegradienten, sehr niedrige Feuchte) weitere Studien nötig sind. Assimilationsexperimente über einen längeren Zeitraum mit einer subjektiven und statistischen Evaluierung der sich ergebenden Vorhersagen, insbesondere den Niederschlägen, sind erforderlich, um den Einfluss von GPS endgültig zu beurteilen.

Die GPS-Bodenmessungen sind natürlich in ihrer Kombination mit der Limb-Sondierung zu sehen. Bereits jetzt werden regelmäßig tausende Profile pro Monat allein mit CHAMP (<http://gesis.gfz-potsdam.de>) gemessen, die nach einer umfassenden Validierung ebenfalls in die Assimilation einfließen werden.

Am GFZ sind Internetseiten (siehe Abb. 10) eingerichtet worden, auf denen die GASP-Produkte dargestellt werden (http://www.gfz-potsdam.de/pb1/pg1/gasp1/index_GASP1.html). Von allen beteiligten Stationen werden die Wasserdampfprofile online angezeigt, und es ist eine Animation der Wasserdampfverteilung über Deutschland abrufbar. Zusätzlich kann man sich stündlich einen Vergleich zwischen Lokal-Modell und GPS-Produkten ansehen.

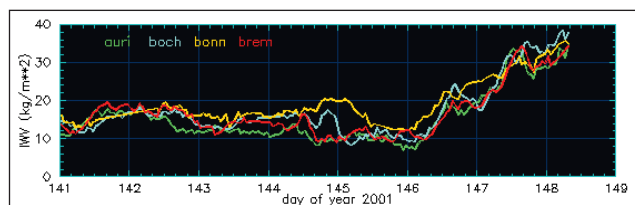
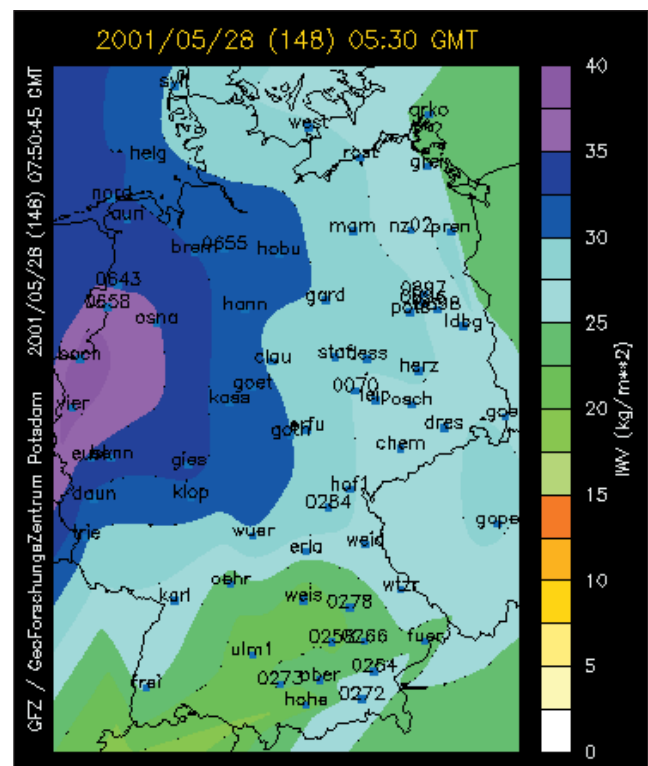
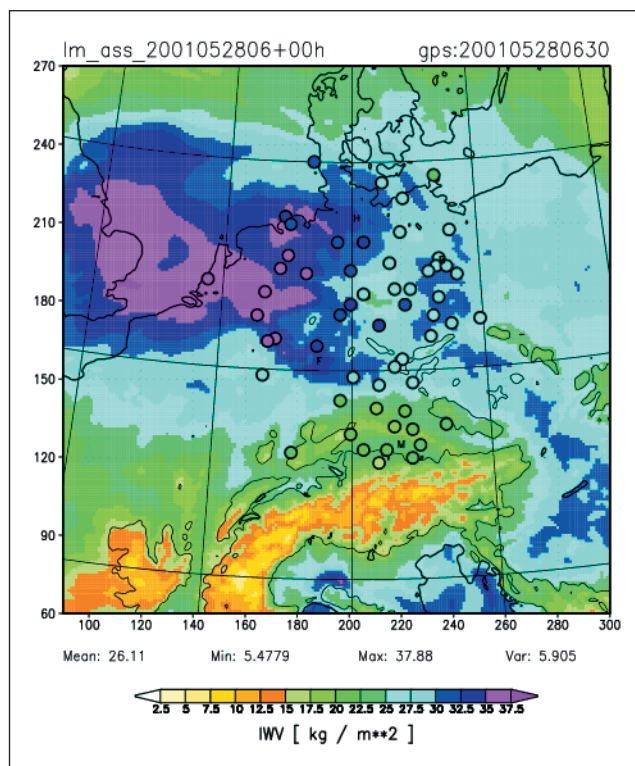


Abb. 10: Darstellung der operativen Bestimmung des Wasserdampfes mit GPS-Bodenstationen im Internet: Zeitreihen des Wasserdampfes für gewünschte Stationen (oben), Animation der Wasserdampfverteilung über Deutschland (rechts), Vergleich von GPS-Produkten mit dem Lokal-Modell (links)



Literatur

- Bar-Sever, Y.E., P.M. Kroger, J.A. Borjesson: Estimating horizontal gradients of path delay with a single GPS receiver. *J. Geophys. Res.*, 103, No B3, 5019–5035, 1998.
- Bevis, M., S. Businger, T.A. Herring, C. Rocken, R.A. Anthes, R.H. Ware: GPS meteorology remote sensing of atmospheric water vapor using the global positioning system. *J. Geophys. Res.*, 97, No D14, 15787–15801, 1992.
- Gendt, G.: Status Report of the Tropospheric Working Group. IGS Analysis Center Workshop, 8–10 June 1999, La Jolla, CA, USA, in »IGS 1999 Technical Reports«, Eds. K. Gowy, R. Neilan, A. Moore, JPL/IGS Central Bureau, Pasadena, CA, November 2000, pp. 375–384.
- Gendt, G., Ch. Reigber, G. Dick.: GPS-Meteorology – IGS Contribution and GFZ activities for operational water vapor estimation. Fifth international seminar on GPS in central Europe, 5–7 May, 1999, Penc, Hungary, artificial satellites, 2000.
- Gutman, S.I., S.G. Benjamin: The role of ground-based GPS meteorological observations in numerical weather prediction. *GPS solutions*, Vol. 4, No. 4, 2001, pp. 16–24.
- Kuo, Y.-H., X. Zou, S.J. Chen, W. Huang, Y.-Y. Guo, R. Anthes, M. Exner, D. Hunt, C. Rocken, S. Sokolovskiy: A GPS/MET sounding through an intense upper-level front. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 79, 617–626, 1998.
- Marquardt, C., K. Labitzke, Ch. Reigber, T. Schmidt, J. Wickert: An assessment of the quality of GPS/MET radio limb soundings during February 1997. *Phys. Chem. Earth (a)*, Vol. 26, No. 3, 125–130, 2001.
- Melbourne, W.G., E.S. Davis, C.B. Duncan, G.A. Hajj, K.R. Hardy, E.R. Kursinski, T.K. Meehan, L.E. Young, T.P. Yunck: The application of spaceborne GPS to atmospheric limb sounding and global change monitoring. JPL Publication 94–18, 1994.
- Reigber, Ch., H. Lühr, P. Schwintzer: CHAMP mission status and perspective. *Suppl. to EOS Transactions, AGU*, 81, 48, F307, 2000.
- Reigber, Ch., G. Gendt, G. Dick, M. Tomassini: Near-real-time water vapor monitoring for weather forecasts. *GPS World*, January 2002, 18–27.
- Rocken C., R. Ware, T. Van Hove, F. Solheim, Ch. Alber, J. Johnson, M. Bevis, S. Businger: Sensing atmospheric water vapor with the Global Positioning System. *Geophys. Res. Let.*, 20, No. 23, 2631–2634, 1993.
- Rocken, C., R. Anthes, M. Exner, D. Hunt, S. Sokolovsky, R. Ware, M. Gorbunov, W. Schreiner, D. Feng, B. Herman, Y.-H. Kuo, X. Zou: Analysis and validation of GPS/MET data in the neutral atmosphere. *J. Geophys. Res.*, 102, 29.849–29.866, 1997.
- Solheim, F.S., J. Vivekanandan, R.H. Ware, C. Rocken: Propagation delays induced in GPS Signals by Dry Air, Water Vapor, hydrometeors and other particulates. Submitted to *J. Geophys. Res.*, 104, No. D8, 9663–9670, 1999.
- Tralli, M.D., S.M. Lichten, T.A. Herring: Comparison of Kalman filter estimates of zenith atmospheric path delays using Global Positioning System and very long baseline interferometry. *Radio Science*, 27, No. 6, 999–1007, 1992.
- University of Nottingham, UK: WAVEFRONT, Final Report, 2001.
- Wickert, J., Ch. Reigber, G. Beyerle, R. König, C. Marquardt, T. Schmidt, L. Grunwaldt, R. Galas, T.K. Meehan, W.G. Melbourne, K. Hocke: Atmosphere sounding by GPS radio occultation: First results from CHAMP. *Geophys. Res. Let.*, 28, No. 17, 3263–3266, 2001.

Anschrift der Autoren

Dr. Gerd Gendt, Dr. Galina Dick, Sibylle Göbell, Dr. Markus Ramatschi, Prof. Dr. Christoph Reigber, Dr. Maria Tomassini

GeoForschungsZentrum Potsdam (GFZ)
Projektbereich – Kinematik und Dynamik der Erde
Telegrafenberg A17
D-14473 Potsdam
Tel.: 0331-288-1114
Fax: 0331-288-1111
gendt@gfz-potsdam.de