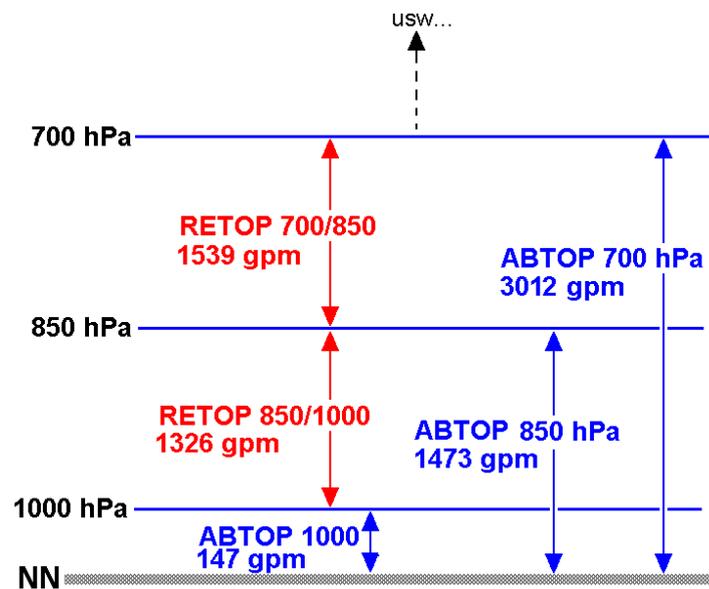


# Wolkenschnüffler



## Allgemeine Meteorologie - Aerologie -



## Geopotential, absolute und relative Topographie

Michael F. H. Krutina

Stand: Mai 2010

D:\Webseite\Deckblätter\GeopotentialCanon iP4300 Webseite.wpg

# Inhaltsverzeichnis

	Seitenzahl
1. Physikalische Basiseinheiten	1
2. Arbeit und Energie	2
2.1 Arbeit $W$	2
2.2 Energie $W$	4
2.3 Potentielle Energie $W_{\text{pot}}$	4
3. Das Geopotential $\Phi$	5
3.1 Definition des Geopotentials $\Phi$	5
3.2 Maßeinheiten des Geopotentials	6
3.1.1 Geopotentielltes Meter $gpm$	6
3.1.2 Geopotentielltes Standardmeter $m'$	6
3.1.3 Geopotentielle Höhe $H$	8
4. Topographien	8
4.1 Absolute Topographie (ABTOP)	10
4.2 Relative Topographie (RETOP)	13
4.2.1 Definition	13
4.2.2 Schichtmitteltemperatur $t_m$	15
4.2.3 Mittlere relative Luftfeuchte $U_m$	15
4.2.4 Virtuelle Temperatur $t_v$	16
5. Register	18
Literatur	23

## Verwendete Abkürzungen und Besonderheiten

- Abb. : Abbildung
- Form. : Formel
- Tab. : Tabelle
- s. : siehe

Bei Zahlenangaben wird anstatt eines Dezimalkommas ein Dezimalpunkt verwendet.

Die im Allgemeinen üblichen Pfeile über vektoriellen Größen werden in dieser Ausarbeitung einerseits der Einfachheit halber und andererseits aus schreibtechnischen Gründen nicht gesetzt.



# 1. Physikalische Basiseinheiten

Physikalische Größen (Kurzwort `Größe`) und physikalische Gleichungen, die einzelne Größen miteinander verknüpfen, beschreiben die Erscheinungen und Zustände in der Physik und Technik. Physikalische Größen lassen sich meist messen und sind dann qualitativ (dem Wert nach) und quantitativ (der Menge nach) darstellbar.

## Art der Darstellung physikalischer Größen und Gleichungen (Tab. 1)

Quantitative Angabe: der Menge nach	{G}	Maßzahl; Anzahl der Einheiten der physikalischen Größe
Qualitative Angabe: dem Wert nach	[G]	Maßeinheit oder Dimension der physikalischen Größe

Eine fiktive physikalische Formelgröße  $G$  mit ihrem Zahlenwert  $\{G\}$  und ihrer Maßeinheit  $[G]$  lässt sich damit formelmäßig folgendermaßen beschreiben (s. Form. 1).

## Gleichung einer fiktiven physikalischen Größe $G$ (Form. 1)

$$G = \{G\} [G]$$

- $G$  : Symbol der fiktiven physikalischen Größe  
 $\{G\}$  : Maßzahl (Zahlenwert)  
 $[G]$  : Maßeinheit oder Dimension

Die Maßeinheit einer physikalischen Größe stellt ebenfalls eine physikalische Größe mit der Maßzahl 1 dar.

Im Jahre 1970 wurde in der Bundesrepublik Deutschland das internationale physikalische Einheiten-System mit seinen SI-Einheiten (Système International) eingeführt.

## Darstellung der 7 SI-Basiseinheiten (Tab. 2)

SI-Basiseinheit		Physikalische Größe	
Einheit	Symbol	Art	Definition
Ampere	A	elektrische Stromstärke	1 Ampere ist die Stärke eines zeitlich unveränderlichen Stroms, der durch zwei im Vakuum parallel im Abstand von 1 m voneinander angeordneten, geradlinigen, unendlich langen Leitern von vernachlässigbar kleinem, kreisförmigem Querschnitt fließen und zwischen diesen Leitern je 1 m Leiterlänge elektrodynamisch die Kraft $2 \cdot 10^{-7}$ Newton hervorrufen würde.
Candela	cd	Lichtstärke	1 Candela ist die Lichtstärke in einer bestimmten Richtung einer Strahlungsquelle, die monochromatische Strahlung der Frequenz 540 THz und deren Strahlstärke in dieser Richtung $1/683$ W/sr beträgt ( $r$ : Ortsvektor).
Kelvin	K	Temperatur	1 Kelvin ist der 273.16te Teil der thermodynamischen Temperatur des Tripelpunktes des Wassers.
Kilogramm	kg	Masse	1 Kilogramm ist die Masse des internationalen Kilogramm-Prototyps.
Mol	n	Stoffmenge	1 Mol ist die Stoffmenge, in der ebenso viele Einzelteilchen (Atome, Moleküle, Ionen, Elektronen, Photonen, usw...) enthalten sind wie Atome in 12 Gramm des Kohlenstoffisotops $C^{12}$ ( $^{12}C$ ).
Meter	m	Länge	1 Meter ist die Länge der Strecke, die Licht im Vakuum in einer Zeit von $1/299792458$ Sekunden durchläuft.
Sekunde	s	Zeit	1 Sekunde ist das 9192631770fache der Periodendauer der dem Übergang zwischen den beiden Hyperfeinstrukturturniveaus des Grundzustandes von Atomen des Nuklids $^{133}Cs$ (Cäsium) entsprechenden Strahlung.

## 2. Arbeit und Energie

### 2.1 Arbeit W

Arbeit stellt, physikalisch gesehen, eine abgeleitete Größe dar und wird dann verrichtet, wenn eine Kraft  $F$  längs eines Weges  $s$  wirkt. Die Arbeit  $W$  wächst mit der Größe der Kraft  $F$  und der Länge des zurückgelegten Weges  $s$ . Bei konstanter, in Wegrichtung wirkender Kraft  $F$  gilt für  $W$  die Gleichung 2.

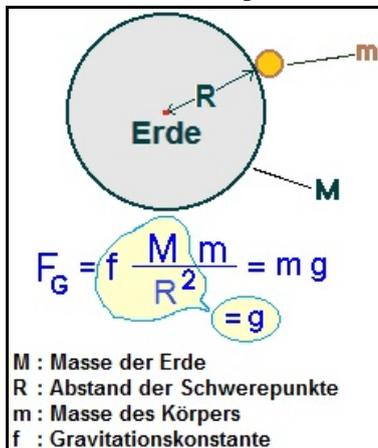
#### Mechanische Arbeit $W$ (Form. 2)

$$W = F s \text{ [J]}$$

- $W$  : Mechanische Arbeit [J]; Joule  $\leftrightarrow$  Arbeits-/Energieeinheit,  $1 \text{ J} = 1 \text{ N m}$ ; Newton  $\leftrightarrow$  Krafteinheit;  $m$   $\leftrightarrow$  Meter, SI-Basiseinheit
- $F$  : konstante Kraft in Wegrichtung;  $F = m a$  [N];  $1 \text{ N} = 1 \text{ kg m s}^{-2}$
- $m$   $\leftrightarrow$  Masse des Körpers [kg]
- $a$   $\leftrightarrow$  Beschleunigung [ $\text{m s}^{-2}$ ]
- $s$  : Wegstrecke [m]

Um einen Körper im Gravitationsfeld der Erde aufwärts zu bewegen, muss Arbeit gegen die Schwerkraft geleistet werden. Diese Kraft, die jedes Massstück zum Erdmittelpunkt hin anzieht, wird Gewichtskraft  $F_G$  genannt und kann mit Hilfe des Gravitationsgesetzes nach Newton bestimmt werden. Newton fand heraus, dass die Anziehungskräfte zwischen zwei Körpern von ihren Massen und ihrem Abstand voneinander abhängig sind. Die Schwerkraft ist um so stärker, je größer die Massen der zwei Körper sind und sie verhält sich umgekehrt proportional zum Quadrat des Abstandes der beiden Masseschwerpunkte. Ist die eine Masse dabei im Vergleich zur anderen sehr groß, kann die Anziehungskraft des kleinen Körpers vernachlässigt werden und es ergibt sich als Sonderfall des Gravitationsgesetzes nach Newton die Gewichtskraft  $F_G$  des kleinen Objektes (s. Abb. 1).

#### Gewichtskraft $F_G$ und Erdbeschleunigung $g$ (Abb. 1)



- $m$  : Masse [kg] des kleinen, gelben Körpers mit rotem Rand
- $M$  : Masse [kg] der Erde
- $R$  : Erdradius [m]
- $F_G$  : Gewichtskraft [N] des kleinen Körpers;  $F_G = m g$
- $g$  : Erdschwerebeschleunigung oder Erdbeschleunigung [ $\text{m s}^{-2}$ ]

Das Gravitationsgesetz von Newton besagt, dass die Anziehungskräfte zwischen zwei Körpern von ihren Massen und ihrem Abstand voneinander abhängt. Ist die eine Masse dabei im Vergleich zur anderen sehr groß, kann die Anziehungskraft des kleinen Körpers vernachlässigt werden und es ergibt sich als Sonderfall des Gravitationsgesetzes nach Newton die Gewichtskraft  $F_G$  des kleinen Objektes.

Jeder sich im Gravitationsfeld der Erde befindende frei fallende Körper wird von der Schwerkraft in Richtung des Erdmittelpunktes beschleunigt. Diese Erdschwerebeschleunigung  $g$  oder, vereinfacht ausgedrückt, Erdbeschleunigung  $g$ , lässt sich mit der Gravitationskonstante  $f$  und der Masse  $M$  der Erde ermitteln (s. Form. 3).

### Erdbeschleunigung $g$ am Äquator (Form. 3)

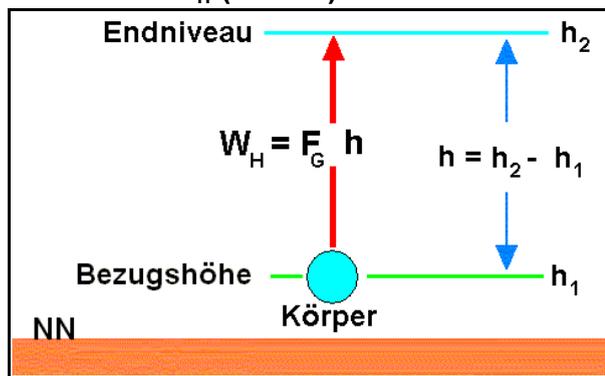
$$g = f \frac{M}{R^2} = 6.67 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2} \cdot \frac{5.9736 \cdot 10^{24} \text{ kg}}{(6.371 \cdot 10^6 \text{ m})^2}$$

$$g = 9.82 \text{ m s}^{-2}$$

- $g$  : Erdbeschleunigung [ $\text{m s}^{-2}$ ]
- $f$  : Gravitationskonstante;  
 $f = 6.67 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$
- $M$  : Masse der Erde;  
 $M = 5.9736 \cdot 10^{24} \text{ m}$
- $R$  : Erdradius: mittlerer Erdradius  
 $R = 6.371 \cdot 10^6 \text{ m}$

Um einen Körper im Schwerfeld der Erde von einem niedrigen Niveau auf ein höheres senkrecht aufwärts zu befördern, ist Arbeit zu verrichten, die als Hubarbeit  $W_H$  bezeichnet wird. Der dazu notwendige Arbeitsaufwand ist von dem Höhenunterschied  $h$  der beiden Niveaus und der Gewichtskraft  $F_G$  des Körpers abhängig (s. Abb. 2, Form. 4).

### Hubarbeit $W_H$ (Abb. 2)



- $W_H$  : Hubarbeit [J]
- $F_G$  : Gewichtskraft [N] des blauen Körpers;  $F_G = m g$
- $m$  : Masse [kg] des blauen Körpers
- $g$  : Erdbeschleunigung [ $\text{m s}^{-2}$ ]
- $h_1$  : Unteres Niveau bzw. Bezugshöhe [m]
- $h_2$  : Endniveau [m] des Körpers nach dem Hebungsprozess
- $h$  : Höhe [m], um die der blaue Körper gehoben wurde

Um einen Körper im Schwerfeld der Erde vom Niveau  $h_1$  bis in die Höhe  $h_2$  senkrecht nach oben zu befördern, ist Arbeit zu verrichten, die als Hubarbeit bezeichnet wird und von der Höhe  $h$  und der Masse des zu hebenden Objektes abhängt.

### Hubarbeit $W_H$ (Form. 4)

$$W_H = F_G h \text{ [J]}$$

- $W_H$  : Hubarbeit [J]
- $F_G$  : Gewichtskraft [N] eines Körpers;  $F_G = m g$
- $h$  : Höhe [m], um die der Körper gehoben wurde

Die meisten der nachfolgend aufgeführten physikalischen Größen stellen spezielle meteorologische Parameter dar. Meteorologische Elemente wie z.B. der Luftdruck  $p$  variieren in Raum ( $x, y, z$ ) und Zeit ( $t$ ) und werden daher häufig im rechtwinkligen kartesischen Koordinatensystem näher erläutert. Weil dieses Koordinatensystem den dreidimensionalen Raum mit den beiden horizontalen Achsen  $x, y$  und der vertikalen Achse  $z$  beschreibt, wird das Symbol  $h$  der Höhe in den folgenden Gleichungen durch  $z$  ersetzt.

## 2.2 Energie W

Mechanische Arbeit  $W$  kann gespeichert werden. Wenn das geschieht, dann wird diese Fähigkeit, Arbeit verrichten zu können, als Energie  $W$  (frz., von griech.  $\epsilon\nu\rho\epsilon\rho\iota$  = wirkende Kraft) bezeichnet. Weil Arbeit und Energie als physikalische Größen übereinstimmen, sind ihre Maßeinheiten identisch (Joule [J]) und es wird auch oft für beide das gleiche Formelzeichen  $W$  verwendet.

**Energie  $W$ :** Gespeichertes Arbeitsvermögen [J]

Energie lässt sich weder vernichten noch kann sie aus dem Nichts entstehen. Sie kann aber auf andere Körper übertragen oder in eine andere Form umgewandelt werden. Beim Abbremsen eines Autos z.B. wird mechanische Energie in thermische Energie (Wärmeenergie) überführt.

### Mechanische Energie $W$ eines Körpers (Form. 5)

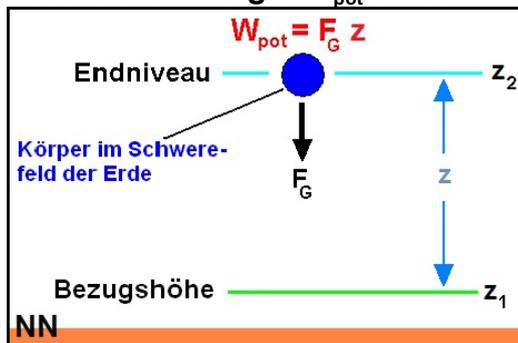
$$W = W_{kin} + W_{pot} \text{ [J]}$$

- $W$  : Gesamte mechanische Energie [J] des Körpers
- $W_{kin}$  : Kinetische Energie [J] (Energie der Bewegung) des Körpers
- $W_{pot}$  : Potentielle Energie [J] (Energie der Lage) des Körpers

## 2.3 Potentielle Energie $W_{pot}$

Jeder Körper, der sich oberhalb der Erdoberfläche im Gravitationsfeld der Erde befindet, besitzt die Fähigkeit, aufgrund seiner Höhe  $z$  über dem Ausgangsniveau  $z_1$  Arbeit zu verrichten (z.B. Wasserkraftwerk). Dieses Arbeitsvermögen eines Körpers wird als potentielle Energie (Energie der Lage)  $W_{pot}$  bezeichnet. Die Größe der potentiellen Energie  $W_{pot}$  ist dabei von der Gewichtskraft  $F_G$  des Körpers und von seiner Höhe  $z$  abhängig.

### Potentielle Energie $W_{pot}$ eines Körpers (Abb. 3)



- $W_{pot}$  : Potentielle Energie oder Energie der Lage [J]
- $F_G$  : Gewichtskraft des Körpers;  $F_G = m \cdot g$  [N]
- $m$  : Masse [kg] des Körpers
- $g$  : Erd- oder Schwerebeschleunigung [ $m \cdot s^{-2}$ ]
- $z_1$  : Bezugshöhe [m]
- $z_2$  : Endniveau [m]
- $z$  : Höhe [m] des Körpers über dem Bezugsniveau  $z_1$

Die potentielle Energie  $W_{pot}$  eines Körpers im Schwerfeld der Erde ist eine Funktion der Höhe  $z$  und seiner Gewichtskraft  $F_G$ . Je mächtiger  $z$  und je stärker  $F_G$  ist, desto größer wird seine potentielle Energie  $W_{pot}$ .

### 3. Das Geopotential $\Phi$

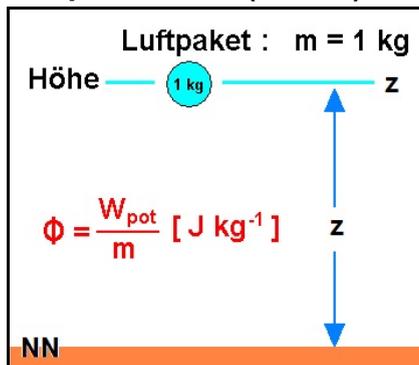
#### 3.1 Definition des Geopotentials $\Phi$

Um die potentielle Energien von Körpern mit unterschiedlichen Gewichtskräften und in verschiedenen Höhen im Schwerfeld der Erde vergleichen zu können, sind ihre Bezugshöhen und Massen zu vereinheitlichen.

Weil die WMO als Bezugshöhe das mittlere Meeresniveau NN und als Masse die Masseneinheit  $m = 1 \text{ kg}$  definierte, lässt sich die potentielle Energie pro Masseneinheit bestimmen. Diese Größe wird in der Meteorologie als Geopotential  $\Phi$  bezeichnet. Betrachtet man ein kleines, abgeschlossenes Luftvolumen, Luftpaket genannt, dann stellt das Geopotential  $\Phi$  damit physikalisch die Energie der Lage dar, die ein Luftquantum mit der Masse  $m = 1 \text{ kg}$  in einer gegebenen Höhe  $z$  über NN besitzt. Als Maßeinheit des Geopotentials  $\Phi$  wurde von der WMO das geopotentielle Meter gpm festgelegt (s. 3.2.1). Die WMO modifizierte dann allerdings diese Größe auf Vorschlag der ICAO geringfügig und seit dem 01.07.1972 gilt als Maßeinheit des Geopotentials  $\Phi$  das geopotentielle Standardmeter  $m'$  (s. 3.2.2).

**Geopotential  $\Phi$**  : Potentielle Energie eines Luftpaketes mit der Einheitsmasse  $m = 1 \text{ kg}$  in einer definierten Höhe  $z$  über NN.

#### Geopotential $\Phi$ (Abb. 4)



- $\Phi$  : Geopotential [ $\text{J kg}^{-1}$ ];  $W_{pot}$  pro Masseneinheit
- $m$  : Masse [kg]
- $z$  : Höhe [m] über NN

Das Geopotential  $\Phi$  stellt die Energie der Lage dar, die ein Luftpaket - ein kleines, abgeschlossenes Luftvolumen - mit der Masse  $m = 1 \text{ kg}$  in einer gegebenen Höhe  $z$  über NN besitzt. Die Maßeinheit des Geopotentials  $\Phi$  ist seit dem 01.07.1972 das geopotentielle Standardmeter  $m'$  (s. 3.2.2).

**Maßeinheit des Geopotentials in SI-Basiseinheiten**  
 $\text{J kg}^{-1} = \text{N m kg}^{-1} = \text{kg m s}^{-2} \text{ m kg}^{-1} = \text{m}^2 \text{ s}^{-2}$

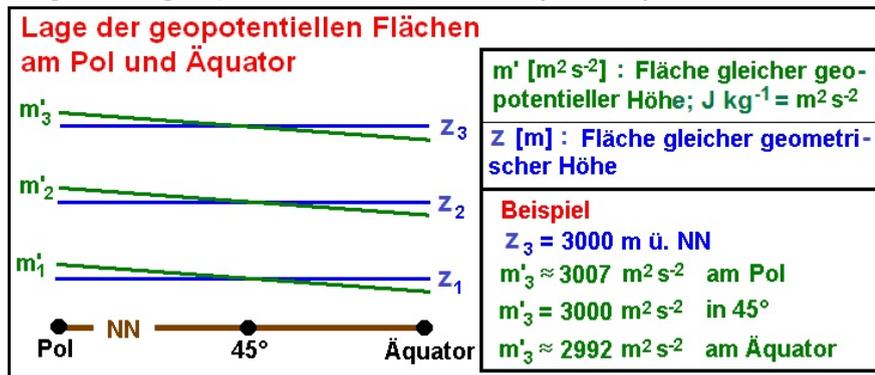
#### Geopotential $\Phi$ (Form. 6)

$$\Phi = \frac{W_{pot}}{m} = \frac{m g z}{m} = g z [\text{J kg}^{-1}]$$

- $\Phi$  : Geopotential [ $\text{J kg}^{-1}$ ];  $W_{pot}$  pro Masseneinheit
- $m$  : Masse [kg]
- $g$  : Erdbeschleunigung [ $\text{m s}^{-2}$ ]
- $z$  : Höhe über NN [m]; geometrische Höhe

Weil die Erdbeschleunigung  $g$  an den Polen etwas höher als am Äquator ist, weist das Geopotential  $\Phi$  in der gleichen Höhe  $z$  an den Polen etwas größere Werte als am Äquator auf. Deshalb bleibt die potentielle Energie eines Luftpaketes, das sich in der gleichen Höhe  $z$  vom Äquator zu den Polen hinbewegt, nicht konstant, sondern nimmt zu.

## Lage von geopotentiellen Flächen (Abb. 5)



Pole :  $g_{\text{pol}} = 9.83 \text{ m s}^{-2}$ ;  
 $\Phi = 9.83 z [\text{J kg}^{-1}]$   
 Äquator :  $g_{\text{äq}} = 9.78 \text{ m s}^{-2}$ ;  
 $\Phi = 9.78 z [\text{J kg}^{-1}]$

*Eine geopotentielle Fläche, eine Fläche gleichen Geopotentials  $\Phi$ , liegt in der gleichen geometrischen Höhe  $z$  [m ü. NN] am Pol höher als am Äquator.*

## 3.2 Maßeinheiten des Geopotentials

### 3.2.1 Geopotentielles Meter gpm

Als Maßeinheit des Geopotentials  $\Phi$  wurde von der WMO vor dem 01.07.1972 der 9.80 mal höhere Wert der SI-Maßeinheiten von  $\Phi [\text{J kg}^{-1}]$  gewählt und als geopotentielles Meter gpm bezeichnet.

**Geopotentielles Meter gpm: 9.80-fache Wert der Maßeinheiten des Geopotentials  $\Phi$**

$$1 \text{ gpm} = 9.80 \text{ J kg}^{-1} \text{ bzw. } 1 \text{ J kg}^{-1} = \frac{1 \text{ gpm}}{9.80}$$

Der Begriff 'gpm' beinhaltet damit die potentielle Energie  $W_{\text{pot}}$ , die ein Luftquantum mit der Masse  $m = 1 \text{ kg}$  aufweist, wenn es sich an einem Ort der Erde mit einer Erdbeschleunigung von  $g = 9.80 \text{ m s}^{-2}$  in einer Höhe von  $z = 1 \text{ m}$  über NN befindet.

In der theoretischen Meteorologie stellt das geopotentielle Meter für dynamische Betrachtungen der Atmosphäre eine bessere Höhenangabe dar als die geometrische Höhe  $z$ , weil die potentielle Energie eines Luftpaketes, das entlang einer Fläche gleicher geopotentieller Höhe verschoben wird, konstant bleibt.

### 3.2.2 Geopotentielles Standardmeter $m'$

Weil die ICAO den Normwert der Erdbeschleunigung mit  $g_0 = 9.80665 \text{ m s}^{-2}$  -  $g_0$  entspricht der Erdbeschleunigung in NN in der geographischen Breite von  $45^\circ 32' 33''$  - festlegte, glied die WMO die Maßeinheit des Geopotentials  $\Phi$  den Erfordernissen der Luftfahrt an und führte ab 01.07.1972 den Begriff des geopotentiellen Standardmeters  $m'$  ein.

**Geopotentielles Stan-: 9.80665 –fache Wert der Maßeinheiten des Geopotentials  $\Phi$  dardmeter  $m'$**

$$1 m' = 9.80665 J kg^{-1} \text{ bzw. } 1 J kg^{-1} = \frac{1 m'}{9.80665}$$

Für den praktischen Wetterdienst ist besonders in den mitteleuropäischen Breiten die horizontale und vertikale Abweichung der tatsächlichen Erdbeschleunigung  $g$  vom Normwert der ICAO  $g_0 = 9.80665 m s^{-2}$  vor allem in Bodennähe nahezu bedeutungslos, so dass die Maßzahlen der geopotentiellen Standardmeter  $m'$  denen der geometrischen Höhen  $z [m]$  des Luftpaketes über NN entsprechen (s. Form. 7). Die SI-Maßeinheiten unterscheiden sich allerdings signifikant.

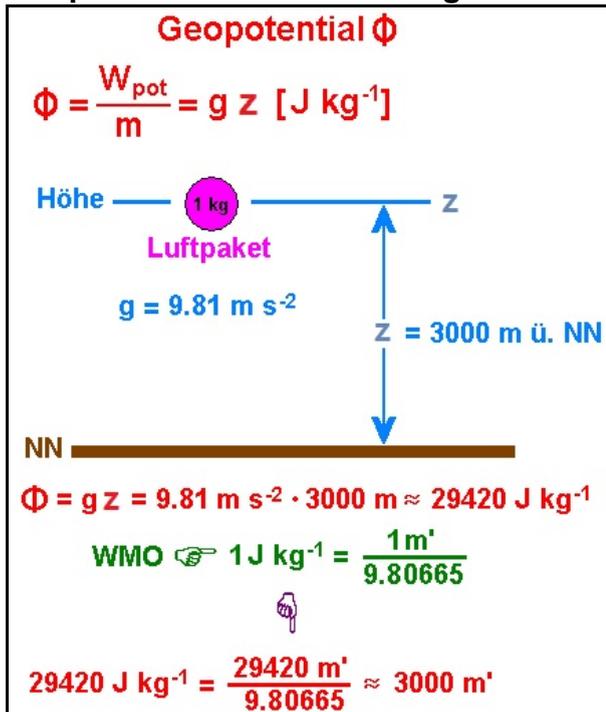
**Geometrische Höhe  $z$  und geopotentielles Standardmeter  $m'$  (Form. 7)**

$$m' = \frac{g z}{9.80665} [J kg^{-1}]$$

- $m'$  : Geopotentielles Standardmeter [ $J kg^{-1}$ ]
- $g$  : Erdbeschleunigung [ $m s^{-2}$ ]
- $z$  : Geometrische Höhe [ $m$ ]
- 9.80665 : Dimensionslose Zahl

Die Gleichung 7 zeigt, dass für eine Erdbeschleunigung von  $g_0 = 9.80665 m s^{-2}$  die Maßzahl der Höhe des Geopotentials  $\Phi$ , in geopotentiellen Standardmetern  $m'$  angegeben, gleich der Maßzahl der geometrischen Höhe  $z$  ist, für  $g > g_0$  dagegen den größeren und für  $g < g_0$  den kleineren Wert ergibt. Befindet sich ein Luftquantum z.B. in der geometrischen Höhe  $z = 3000 m$  über NN, dann beträgt seine Höhe in geopotentiellen Standardmetern  $3000 m'$  (s. Abb. 6).

**Geopotentielle Höhe  $m'$  und geometrische Höhe  $z$  über NN (Abb. 6)**



- $m'$  : Geopotentielles Standardmeter [ $J kg^{-1}$ ]
- $g$  : Erdbeschleunigung [ $m s^{-2}$ ]
- $z$  : Geometrische Höhe [ $m$ ]
- 9.80665 : Dimensionslose Zahl

*Nimmt man als Mittelwert der Erdbeschleunigung  $9.81 m s^{-2}$  und als geometrische Höhe  $z$  eines Luftpaketes  $z = 3000 m$  über NN an, dann beträgt sein Niveau in geopotentiellen Standardmetern  $3000 m'$ .*

### 3.2.3 Geopotentielle Höhe H

Die Grundlage der Höhentabellen des Manuals of the ICAO Standard Atmosphere (Doc 7488/3 der ICAO) stellt das geopotentielle Standardmeter  $m'$  dar. Um den Kunden der Luftfahrt jedoch den Umgang mit diesem Begriff und seinen für physikalische Laien seltsamen Maßeinheiten ( $J\ kg^{-1} = m^2\ s^{-2}$ ) zu erleichtern, hat die ICAO die geopotentielle Größe  $H$  mit der SI-Basiseinheit Meter eingeführt. Weil deren Maßzahlen denen des geopotentiellen Standardmeters  $m'$  entsprechen, zeigt auch das entsprechende Tabellenwerk der Standardatmosphäre die bekannten Werte der Tropopause mit  $H = 11\ km$ ,  $p = 226.32\ hPa$  und  $t = -56.5\ ^\circ C$ .

Die nachfolgende Formel 8 gibt die Umrechnung der geopotentiellen Höhe  $H$  in die geometrische Höhe  $z$  und umgekehrt an.

#### Geopotentielle Höhe $H$ und Umrechnungsmöglichkeiten (Form. 8)

$$H = \frac{\Phi}{g} = \int_0^z g(z) dz \left[ \frac{J\ kg^{-1}}{m\ s^{-2}} \right]$$

$$H = \frac{R\ z}{R + z} [m]$$

$$z = \frac{R\ H}{R - H} [m]$$

- $H$  : Geopotentielle Höhe [m]
- $\Phi$  : Geopotential [ $J\ kg^{-1}$ ]
- $z$  : Geometrische Höhe [m]
- $R$  : Erdradius;  $R = 6356766\ m$
- $g$  : Erdbeschleunigung [ $m\ s^{-2}$ ]

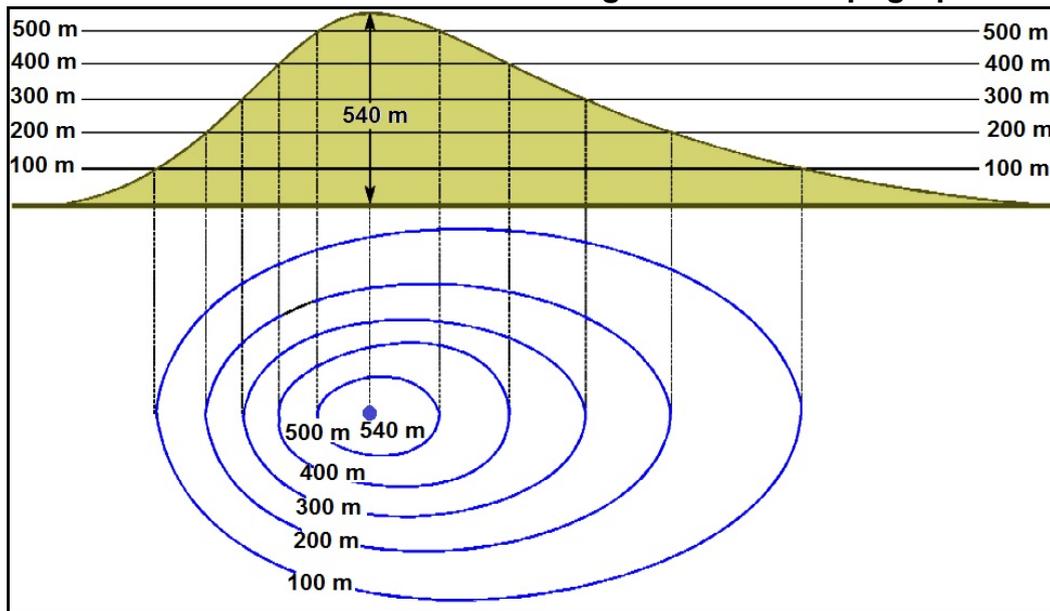
*Wird der erste Ausdruck der nebenstehenden Gleichung integriert und für  $g$  der Term  $g = g_0 (R/R + z)^2$  eingesetzt, ergeben sich die beiden links aufgeführten Umrechnungsmöglichkeiten für  $H$  und  $z$ .*

## 4. Topographien

Der griechische Ausdruck 'Topographie' bedeutet so viel wie Orts- oder Geländebeschreibung und wird z.B. in der Kartographie zur zweidimensionalen Darstellung der dreidimensionalen Oberflächengestalt der Erde (Berge, Täler, usw...) verwendet.

Topographische Karten in den Maßstäben 1:1000 bis 1:100000 erlauben u.a. nicht nur die Darstellung von Gewässern, Siedlungen und Verkehrswegen, sondern auch noch zusätzlich die der Höhenstrukturen der natürlichen Erdoberfläche. Niederungen, Hügel- und Gebirge einer Region der Erde lassen sich dabei durch auf NN bezogene Kurvenscharen, den Höhenlinien oder Isohypsen, je nach Kartenmaßstab mehr oder minder exakt wiedergeben, so dass z.B. Wanderer ihre Routen auch für unbekannte Gegenden bestens planen können. Die Abbildung 7 demonstriert die schematische Darstellung eines Berges und die Grafik 8 die topographische Karte des bayerischen Walchensees im Maßstab 1:25000.

### Schematischer Vertikalschnitt eines Berges und seine topographische Karte (Abb. 7)



Die Abbildung zeigt im oberen Teil den Querschnitt eines 540 m hohen Berges, der im unteren Teil durch ellipsenförmige Isohypsen in einer topographischen Karte dargestellt wird.

### Digitale topographische Karte des Walchensees im Maßstab 1:25000 (Abb. 8)



[Quelle: Garm in Mapsource, Topographische Vektorkarte Deutschland, Maßstab 1:25000]

Der Maßstab 1:25000 bedeutet, dass 1 cm auf der Karte einer Entfernung von 250 Metern in der Natur entspricht.

Der Walchensee liegt in Oberbayern und die braunen ausgezogenen Linien sind Höhenlinien oder Isohypsen.

## 4.1 Absolute Topographie (ABTOP)

Um ein übersichtliches dreidimensionales Bild des momentanen Wetterzustandes der Atmosphäre zu erhalten, werden im Wetterdienst nicht nur Boden-, sondern auch Höhenwetterkarten erstellt. Die letzteren geben die Höhenlage wohldefinierter Flächen gleichen Luftdruckes in Bezug auf ein gegebenes Ausgangsniveau an. Diese sogenannten Druckflächen, isobare Flächen oder Isobarenflächen, beinhalten deshalb Linien gleicher Höhe bzw. gleichen Geopotentials, die Isohypsen heißen.

Ein Gebiet großer Höhe oder hohen Geopotentials entspricht dabei hohen Druckwerten und ein Gebiet geringerer Höhe bzw. kleinen Geopotentials tieferen Luftdruckwerten in der vergleichbaren Höhe. Weil der Luftdruck allerdings am Erdboden als auch in der Höhe räumliche und zeitliche Schwankungen aufweist, ist die Höhe einer isobaren Fläche nicht konstant, sondern sie verändert sich ständig durch Luftdruck- und oder Temperaturänderungen. Diese Darstellung von Druckflächen, deren Höhenangaben sich auf NN beziehen, wird in der Meteorologie absolute Topographie oder ABTOP genannt.

**Absolute Topographie (ABTOP):** Höhenlage einer Druckfläche über NN

ABTOPs, deren Grundlage Radiosondenmessungen bilden, charakterisieren den Wetterzustand einer isobaren Fläche und sind deshalb Höhenwetterkarten. Sie demonstrieren die Höhenlage der darzustellenden Druckfläche mit den Tiefs und Hochs, enthalten die Temperatur-, Taupunkt- und Windangaben (s. Abb. 9) der Radiosondenstationen und der Verlauf der Isohypsen veranschaulicht das Strömungsfeld auf dieser isobaren Fläche.

### Eintragungsschema der Höhenwetterkarte 850 hPa (Abb. 9)



4 : Lufttemperatur [°C]; 4 °C

47 : Höhe [dam] (Dekameter) ohne Berücksichtigung der Tausenderziffer;  
1470 m über NN

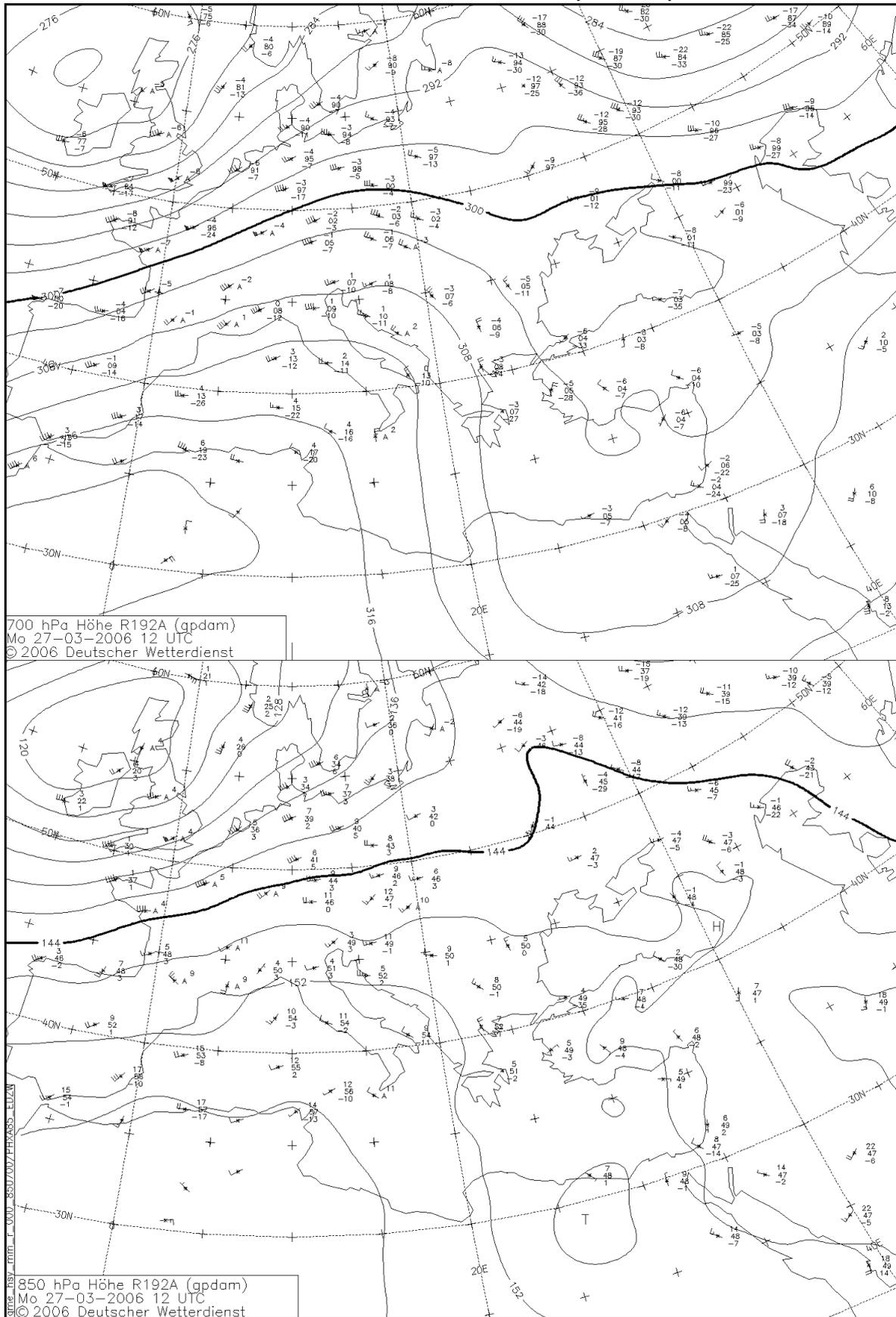
2 : Taupunkt [°C]; 2 °C

Wind : Windpfeil → Richtung, Fiederung ⇄ Geschwindigkeit; 270° 25 kn (1 kn ≈ 0.5 m s<sup>-1</sup>)

Die Abhängigkeit der Höhenlage einer Druckfläche von der horizontalen Luftdruckverteilung hat zur Folge, dass die Isohypsen einer Höhenwetterkarte ein ähnliches Bild aufweisen wie die Isobaren einer Bodenanalyse.

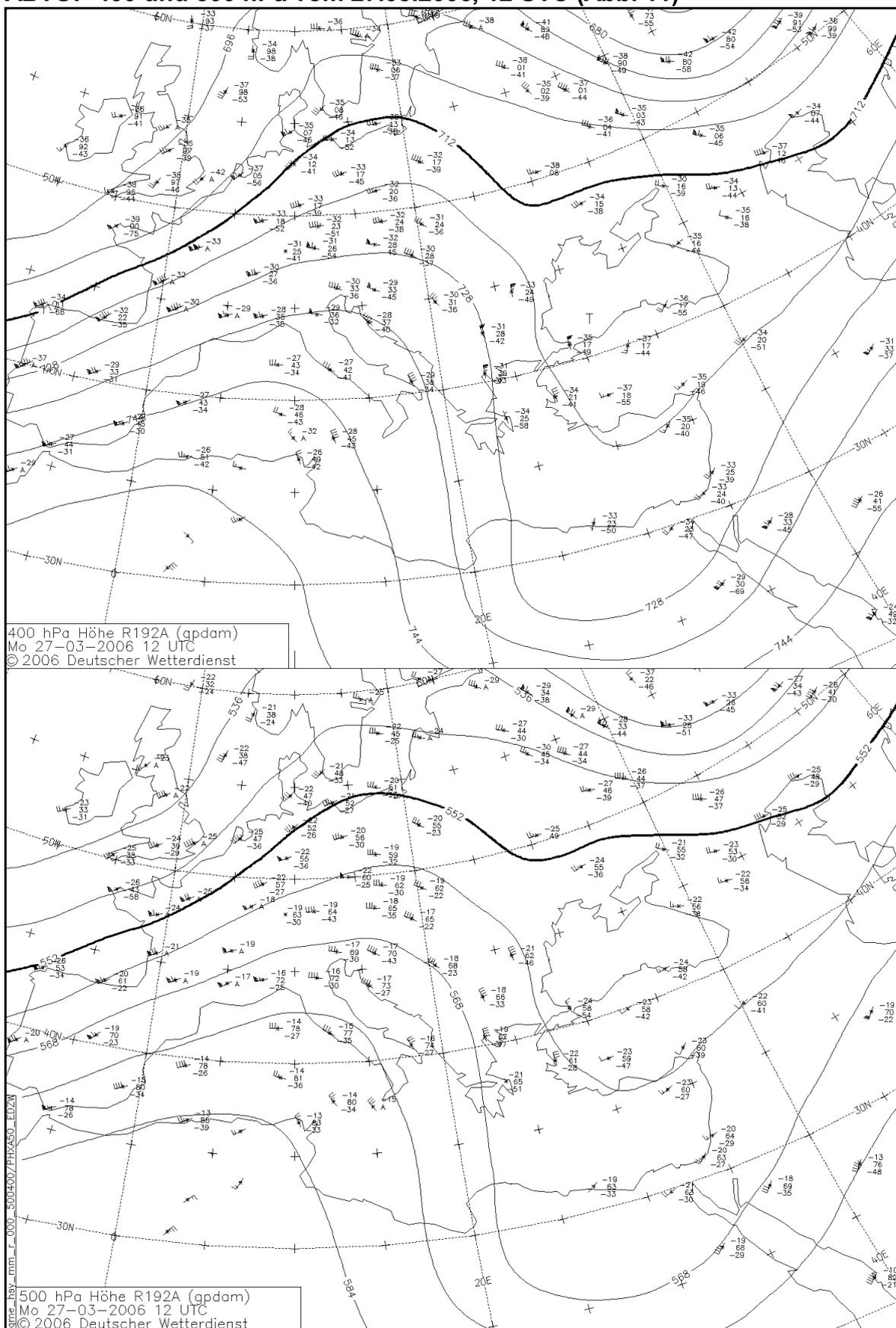
Die nächsten beiden Abbildungen zeigen die Höhenwetterkarten 850 und 700 hPa (mittlere Höhe 1500, 3000 m ü. NN) und die ABTOPs 500 und 400 hPa (mittlere Höhe 5400, 7200 m ü. NN) vom 27.03.2006, 12 UTC.

### ABTOP 700 und 850 hPa vom 27.03.2006, 12 UTC (Abb. 10)



Die beiden absoluten Topographien 700 (oben) und 850 hPa (unten) weisen eine mittlere Höhe von 3000 und 1500 m ü. NN auf und ihre Isohypsen zeigen Abstände von 40 zu 40 m (4 dam).

### ABTOP 400 und 500 hPa vom 27.03.2006, 12 UTC (Abb. 11)



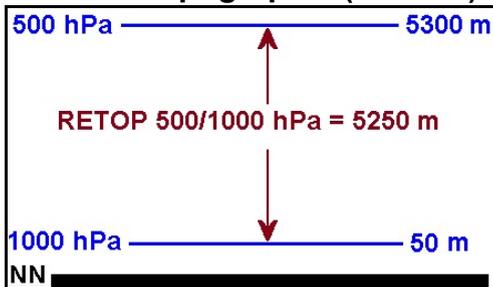
Die absoluten Topographien 400 (oben) und 500 hPa (unten) haben eine mittlere Höhe von 7200 und 5400 m ü. NN und Isohypsen-Abstände von 80 zu 80 m (8 dam).

## 4.2 Relative Topographie (RETOP)

### 4.2.1 Definition

Unter dem Begriff 'relative Topographie' versteht man die Darstellung des Höhenunterschiedes oder der Schichtdicke zweier isobarer Flächen, wie z.B. den Abstand der Druckflächen 500 und 1000 hPa (s. Abb 12).

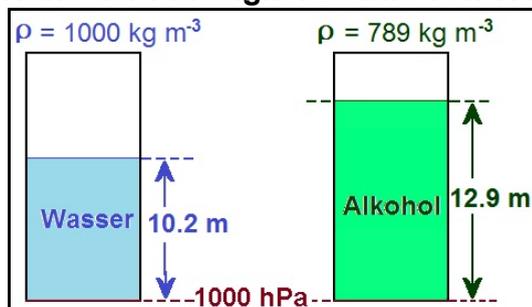
#### Relative Topographie (Abb. 12)



Die 'relative Topographie' stellt den Höhenunterschied oder die Schichtdicke zweier isobarer Flächen, wie z.B. den Abstand der Druckflächen 500 und 1000 hPa, die RETOP 500/1000 hPa, dar.

Die Schichtdicke oder RETOP ist eine Funktion der mittleren Luftdichte zwischen den beiden isobaren Flächen, weil die vertikale Luftdruckänderung in einer Luftsäule mit höherer Luftdichte größer ist als in einem Luftquader mit geringerer Dichte. Dieser Zusammenhang lässt sich experimentiell mit zwei Gefäßen verdeutlichen, von denen eines Wasser - Dichte  $\rho = 1000 \text{ kg m}^{-3}$  - und das andere Alkohol - Dichte  $\rho = 789 \text{ kg m}^{-3}$  - enthält. Der Druck, den beide Flüssigkeitssäulen am Boden der identischen Behälter aufweisen, soll 1000 hPa betragen. Wie die Grafik 13 angibt, ist die Flüssigkeitssäule eines mit Alkohol gefüllten Gefäßes bei identischen Behältern und dem gleichen Basisdruck von 1000 hPa um 2.7 m höher als die des dichteren Stoffes Wasser.

#### Höhe der Flüssigkeitssäule von Wasser und Alkohol (Abb. 13)

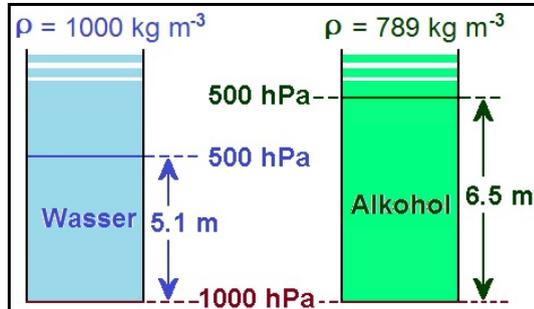


Bei identischen Behältern und gleichem Basisdruck von 1000 hPa hat die Flüssigkeitssäule eines mit Alkohol gefüllten Gefäßes eine Höhe von 12.9 m und die Höhe der dichteren Flüssigkeitssäule Wasser beträgt nur 10.2 m.

Wird nun der Abstand der Druckfläche 500 hPa vom Basisdruck 1000 hPa betrachtet (s. Abb. 14), so ist der im Wasser um 1.4 m geringer als der im Alkohol.

Der Druck in einem dichteren Medium nimmt also mit der Höhe schneller ab als in einer weniger dichten Substanz.

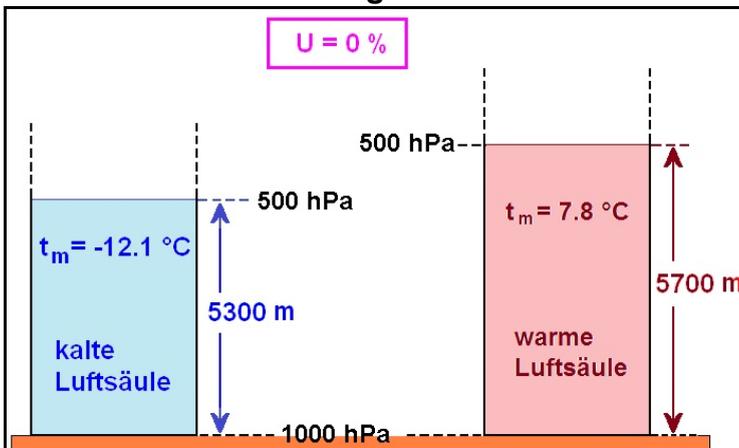
### Vertikale Druckänderung in Wasser und Alkohol (Abb. 14)



Bei einem Basisdruck von  $1000 \text{ hPa}$  und identischen Gefäßen liegt die Druckfläche  $500 \text{ hPa}$  im Wasser bei  $5.1 \text{ m}$  und im Alkohol bei  $6.5 \text{ m}$ .

Wie die Luftdichte ist die RETOP bei konstantem Luftdruck eine Funktion der Temperatur und des Wasserdampfgehaltes der Luft. Die Schichtdicke zweier gegebener Druckflächen nimmt mit steigender Schichtmitteltemperatur  $t_m$  und anwachsender mittleren relativen Luftfeuchte  $U_m$  zu und umgekehrt (s. Abb. 15, 16).

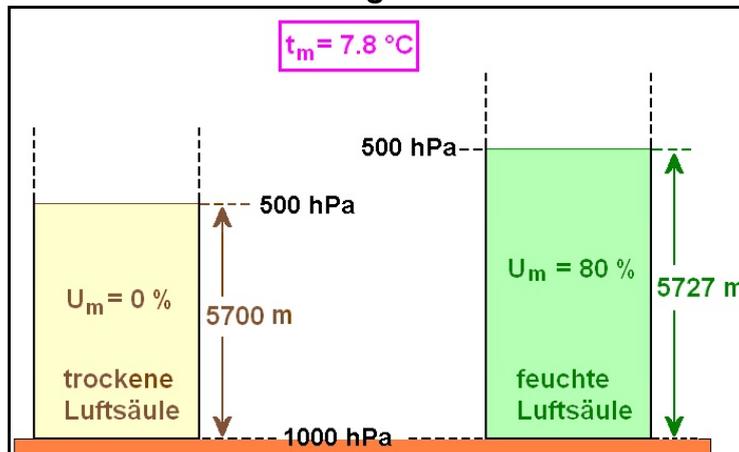
### Vertikale Druckänderung in einer kalten und warmen Luftsäule (Abb. 15)



Die relative Luftfeuchte  $U$  ist das Verhältnis des tatsächlichen Wasserdampfgehaltes der Luft zum maximal möglichen Gehalt in Prozent.

In absolut trockener Luft ( $U = 0 \%$ ) und einer Schichtmitteltemperatur  $t_m = -12.1 \text{ °C}$  (kalte Luft) beträgt die RETOP  $500/1000 \text{ hPa}$   $5300 \text{ m}$  und bei einem  $t_m = 7.8 \text{ °C}$  (warme Luft)  $5700 \text{ m}$ .

### Vertikale Druckänderung in einer trockenen und feuchten Luftsäule (Abb. 16)

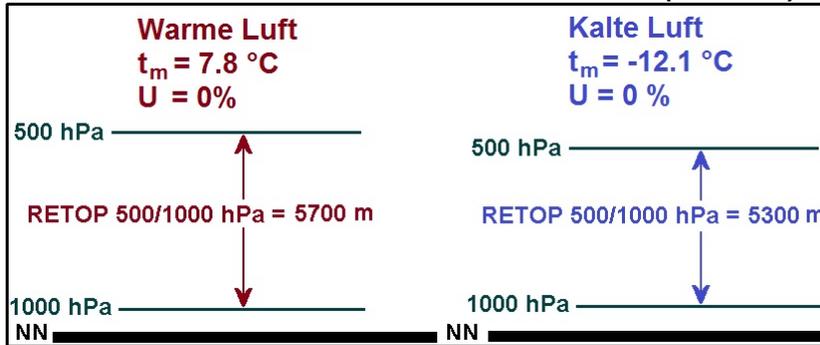


Wird eine Mitteltemperatur  $t_m = 7.8 \text{ °C}$  angenommen, so ergibt sich bei einer mittleren relativen Luftfeuchte von  $U_m = 0 \%$  (trockene Luft) eine Schichtdicke von  $5700 \text{ m}$  und bei einem  $U_m = 80 \%$  (feuchte Luft) eine Schichtdicke von  $5727 \text{ m}$ .

### 4.2.2 Schichtmitteltemperatur $t_m$

Bei hohen Schichtmitteltemperaturen  $t_m$  ist die Luftdichte klein und umgekehrt. Die RETOP nimmt deshalb bei hohen  $t_m$  große und bei geringen  $t_m$  kleine Werte an (s. Abb. 17).

#### RETOP einer warmen und kalten Luftsäule (Abb. 17)



Bei  $U = 0\%$  und einer Schichtmitteltemperatur  $t_m = 7.8\text{ °C}$  (warme Luft) beträgt die RETOP 500/1000 hPa 5700 m und bei einem  $t_m = -12.1\text{ °C}$  (kalte Luft) liegt sie um 400 m niedriger.

### 4.2.3 Mittlere relative Luftfeuchte $U_m$

Wasserdampf hat eine geringere Dichte als trockene Luft (s. Tab. 3). Daraus folgt, dass auch die Dichte eines Gasgemisches aus Wasserdampf und trockener Luft kleiner sein muss als die von trockener Luft. Die RETOP ist damit vom mittleren Wasserdampfgehalt der Luftschicht zwischen den beiden Druckflächen abhängig.

Je größer deshalb die mittlere relative Luftfeuchte  $U_m$  ist, desto höhere Werte zeigt die relative Topographie und umgekehrt (s. Abb. 18).

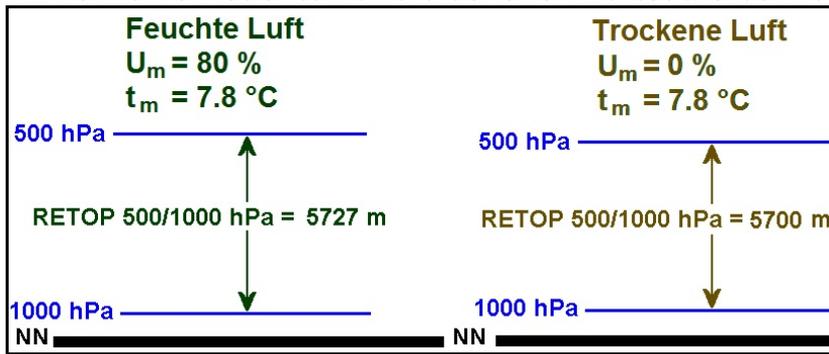
#### Dichte von Wasserdampf, trockener und feuchter Luft (Tab. 3)

Gas	Dichte	
trockene Luft (kein Wasserdampf)	$\rho_d = 1.2923\text{ kg m}^{-3}$	bei $p_0 = 1013.25\text{ hPa}$ und $T_0 = 273.15\text{ K}$
Wasserdampf	$\rho_w = 0.8037\text{ kg m}^{-3}$	
feuchte Luft: Gasgemisch aus trockener Luft und Wasserdampf; hier im Mischungsverhältnis 3:1	$\rho_L = 1.1702\text{ kg m}^{-3}$	

$T_0$  und  $p_0$  sind Werte der ICAO-Standardatmosphäre in NN

Allerdings sind die Schichtdickenänderungen bei Schwankungen des mittleren Wasserdampfgehaltes der Luftsäule wesentlich geringer als bei Modifikationen der Schichtmitteltemperatur (s. Abb. 18).

**RETOP einer feuchten und trockenen Luftsäule bei konstantem  $t_m$  (Abb. 18)**



Bei gleicher Schichtmitteltemperatur von  $t_m = 7.8 \text{ °C}$  ist die relative Topographie 500/1000 hPa in feuchter Luft um 27 m größer als die von trockener Luft.

**4.2.4 Virtuelle Temperatur  $t_v$**

Die relative Topographie ist, wie bisher erläutert wurde, eine Funktion der mittleren Temperatur und des durchschnittlichen Wasserdampfgehaltes. Um diese komplexe Beziehung aufgrund der großen Schwankungen der Luftfeuchte zu vereinfachen, geht man von der Annahme aus, dass die Luft absolut trocken sei. Dieser Schritt vereinfacht theoretische meteorologische Betrachtungen und erleichterte früher wesentlich die in der Praxis manuell durchgeführten aerologischen Berechnungen zur Bestimmung der Höhen der absoluten Topographien. Der Feuchtegehalt der Luft wird jedoch nicht vernachlässigt, sondern dadurch berücksichtigt, dass die Temperatur der trockenen Luft soweit erhöht wird, bis ihre Dichte genau der Dichte der gegebenen wasserdampfhaltigen Luft entspricht. Diese etwas höhere Temperatur der trockenen Luft wird virtuelle Temperatur  $t_v$  genannt und der Temperaturzuschlag aufgrund der Luftfeuchte heißt virtueller Temperaturzuschlag  $t_{vz}$ . Je höher der Wasserdampfgehalt der Luft, desto größer ist der virtuelle Temperaturzuschlag  $t_{vz}$  und die virtuelle Temperatur  $t_v$ . Der größte virtuelle Temperaturzuschlag  $t_{vz}$  ergibt sich bei einer relativen Luftfeuchte von  $U = 100 \%$ .

**Virtuelle Tempera :** Temperatur, die trockene Luft aufweisen muss, wenn sie bei gleichem Druck die gleiche Dichte haben soll wie die gegebene feuchte Luft;  
 $t_v = t + t_{vz}$

**Virtueller Temper- raturzuschlag  $t_{vz}$** : Temperaturzuschlag, der trockener Luft erteilt werden muss, damit sie bei gleichem Druck die gleiche Dichte hat wie feuchte Luft;  $t_{vz} \approx r/6$ ;  
 Das Mischungsverhältnis  $r$  [g kg<sup>-1</sup>] gibt an, wie viel Gramm Wasserdampf tatsächlich mit einem kg trockener Luft gemischt sind.

**Beispiel virtuelle Temperatur (Tab. 4)**

Temperatur $t$	Mischungsverhältnis $r$	Virtueller Temperaturzuschlag $t_{vz}$	Virtuelle Temperatur $t_v$
$t = 7.8 \text{ °C}$	$r = 7.5 \text{ g kg}^{-1}$	$t_{vz} \approx 1.3 \text{ °C}$	$t_v \approx 9.1 \text{ °C}$

Ist die virtuelle Schichtmitteltemperatur  $t_{vm}$  bekannt, dann lässt sich die RETOP mit Hilfe der barometrischen Höhenformel in integrierter Form berechnen (s. Form. 9, 10 und Tab. 5).

**Barometrische Höhenformel in integrierter Form (Form. 9)**

$$RETOP = 67.4 T_{vm} \log \frac{p_1}{p_2} [m]$$

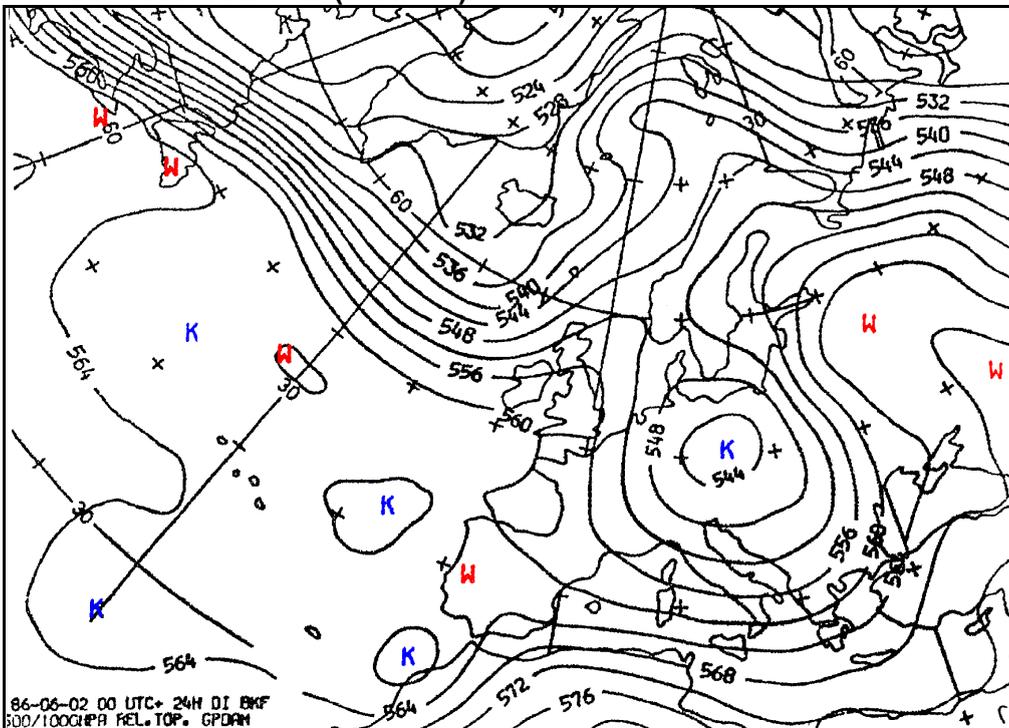
$$RETOP = 29.27 T_{vm} \ln \frac{p_1}{p_2} [m]$$

- RETOP : Schichtdicke [m] zwischen  $p_1$  und  $p_2$
- $T_{vm}$  : Virtuelle Schichtmitteltemperatur [K];  $T_{vm} = t_{vm} + 273.15$
- log : Dekadischer Logarithmus (zur Basis 10)
- ln : Natürlicher Logarithmus (zur Basis e);  $e = 2.718281...$
- $p_1$  : Untere Druckfläche, höherer Luftdruck [hPa]
- $p_2$  : Obere Druckfläche, tieferer Luftdruck [hPa]

**Berechnung der RETOP 500/1000 hPa (Tab. 5, Form. 10)**

Virtuelle Schichtmitteltemperatur		Luftdruck	
$t_{vm} = 9.1 \text{ } ^\circ\text{C}$		$p_1 = 1000 \text{ hPa}$	$p_2 = 500 \text{ hPa}$
Berechnung der RETOP mit dem			
dekadischen Logarithmus		natürlichen Logarithmus	
$RETOP = 67.4 \cdot (9.1 + 273.15) \cdot \log \frac{1000}{500}$		$RETOP = 29.27 \cdot (9.1 + 273.15) \cdot \ln \frac{1000}{500}$	
$RETOP = 67.4 \cdot 282.25 \cdot 0.301029996$		$RETOP = 29.27 \cdot 282.25 \cdot 0.693147181$	
$RETOP = 5726.7 \text{ m}$		$RETOP = 5726.4 \text{ m}$	

**RETOP 500/1000 hPa (Abb. 19)**



Die relative Topographie 500/1000 hPa, hier als Prognosekarte, nimmt eine Sonderstellung ein, weil die Druckfläche 500 hPa die Masse der Erdatmosphäre halbiert. Die Kurvenscharen sind Isohypsen im Abstand von 40 dam und gleichzeitig Isothermen, weil die RETOP eine Funktion der virtuellen Schichtmitteltemperatur  $T_{vm}$  ist. Von Isohypsen abgeschlossene tiefe Höhenbereiche (Tief) sind deshalb mit einem K (kalt) und hohe Höhenregionen (Hoch) mit einem W (warm) markiert. Dem Isohypsenabstand von 40 dam entspricht eine Temperaturänderung von 2 °C.

Weil die relative Topographie eine Funktion der mittleren virtuellen Temperatur  $t_{vm}$  (s. Form. 9) ist, stellen die Kurvenscharen der RETOP nicht nur Linien gleicher Höhe (Isohypsen), sondern gleichzeitig auch Linien konstanter Temperatur (Isothermen) dar (s. Abb. 19).

## 5. Register

- Absolute Topographie (ABTOP)** : Darstellung der Höhenlage einer Isobarenfläche über NN
- Aerologie** : Physik der freien Atmosphäre
- Arbeit W** : Kraft mal Weg  $\Rightarrow W = F s$  [J]  
F : Kraft [N]  
s : Weg [m]
- Beschleunigung a** : Geschwindigkeit pro Zeiteinheit  $\Rightarrow a = v t^{-1}$  [ $m s^{-2}$ ]  
v : Geschwindigkeit;  $v = s t^{-1}$  [ $m s^{-1}$ ]  
s : Weg [m]  
t : Zeit [s]
- Deka (da)** : Zehn; Vorsatz einer Maßeinheit
- Dichte  $\rho$**  : Masse pro Volumen  $\Rightarrow \rho = m V^{-1}$  [ $kg m^{-3}$ ]
- e** : Eulersche Zahl, Basis des natürlichen Logarithmus;  
 $e = 2,7182818284590452$
- Energie** : Arbeitsvermögen eines Körpers [J]
- Erdbeschleunigung g** : Erdschwerebeschleunigung, die ein frei fallender Körper im Gravitationsfeld der Erde erfährt [ $m s^{-2}$ ].
- f** : Gravitationskonstante;  $f = 6.67 \cdot 10^{-11} m^3 kg^{-1} s^{-2}$ ;  
Naturkonstante des Gravitationsgesetzes von Isaac Newton
- F** : Kraft [N]
- Feuchte Luft** : Gasgemisch aus trockener Luft und ungesättigtem Wasserdampf;  $U \geq 1$  bis  $\leq 99$  %
- Feuchtes Luftpaket** : s. feuchte Luft
- $F_G$**  : Gewichtskraft;  $F_G = m g$  [N]
- g** : Erdschwerebeschleunigung oder Erdbeschleunigung [ $m s^{-2}$ ];  
Äquator:  $g = 9.78 m s^{-2}$ ; Pol:  $g = 9.83 m s^{-2}$ ;  $g_0 = 9.80665 m s^{-2}$

<b><math>g_0</math></b>	: Erdbeschleunigung der ICAO in NN; $g_0 = 9.80665 \text{ m s}^{-2}$
<b>Gewicht</b>	: Umgangssprachlicher Ausdruck für die Gewichtskraft $F_G$
<b>Gewichtskraft <math>F_G</math></b>	: Kraft, mit der ein Körper von der Erde angezogen wird; $F_G = m g \text{ [N]}$ $m$ : Masse [kg] $g$ : Erdbeschleunigung [ $\text{m s}^{-2}$ ]
<b>Geopotential <math>\Phi</math></b>	: Potentielle Energie [ $\text{J kg}^{-1}$ ], die ein Luftpaket mit der Masse $m = 1 \text{ kg}$ in einer gegebenen Höhe über NN aufweist; $\text{J kg}^{-1} = \text{N m kg}^{-1} = \text{kg m s}^{-2} \text{ m kg}^{-1} = \text{m}^2 \text{ s}^{-2}$
<b>Geometrische Höhe <math>z</math></b>	: Vertikaler Abstand von NN in Metern [m]
<b>Geopotentielle Höhe <math>H</math></b>	: Vertikaler Abstand von NN in Metern [m]; die Maßzahl von $H$ entspricht der des geopotentiellen Standardmeters $m'$ ; $H = (R \cdot z)/(R + z) \text{ [m]}$ ; $R$ : Erdradius [m]; $z$ : Höhe [m]
<b>Geopotentielles Meter [gpm]</b>	: Maßeinheit des Geopotentials bis 1.7.1972; $1 \text{ gpm} = 9.8 \text{ J kg}^{-1}$ (Definition WMO); 1 gpm ist die potentielle Energie, die ein Luftpaket mit der Masse $m = 1 \text{ kg}$ besitzt, wenn es sich an einem Ort mit einem $g = 9.80 \text{ m s}^{-2}$ in der Höhe $z = 1 \text{ m}$ über NN befindet; $1 \text{ gpm} = 1 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$
<b>Geopotentielles Standard Meter <math>m'</math> [<math>\text{m}^2 \text{ s}^{-2}</math>]</b>	: Maßeinheit des Geopotentials seit 1.7.1972; $1 \text{ m}' = 9.80665 \text{ J kg}^{-1}$ (Definition WMO); 1 $m'$ ist die potentielle Energie, die ein Luftpaket mit der Masse $m = 1 \text{ kg}$ besitzt, wenn es sich an einem Ort mit einem $g = 9.80665 \text{ m s}^{-2}$ in der Höhe $z = 1 \text{ m}$ über NN befindet.
<b>Gesättigte Luft</b>	: Gasgemisch aus trockener Luft und gesättigtem Wasserdampf; $U = 100\%$
<b>gpm</b>	: Maßeinheit des Geopotentials bis 1.7.1972; $1 \text{ gpm} = 9.80 \text{ J kg}^{-1}$
<b>gpdam</b>	: Geopotentielles Dekameter; $1 \text{ gpdam} = 10 \text{ gpm}$
<b>h</b>	: Höhe [m]
<b>H</b>	: Geopotentielle Höhe $H$ [m] für die Luftfahrt
<b>Hubarbeit <math>W_H</math></b>	: Arbeit wird gegen die Schwerkraft der Erde senkrecht nach oben verrichtet; $W_H = m g h \text{ [J]}$ $m$ : Masse [kg] $g$ : Erdbeschleunigung [ $\text{m s}^{-2}$ ] $h$ : Höhe [m], um die der Körper gehoben wird
<b>ICAO</b>	: International Civil Aviation Organization
<b>Isobaren</b>	: Linien gleichen Luftdruckes

<b>Isobarenflächen</b>	: Druckflächen; Flächen gleichen Luftdruckes
<b>Isohypsen</b>	: Linien gleicher Höhe
<b>Isothermen</b>	: Linien gleicher Temperatur
<b>J</b>	: Joule; SI-Maßeinheit der Arbeit $W$ und Energie $W$
<b>Joule</b>	: SI-Maßeinheit der Arbeit $W$ und der Energie $W$
<b>Kraft <math>F</math></b>	: Masse mal Beschleunigung; $F = m a$ [N] $m$ : Masse [kg] $a$ : Beschleunigung [ $m s^{-2}$ ]
<b>kg</b>	: SI-Basiseinheit der Masse bzw. des Gewichts
<b>Kinetische Energie</b>	: Bewegungsenergie; Energie die ein Körper besitzt, wenn er sich bewegt; $W_{kin} = \frac{1}{2} m v^2$ [J] $m$ : Masse [kg] $v$ : Geschwindigkeit [ $m s^{-1}$ ]
<b>Latente Wärme</b>	: Wärmemenge $Q$ , die bei konstanter Temperatur und konstantem Druck für einen Aggregatzustandwechsel eines Stoffes benötigt bzw. dabei freigesetzt wird.
<b>Luftpaket</b>	: Luftquantum; abgeschlossenes kleines Luftvolumen, also eine kleinere Menge von Luft
<b>m</b>	: Masse [kg]
<b>m</b>	: Meter, SI-Basiseinheit der Länge
<b>m'</b>	: Neue Maßeinheit des Geopotentials; $1 m' = 9.80665 J kg^{-1}$
<b>M</b>	: Masse der Erde; $M = 5.9736 \cdot 10^{24} m$
<b>Masse <math>m</math></b>	: Ursache der Gewichtskraft und Maß für die Trägheit eines Körpers; $m = \rho V$ $\rho$ : Dichte [ $kg m^{-3}$ ] $V$ : Volumen [ $m^3$ ]
<b>Maßeinheit</b>	: Qualitative Angabe einer physikalischen Größe; Beispiel Lufttemperatur $t = 15.5 \text{ }^\circ C$ ; Maßeinheit oder Dimension ist Grad Celsius
<b>Maßzahl</b>	: Quantitative Angabe einer physikalischen Größe; Beispiel Lufttemperatur $t = 15.5 \text{ }^\circ C$ ; Maßzahl ist 15.5
<b>Mischungsverhältnis <math>r</math></b>	: Verhältnis der Masse oder Dichte des Wasserdampfes zur Masse oder Dichte der mit dem Wasserdampf gemischten trockenen Luft in derselben Volumeneinheit. Weil $r$ im Stüvediagramm angibt, wie viel Gramm Wasserdampf mit einem Kilogramm trockener Luft gemischt sind, gilt $r = r \cdot 10^3 [g kg^{-1}]$ .

<b>N</b>	: Newton; SI-Maßeinheit der Kraft
<b>Newton</b>	: SI-Maßeinheit der Kraft $F$ ; $1 \text{ N} = 1 \text{ kg m s}^{-2}$
<b>NN</b>	: Meeresniveau; mittlerer Amsterdamer Pegel
<b>Potentielle Energie <math>W_p</math></b>	: Energie der Lage; $W_p = m g z$ [J] m : Masse [kg] g : Erdbeschleunigung [ $\text{m s}^{-2}$ ] z : Höhe [m]
<b>r</b>	: Mischungsverhältnis (keine Dimension)
<b>R</b>	: Erdradius; mittlerer Erdradius $R = 6.371 \cdot 10^6 \text{ m}$
<b>Relative Höhe</b>	: Schichtdicke; Abstand zwischen zwei Isobarenflächen
<b>Relative Luftfeuchte U</b>	: Verhältnis der tatsächlichen vorhandenen Wasserdampfmenge der Luft zu seinem Maximalwert, der sich auf eine ebene, chemisch reine Wasseroberfläche bezieht und damit nur noch temperaturabhängig ist.
<b>Relative Topographie</b>	: RETOP; s. relative Höhe
<b>SI</b>	: Système International; internationales physikalisches Einheiten-System
<b>t</b>	: Temperatur [ $^{\circ}\text{C}$ ]
<b>T</b>	: Temperatur [K]
<b><math>t_m</math></b>	: Schichtmitteltemperatur [ $^{\circ}\text{C}$ ]
<b><math>t_v</math></b>	: Virtuelle Temperatur; $t_v = t + t_{vz}$ [ $^{\circ}\text{C}$ ] bzw. $T_v = T + t_{vz}$ [K]
<b><math>t_{vm}</math></b>	: Virtuelle Schichtmitteltemperatur; $t_{vm} = t_m + t_{vz}$ [ $^{\circ}\text{C}$ ] bzw. $T_{vm} = T_m + t_{vz}$ [K]
<b><math>t_{vz}</math></b>	: Virtueller Temperaturzuschlag; $t_{vz} \approx r/6$ ; $r = r \cdot 1000$ [ $\text{g kg}^{-1}$ ]
<b>Taupunkt <math>t_d</math></b>	: Temperatur, auf die ein Volumen feuchter Luft isobar abgekühlt werden muss, damit Sättigung in bezug auf eine ebene, chemisch reine Wasseroberfläche eintritt.
<b>Temperatur</b>	: Maß für den Wärmezustand eines Körpers; die absolute Temperatur $T$ ist der mittleren kinetischen Energie eines Gases proportional.
<b>Thermische Energie</b>	: Umgangssprachlich als Wärme oder Wärmeenergie bezeichnete Energie, die auf der von der absoluten Temperatur abhängigen ungeordneten Bewegung der Atome oder Moleküle (kinetische Energie) eines Stoffes beruht.

<b>Thermodynamik</b>	: Früher Wärmelehre, Teilgebiet der klassischen Physik
<b>Topographie</b>	: Orts- oder Geländebeschreibung
<b>Trockene Luft</b>	: Luft, die keinen Wasserdampf enthält; $U = 0 \%$
<b>Tropopause</b>	: Grenzschicht zwischen der Troposphäre, der untersten thermischen Schicht der Atmosphäre, und der nächsten thermischen Schicht, der Stratosphäre
<b>Ungesättigte Luft</b>	: s. feuchte Luft
<b>Virtuelle Temperatur <math>t_v</math></b>	: Temperatur, die trockene Luft aufweisen muss, wenn sie bei gleichem Druck die gleiche Dichte haben soll wie gegebene feuchte Luft; $t_v = t + t_{vz} [^{\circ}\text{C}]$ bzw. $T_v = T + t_{vz} [\text{K}]$
<b>Volumen V</b>	: Ausdehnung eines Stoffes (Raummaß); $V = A h [\text{m}^3]$ A : Fläche [ $\text{m}^2$ ] h : Höhe [m]
<b>Virtueller Temperaturzuschlag <math>t_{vz}</math></b>	: Temperaturzuschlag, der trockener Luft erteilt werden muss, damit sie bei gleichem Druck die gleiche Dichte hat wie feuchte Luft; $t_{vz} \approx r/6$ ; $r = r \cdot 1000 [\text{g kg}^{-1}]$
<b>W</b>	: Mechanische Arbeit und Energie [J]
<b>Wasserdampf</b>	: Gasförmiger Aggregatzustand des Stoffes Wasser
<b>Wärme</b>	: Wärmemenge; in der Meteorologie z.B. die thermische Energie, die durch den Wasserdampf als latente Wärme vom Erdboden in die Troposphäre transportiert wird.
<b><math>W_H</math></b>	: Hubarbeit [J]
<b>WMO</b>	: World Meteorological Organization

## **Literatur**

- *Buch und Zeit Verlagsgesellschaft mbH Köln* : *Großes Handbuch Physik 1998*
- *ICAO Doc 74488/3* : *Manual of the ICAO Standard Atmosphere; Third Edition, 1993*
- *Hering, E./Martin, R./Stohrer, M.* : *Physik für Ingenieure, 3. Auflage; VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf 1989*
- *Höfling, O.* : *Physik, 12. Auflage; Ferd. Dümmler Verlag, Bonn 1979*
- *Krist, T.* : *Neue internationale Einheiten der Technik und Physik, 2. Auflage 1973, Technik-Tabellen-Verlag Fikentscher & Co, Darmstadt*
- *Wikipedia* : *Freie Enzyklopädie in mehr als 100 Sprachen; <http://de.wikipedia.org/wiki/Hauptseite>*