

# MIKROKLIMATISCHE KONSEQUENZEN DER AUFFORSTUNG VON GRASLAND

Jutta Rost, Helmut Mayer und Andreas Matzarakis

Meteorologisches Institut der Universität Freiburg, Werderring 10, D-79085 Freiburg

## ZUSAMMENFASSUNG

Für den Zeitraum 1991 bis 1996 werden mittlere energetische und thermodynamische Unterschiede zwischen den Landnutzungen Grasland und Wald untersucht. Grundlage dafür sind meteorologische Daten von den benachbarten Stationen Bremgarten (Grasland) und Hartheim (Wald, *Pinus sylvestris*) in der südlichen Oberrheinebene. Diese Stationen waren Teil des REKLIP-Energiebilanzmessnetzes.

Erste Ergebnisse zeigen in erster Linie Unterschiede in der für die Umwandlung in turbulente Wärmeflüsse verfügbaren Energie, was im wesentlichen auf die unterschiedliche Albedo der beiden Landnutzungen zurückzuführen ist. So weist die Strahlungsbilanz von Wald im Jahresmittel einen Überschuss von 32 % gegenüber der Strahlungsbilanz von Grasland auf. In Perioden, in denen das BREB-Verfahren angewendet werden konnte, betrug der mittlere Anteil des turbulenten Stroms latenter Wärme an der verfügbaren Energie im Sommerhalbjahr bei Wald 54 % und bei Grasland 59 %.

## ABSTRACT

Based on meteorological data set collected over two adjacent sites, mean energetic and thermodynamic differences between grassland and forest land use types have been investigated for the

period 1991 to 1996. The experimental sites, which constitute a segment of REKLIP network of energy balance stations, are located at Bremgarten (grassland) and Hartheim (Scots pine forest, *Pinus sylvestris*) in the southern Upper Rhine valley region.

Preliminary results for the two sites show differences in available energy which can be transformed into turbulent heat fluxes. This is owing mainly to the different albedo of the two land use types. The annual mean of net radiation over the forest site was 32 % higher than that over grassland. With the application of BREB method for summer periods, the proportion of turbulent latent heat flux in the available energy was 54 % for forest and 59 % for grassland on the average.

## 1 EINLEITUNG

Landnutzungsänderungen unterschiedlicher Größenordnung sind weltweit für viele Regionen charakteristisch. Sie beziehen sich auf die Umwandlung von natürlichen in versiegelte Oberflächen infolge zunehmender Urbanisierung und Industrialisierung, insbesondere in den Entwicklungsländern, schließen aber auch die Änderungen von verschiedenen natürlichen Landnutzungsarten untereinander ein. So haben Aufforstungen von landwirtschaftlichen Flächen („Grasland“) eine Umwandlung der Landnutzung zum Typ „Wald“ zur Folge.

Gerade in Deutschland wird versucht, mit Hilfe dieser Aufforstung der globalen Klimaerwärmung entgegenzuwirken. Der hierdurch entstehende größere Waldflächenanteil hat eine erhöhte photosynthetische Bindung des Treibhausgases CO<sub>2</sub> zur Folge und kann damit eine geringere Erwärmung der Atmosphäre verursachen (FABIAN und MENZEL, 1998; BURSCHEL et al., 1993; BAUMGARTNER, 1982).

Neben diesem luftchemischen Effekt haben Umwandlungen der Landnutzung, z.B. durch Veränderungen von Albedo, Rauigkeitsparameter und Bowen Verhältnis, direkte physikalische Auswirkungen auf die atmosphärische Grenzschicht, in welcher der Energie- und Impulsaustausch mit der darüber liegenden freien Atmosphäre bestimmt wird (SONG et al., 1997; BERNHOFER et al., 1996; CLAUSSEN und KLAASSEN, 1992). Ein weiterer wesentlicher Beitrag ist die Vermeidung bzw. Kappung von Hochwasserspitzen durch die höhere Verdunstung und Wasserspeicherkapazität von Waldgebieten. Dieser Aspekt ist sicherlich im Hinblick auf den Erosionsschutz durch Bannwälder und den Hochwasserschutz durch Auwälder, die entlang von Flussläufen als natürlicher Überflutungsraum dienen, als positiv zu bewerten (WOHLRAB, 1992).

Unterschiede zwischen Klimavariablen von verschiedenen Landnutzungen wurden bereits in früheren, zeitlich limitierten Fallstudien analysiert (u.a. WICKE und BERNHOFER, 1996; KOHLER et al., 1997). Bisher fehlen jedoch Ergebnisse, die auf meteorologischen Daten aus längeren Zeiträumen beruhen und somit eine deutlich stärker belastbare Grundlage für die Quantifizierung der

energetischen Konsequenzen von Landnutzungsänderungen bilden. Daneben sind Resultate über landnutzungsspezifische Energieflüsse auch im Hinblick auf die Regionalisierung der Ergebnisse von Klimamodellen relevant. Diese Problematik gewinnt zunehmend an Bedeutung (von STORCH, 1998; von STORCH et al., 1999; GIORGO und MEARNNS, 1991).

## 2 DATENGRUNDLAGE

Die hier präsentierten Resultate stammen aus einer Untersuchung mit der Zielsetzung, die Energieflüsse von Grasland und Wald sowie damit zusammenhängende Klimavariablen quantitativ zu differenzieren. Grundlage dafür sind meteorologische Daten von Profilmasten an den benachbarten Energiebilanzstationen Bremgarten und Hartheim in der südlichen Oberrheinebene. Die Station Bremgarten mit Grasland als Landnutzung wurde von 1991 bis 1996 im Rahmen von REKLIP (**R**egionales **K**lima-**P**rojekt) vom Meteorologischen Institut der Universität Freiburg betrieben (u.a. IZIMON et al., 2001). Bei der Station Hartheim handelt es sich um die ca. 4 km nördlich von Bremgarten liegende, langfristige Forstmeteorologische Messstelle Hartheim des Meteorologischen Instituts der Universität Freiburg (MAYER et al., 2000). Sie befindet sich mitten im Hartheimer Wald in einem Bestand aus Waldkiefern (*Pinus sylvestris*). Er wird in dieser Untersuchung als typisch für die Landnutzung Wald angesehen. Die vergleichenden Analysen von energetischen Kenngrößen beider Landnutzungen beruhen auf meteorologischen Daten im Zeitraum

1991 bis 1996, d.h. dem Zeitraum der speziellen REKLIP Energiebilanzuntersuchungen (KALTHOFF et al., 1999).

### 3 METHODIK

Die in der Strahlungsbilanz zusammengefassten Strahlungsströme bilden die energetische Voraussetzung für die Energieumsetzungen an den landnutzungsspezifischen Oberflächen. In der Strahlungsbilanzgleichung

$$Q = G - R - E + A \quad (1)$$

sind Q: Strahlungsbilanz, G: Globalstrahlung, R: kurzwellige Reflexstrahlung, E: langwellige Ausstrahlung der Oberfläche und A: atmosphärische Gegenstrahlung.

Die Albedo  $a$  ist der Quotient  $R/G$ . Die kurzwellige Strahlungsbilanz  $Q_s$  setzt sich aus

$$Q_s = G - R \quad (2)$$

zusammen. Die langwellige Strahlungsbilanz  $Q_l$  wird aus

$$Q_l = A - E \quad (3)$$

berechnet.

Die Energiebilanzgleichung einer Oberfläche lautet in allgemeiner Form

$$Q = B + H + V \quad (4).$$

Neben der Strahlungsbilanz  $Q$  enthält Gleichung (4) den Bodenwärmestrom  $B$ , den turbulenten Strom fühlbarer Wärme  $H$  und den turbulenten Strom latenter Wärme  $V$ .  $Q$  wird positiv gezählt, wenn es einen Energietransport zur Energieumsatzfläche beschreibt; andernfalls ist  $Q$  negativ.  $B$ ,  $H$  und  $V$  werden positiv gezählt, wenn sie

einen Energietransport von der Energieumsatzfläche weg beschreiben; sonst sind sie negativ. Bei Waldbeständen wird Gleichung (4) um den Bestandeswärmestrom  $BST$  erweitert

$$Q = B + BST + H + V \quad (5),$$

für den die gleiche Vorzeichenregelung wie für  $B$  gilt. In Gleichung (5) ist der Energieumsatz infolge Assimilation vernachlässigt. Über Grasland stellt die Differenz  $Q - B$  die zur Verfügung stehende Energie dar, die in die Ströme  $H$  und  $V$  aufgeteilt wird. Bei Wald setzt sich die zur Verfügung stehende Energie aus  $Q - B - BST$  zusammen.

Die turbulenten Ströme fühlbarer Wärme  $H$  und latenter Wärme  $V$  wurden in dieser Untersuchung über das BREB-Verfahren ermittelt. Probleme dieser Methode sind u.a. bei LIU und FOKEN (2001) näher erläutert. Die für die Anwendung des BREB-Verfahrens erforderliche horizontale Homogenität des Geländes ist für die beiden landnutzungsspezifischen Messstationen gegeben. Das BREB-Verfahren, das infolge der Gleichsetzung der Austauschkoefizienten für fühlbare und latente Wärme die vollständige Umwandlung der zur Verfügung stehenden Energie in  $H$  und  $V$  bewirkt, hat den Vorteil, dass lediglich Gradienten von Lufttemperatur und -feuchte in Höhe der Umsatzfläche sowie die zur Verfügung stehende Energie benötigt werden.

Zur Berechnung von  $H$  und  $V$  wurden in dieser Untersuchung Messdaten aus 2 m und 10 m über Grasland sowie 12 m und 19 m über Kiefernwald herangezogen. Für die Auswahl der unteren Messhöhe beim Wald war ausschlaggebend, dass sie nahe an der Bestandeshöhe liegen sollte. Als obere Messhöhe bei Wald wurde 19

m über Grund ausgewählt, weil Vertikalprofile von Lufttemperatur und Dampfdruck in Höhen zwischen 19 und 23 m Höhe über Grund häufig ein Maximum oder Minimum aufwiesen. Letztlich wurde bei der Festlegung der als Berechnungsgrundlage dienenden Messhöhen über Wald auch auf einen möglichst vollständigen Satz an Profildaten für die Anwendung des BREB-Verfahrens geachtet.

Wegen methodischer Probleme konnte das BREB-Verfahren nicht für den gesamten Untersuchungszeitraum, sondern nur für bestimmte Zeiträume angewendet werden. Dabei handelt es sich im Sommerhalbjahr um ca. 45 % aller Stunden und im Winterhalbjahr um ca. 39 % aller Stunden in den Jahren 1992 bis 1995. Aus der Zeit zwischen 7 und 18 Uhr stammen im Sommerhalbjahr ca. 61 % und im Winterhalbjahr ca. 55 % der entsprechenden Datensätze. Daraus folgt, dass bezüglich H und V die Sommerhalbjahrs- bzw. Tagesperioden etwas stärker als die Winterhalbjahrs- bzw. Nachtperioden vertreten sind.

## 4 ERGEBNISSE

### 4.1 Strahlungsströme

Aus den in der Tab. 1 zusammengestellten Jahresmittelwerten der Strahlungsströme für Grasland und Wald im Zeitraum 1991 bis 1996 folgt:

- Atmosphärische Gegenstrahlung A und Globalstrahlung G, d.h. die Strahlungsflüsse aus dem oberen Halbraum, stimmen für beide Landnutzungen näherungsweise überein. Der wesentliche Grund

dafür dürfte in der vergleichsweise geringen horizontalen Entfernung zwischen den beiden Landnutzungsstationen liegen.

- Die kurzwellige Reflexstrahlung R von Grasland ist etwa doppelt so hoch wie R von Wald. Daraus resultiert eine Albedo  $a = 0.22$  für Grasland und  $a = 0.11$  für Wald. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass es sich beim Wald um einen Bestand aus Waldkiefer (*Pinus sylvestris*) handelt. Nach KESSLER und JAEGER (1999) sind die geringeren Albedowerte von Wald auf seine Dreidimensionalität zurückzuführen, an dessen strukturierter Oberfläche Mehrfachreflexionen auftreten.
- Wegen der unterschiedlichen Albedowerte ist die kurzwellige Strahlungsbilanz  $Q_s$  bei Wald um ca. 15 % höher als bei Grasland.
- Die emittierte langwellige Strahlung E liegt im Jahresmittel bei der Landnutzung Grasland geringfügig höher (0.6 %) als bei Wald. Die bei Grasland größere Standardabweichung repräsentiert die dort höhere Schwankungsbreite der Einzelwerte. Sie tritt bei Wald wegen seiner ausgeprägten vertikalen Struktur (mittlere Bestandeshöhe im Jahr 1992: 11.5 m; im Jahr 1995: 13.6 m) nur in reduziertem Ausmaß auf.

Tab.1: Jahresmittelwerte  $MIT$  und Standardabweichung  $\sigma$  von Globalstrahlung  $G$ , kurzwelliger Reflexstrahlung  $R$ , kurzwelliger Albedo  $a$ , kurzwelliger Strahlungsbilanz  $Q_s$ , langwelliger Ausstrahlung  $E$ , atmosphärischer Gegenstrahlung  $A$ , langwelliger Strahlungsbilanz  $Q_l$  und Strahlungsbilanz  $Q$  für Grasland (Bremgarten) und Wald (Hartheim, Pinus sylvestris) in den Jahren 1991 bis 1996

	Grasland		Wald	
	MIT (W/m <sup>2</sup> )	$\sigma$ (W/m <sup>2</sup> )	MIT (W/m <sup>2</sup> )	$\sigma$ (W/m <sup>2</sup> )
G	127.2	214.6	127.7	215.6
R	28.1	46.6	13.7	22.2
a	0.22	--	0.11	--
$Q_s$	99.1	168.6	114.0	193.9
E	367.8	53.0	365.7	43.3
A	322.1	42.8	321.9	44.2
$Q_l$	-45.7	41.0	-43.8	38.3
Q	53.4	136.2	70.2	171.9

- Die langwellige Strahlungsbilanz  $Q_l$  stellt für beide Landnutzungen einen Energieverlust dar. Infolge der unterschiedlichen langwelligeren Ausstrahlung ist er bei Grasland etwas höher (ca. 4 %) als bei Wald.
- Die Strahlungsbilanz  $Q$  beträgt bei Wald im Mittel 70 W/m<sup>2</sup>. Sie liegt damit um ca. 32 % über  $Q$  von Grasland. Unter Berücksichtigung der Resultate von BAUMGARTNER (1971) geht daraus hervor, dass Wald die Landnutzung ist, die aus dem

Strahlungsumsatz am meisten Energie gewinnt und daher energetisch das wirksamste Landschaftselement bildet.

Bei der Analyse von Monatsmittelwerten zeigt die Albedo  $a$  von Grasland im Gegensatz zur Albedo des Waldes einen deutlichen Jahresgang (Abb. 1). Seine Amplitude beträgt bei Grasland bis zu 8 %. Der Jahresgang von  $a$  für Grasland ist hauptsächlich auf die phänologische Entwicklung des Graslandes (junge Triebe im Frühjahr, trockenes Gras aufgrund von Trocken- und Hitzestress im Sommer) zurückzuführen. Zeiträume im Winter mit Schneebedeckung des Boden treten in der Untersuchungsregion verhältnismäßig selten auf, so dass sie sich nur marginal auf  $a$  auswirken. Bei Wald, hier der Kiefernwald, haben Maitrieb, Blüte oder Fruchtreife der immergrünen Kiefern fast keinen Einfluss auf die Albedo.

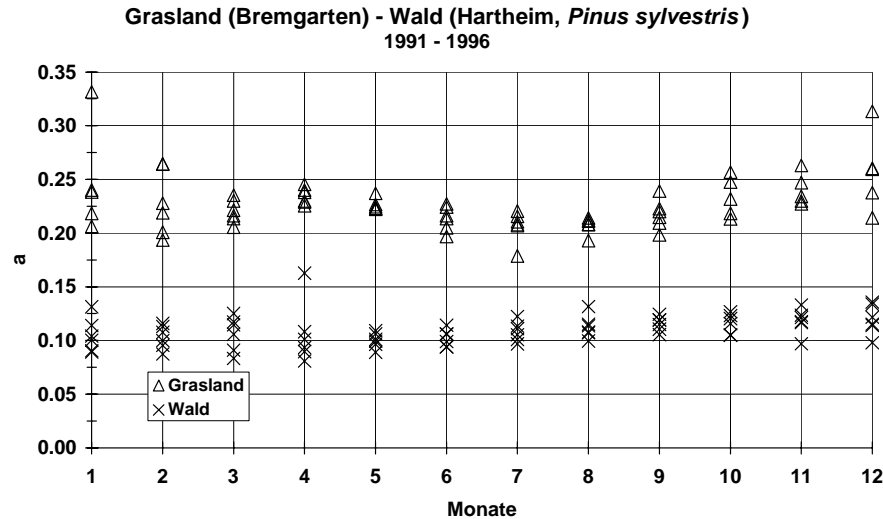


Abb. 1: Monatsmittelwerte der kurzwelligen Albedo  $a$  von Grasland (Bremgarten) und Wald (Hartheim, *Pinus sylvestris*) in den Jahren 1991 bis 1996

Während die Monatsmittelwerte der kurzwelligen Strahlungsströme von beiden Landnutzungen in Einklang mit den entsprechenden Jahresmittelwerten stehen, treten bei den Monatsmittelwerten der langwelligen Ausstrahlung  $E$  Unterschiede auf. So ist in den Sommermonaten  $E$  von Grasland gegenüber  $E$  von Wald erhöht, während in den Wintermonaten  $E$  von Grasland leicht niedrigere Werte aufweist. Ursache hierfür ist erneut die im Vergleich zu Grasland deutlich größere vertikale Erstreckung von Wald. Durch die größeren Anteile abgeschatteter Flächen kann sich die Luft an der Energieumsatzfläche (Oberfläche) des Waldes im Sommer nicht in dem Maße erwärmen wie die ebene Grasfläche. Im Hochsommer

(Juli/August) beträgt die mittlere monatliche Differenz  $E(\text{Grasland}) - E(\text{Wald})$  bis zu  $9 \text{ W/m}^2$ . In den Wintermonaten reduzieren die Baumkronen des immergrünen Kiefernwaldes die effektive Ausstrahlung, wodurch sich die Waldoberfläche nicht so stark abkühlt wie die Graslandfläche.

#### 4.2 Wärmeströme

In der Tab. 2 sind die Ergebnisse für die Energieflüsse getrennt nach Sommerhalbjahr (April bis Oktober) und Winterhalbjahr (November bis März) in den Jahren 1992 bis 1995 zusammengestellt. Wie bereits erwähnt, wurden nur die Perioden berücksichtigt, in denen zur Bestimmung von  $H$  und  $V$  das BREB-Verfahren angewendet werden konnte. Aus diesem Grund liegen auch die Jahresmittelwerte der Strahlungsbilanz  $Q$  aus der Tab. 2 deutlich über denjenigen in der Tab. 1 (Grasland: Tab. 1:  $53.4 \text{ W/m}^2$ , Tab. 2:  $79.9 \text{ W/m}^2$ ; Wald: Tab. 1:  $70.2 \text{ W/m}^2$ , Tab. 2:  $101.6 \text{ W/m}^2$ ).

Tab. 2: Mittelwerte MIT und Standardabweichung  $\sigma$  von Strahlungsbilanz Q, Bodenwärmestrom B, Bestandeswärmestrom BST, turbulentem Strom fühlbarer Wärme H und turbulentem Strom latenter Wärme V für Grasland (Bremgarten) und Wald (Hartheim, Pinus sylvestris) für Perioden, in denen das BREB-Verfahren angewendet wurde, im Sommerhalbjahr (April bis Oktober) und Winterhalbjahr (November bis März); Zeitraum 1992 bis 1995

		Q (W/m <sup>2</sup> )	B (W/m <sup>2</sup> )	BST (W/m <sup>2</sup> )	H (W/m <sup>2</sup> )	V (W/m <sup>2</sup> )
Grasland, Sommer	MIT	123.0	3.9	--	48.8	70.3
	$\sigma$	173.4	19.4	--	82.7	87.8
Wald, Sommer	MIT	153.6	1.7	2.3	69.4	80.2
	$\sigma$	218.0	8.8	11.4	140.9	121.3
Grasland, Winter	MIT	19.5	-4.6	--	4.4	19.7
	$\sigma$	86.4	13.8	--	39.2	48.5
Wald, Winter	MIT	28.7	-4.7	0.5	2.9	30.0
	$\sigma$	103.7	5.6	5.6	42.6	73.7

Bei Grasland beträgt der Anteil von B an Q im Mittel über das Sommerhalbjahr 3.2 %; im Mittel über das Winterhalbjahr hingegen 23.6 % (siehe Tab. 2). Bei Wald erreichte B im Sommerhalbjahr nur 1.1 % von Q und im Winterhalbjahr 16.4 % von Q. Bei beiden Landnutzungen ist zu beachten, dass B im Sommerhalbjahr im Mittel von der Energieumsatzfläche in den Boden gerichtet war, während es sich im Winterhalbjahr umgekehrt verhielt.

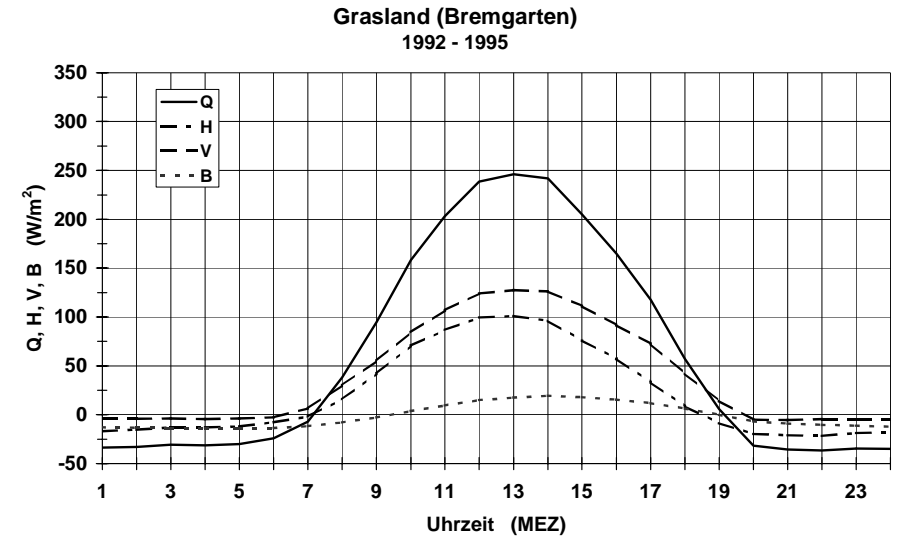


Abb. 2: Mittlere Tagesgänge von Strahlungsbilanz Q, turbulentem Strom fühlbarer Wärme H, turbulentem Strom latenter Wärme V und Bodenwärmestrom B der Landnutzung Grasland an der REKLIP-Station Bremgarten in den Jahren 1992 bis 1995

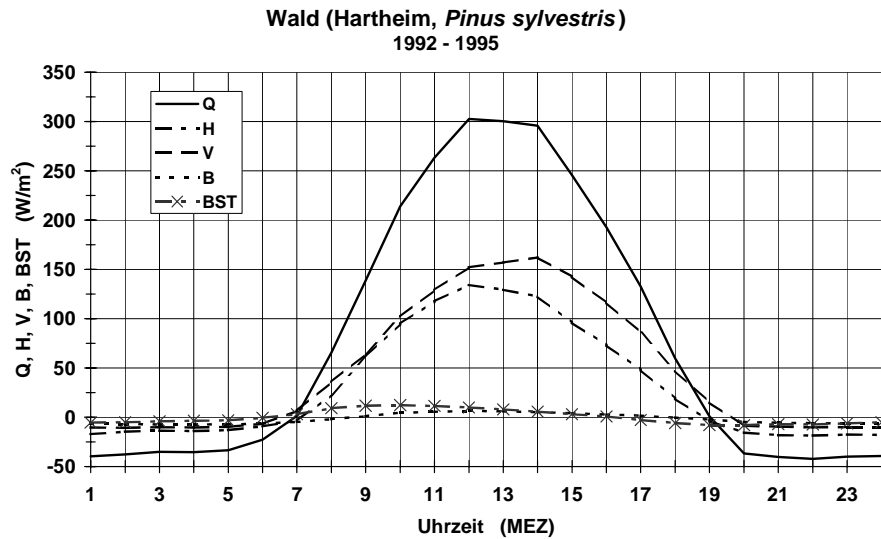


Abb. 3: Mittlere Tagesgänge von Strahlungsbilanz Q, turbulentem Strom fühlbarer Wärme H, turbulentem Strom latenter Wärme V, Bodenwärmestrom B und Bestandeswärmestrom BST der Landnutzung Wald an der Forstmeteorologischen Messstelle Hartheim (Kiefernwald, *Pinus sylvestris*) in den Jahren 1992 bis 1995

Bei Wald war der Betrag des Bestandeswärmestroms BST im Winterhalbjahr deutlich kleiner als B. Im Sommerhalbjahr erreichte BST 1.5 % von Q.

Die mittleren Tagesgänge der Energieströme sind für Grasland in der Abb. 2 und für Wald in der Abb. 3 enthalten. Bei beiden Landnutzungen sind tagsüber B, BST, H und V positiv, in den Nachtstunden hingegen negativ. Das bedeutet, dass in der Nacht der Energieverlust infolge von negativem Q durch die anderen

Energieströme kompensiert wird. Auffällig ist bei Wald, dass das mittlere stündliche Maximum von V auf den frühen Nachmittag verschoben ist, während es zeitlich bei H mit dem Maximum von Q zusammenfällt. Bei Grasland liegen die mittleren stündlichen Maxima von Q, H und V in der gleichen Mittagsstunde.

Hinweise auf saisonale Unterschiede von H und V der beiden Landnutzungen gibt die Tab. 2, wobei die jeweiligen Werte der verfügbaren Energie (= VE) als Bezug dienen. Danach erreichten bei Grasland im Sommerhalbjahr H 41.0 % und V 59.0 % von VE. Bei Wald war im Sommerhalbjahr der Anteil von V an VE mit 53.6 % etwas geringer als bei Grasland; H betrug dagegen 46.4 % von VE. Im Winterhalbjahr lagen die Mittelwerte von VE für beide Landnutzungen unter  $33 \text{ W/m}^2$ . Bei Grasland erreichte V 81.7 % von VE, während bei Wald V auf 91.2 % von VE anstieg. Dementsprechend kam H im Winterhalbjahr bei Grasland auf 18.3 % und bei Wald auf 8.8 % von VE.

Das Bowen Verhältnis H/V war im Sommerhalbjahr beim Wald mit 0.87 am größten. Ausschlaggebend dafür dürfte sein, dass sich der untersuchte Kiefernwald auf einem Trockenstandort befindet. Beim benachbarten Grasland betrug das Bowen Verhältnis im Sommerhalbjahr 0.69. Im Winterhalbjahr reduzierten sich die Bowen Verhältnisse und erreichten 0.10 bei Wald und 0.22 bei Grasland.

#### 4.3 Thermodynamische Größen

Die Lufttemperatur- und Dampfdruckbedingungen an einem Standort hängen, außer von der synoptischen Situation, von den



herrschenden Energieumsätzen und Strömungsverhältnisse ab. Da für die beiden hier betrachteten Landnutzungen von gleichen synoptischen Bedingungen ausgegangen werden kann, sind auftretende Unterschiede der thermodynamischen Größen auf energetische und dynamische Einflüsse zurückzuführen. Um diese Unterschiede zu verdeutlichen, sind in der Abb. 4 für die Lufttemperatur  $T_a$  und in der Abb. 5 für den Dampfdruck VP die mittleren Tagesgänge der Differenzen zwischen  $T_a$  bzw. VP in spezifischen Messhöhen zu  $T_a$  bzw. VP in 2 m über Grund am Standort Grasland enthalten.

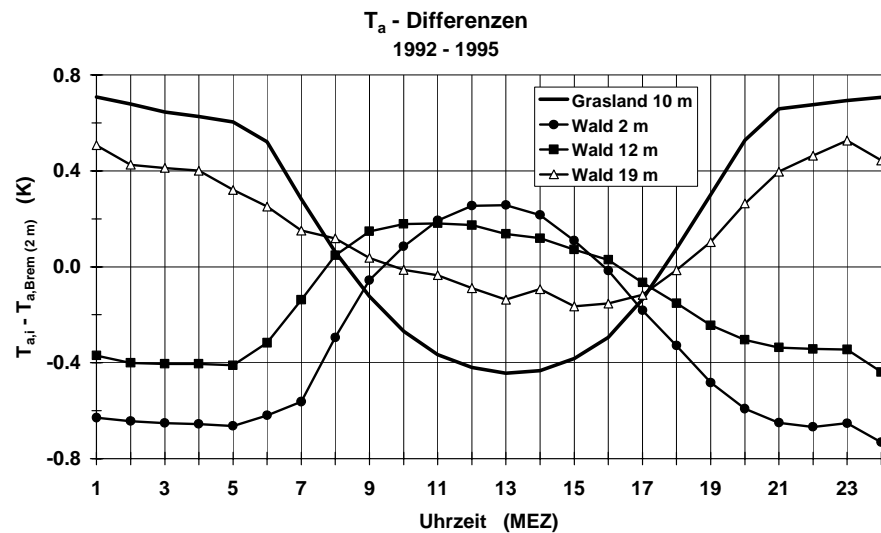


Abb. 4: Mittlerer Tagesgänge der Differenzen zwischen der Lufttemperatur  $T_a$  in 2 m, 12 m und 19 m Höhe über Grund am Standort Wald (Hartheim, *Pinus sylvestris*) sowie  $T_a$  in 10 m Höhe über Grund über Grasland (Bremgarten)

einerseits und  $T_a$  in 2 m Höhe über Grund über Grasland (Bremgarten) andererseits in den Jahren 1992 bis 1995

Wie zu erwarten ist die bodennahe Luftschicht über Grasland im mehrjährigen mittleren Tagesgang nachts stabil geschichtet, während sich tagsüber durch die Erwärmung der Oberfläche eine konvektive Schichtung ausbildet. Die Kurven der  $T_a$ -Differenzen im und unmittelbar über dem Wald (2 m bzw. 12 m über Grund) verlaufen hingegen gegenläufig hierzu: Nachts ist es im Wald kälter und mit Sonnenaufgang erwärmt sich die Bestandesluft stärker als die Luft über Grasland. Erste Erklärungsansätze der auch von VOGT und PARLOW (1997) beobachteten Entwicklung beziehen sich auf

- den höheren Strahlungsgewinn des Waldes durch verringerte Albedowerte in den Mittagsstunden (WICKE und BERNHOFER, 1996),
- nächtliches Kaltluftabsinken aus dem Kronenraum in den Stammraum am Standort Wald,
- bessere Belüftungsbedingungen am Standort Grasland während des Tages.

Untersuchungen unter Berücksichtigung des Bedeckungsgrades zeigen eine Vergrößerung der berechneten Differenzen an Strahlungstagen. Hier liegt  $T_a$  im Wald (2 m über Grund) während der Mittagsstunden im Mittel um 1 K über  $T_a$  von Grasland (2 m über Grund). An bedeckten Tagen sind die  $T_a$ -Werte für beide benachbarten Landnutzungen in etwa gleich groß. Die Differenzen zwischen den übrigen Messhöhen verhalten sich analog hierzu.

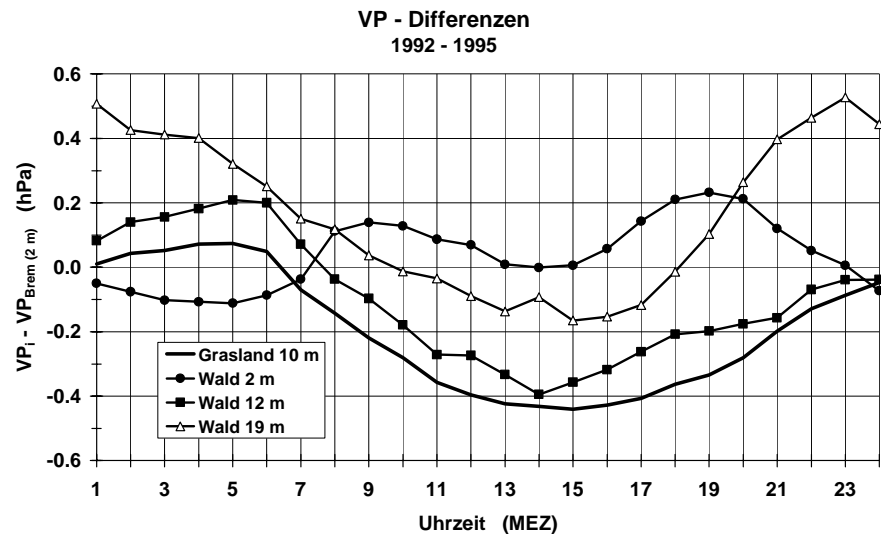


Abb. 5: Mittlerer Tagesgänge der Differenzen zwischen dem Dampfdruck VP in 2 m, 12 m und 19 m Höhe über Grund am Standort Wald (Hartheim, Pinus sylvestris) sowie VP in 10 m Höhe über Grund über Grasland (Bremgarten) einerseits und VP in 2 m Höhe über Grund über Grasland (Bremgarten) andererseits in den Jahren 1992 bis 1995

Die mittleren stündlichen Differenzen des Dampfdrucks VP zwischen der Luft über dem Wald und 2 m Höhe über Grund bei Grasland sowie die VP-Differenz zwischen 10 m und 2 m Höhe über Grund bei Grasland verhalten sich ähnlich (Abb. 5). Tagsüber sind die VP-Differenzen aufgrund des kombinierten Effektes von stärkerer Evapotranspiration bei Grasland und Zunahme der austauschrelevanten Windgeschwindigkeit mit der Höhe negativ. Nachts kehren sich die Verhältnisse um und VP steigt mit der Höhe leicht an.

Abweichend von diesem Muster verhält sich der mittlere Tagesgang der VP-Differenz zwischen 2 m Höhe über Grund im Wald und 2 m Höhe über Grund bei Grasland. Der im Stammraum des Waldes – im Vergleich zu Grasland - geringere Luftmassenaustausch dürfte im wesentlichen dafür verantwortlich sein, dass diese VP-Differenz weitgehend positiv ist. Auffallend ist noch das Minimum der mittleren Differenz  $VP_{\text{Wald, 2 m}} - VP_{\text{Grasland, 2 m}}$  in den Mittagsstunden, das mit der Regulierung der Transpiration durch die Stomata des Bestandesunterwuchses verbunden sein könnte.

## 5 AUSBLICK

Die Untersuchungen zu den mikroklimatischen Konsequenzen der Aufforstung von Grasland sind noch nicht abgeschlossen. Insbesondere die Berechnung von fühlbarem und latentem Wärmestrom am Standort Wald bedarf weiterer Analysen. Hierbei stehen zum einen die Frage nach der räumlichen Lage der Energieumsatzfläche des Waldes und zum anderen die Minimierung von Berechnungsfehlern durch Messungenauigkeiten im Vordergrund. Zur Bestimmung von Übertragungsfunktionen werden darüber hinaus die Bedingungen in der atmosphärischen Grenzschicht bei ausgewählten Wetterlagen untersucht. Von Interesse sind vor allem Nebel- und Strahlungstage sowie bestimmte Windrichtungen (Grasland im Luv des Waldes und umgekehrt).

## 6 DANKSAGUNG

Für die Beteiligung des Meteorologischen Instituts der Universität Freiburg an REKLIP mit den Stationen Bremgarten und Hartheim wird den Professoren Dr. A. Kessler und Dr. L. Jaeger gedankt. Herrn W. Wicke gilt der Dank für Einrichtung und Betrieb der Station Bremgarten sowie die vergleichsweise hohe Qualität der dort erhobenen Daten.

## LITERATUR

- BAUMGARTNER A (1971). Wald als Austauschfaktor in der Grenzschicht Erde/Atmosphäre. *Forstw. Cbl.* **90**, 174-182.
- BAUMGARTNER A (1982). Wald und Biosphäre. *AFZ* **37**, 615-621.
- BERNHOFER C, GAY L W, GRANIER A, JOSS U, KESSLER A, KÖSTNER B, SIEGWOLF R, TENHUNER JD, VOGT R (1996). The HartX-Synthesis: An experimental approach to water and carbon exchange of a Scots pine plantation. *Theor. Appl. Climatol.* **53**, 173-183.
- BURSCHEL P, KURSTEN E, LARSON B-C, WEBER M (1993). Present role of German forests and forestry in the national carbon budget and options to its increase. *Water-, Air- and Soil-Pollution* **70**, 325-340.
- CLAUSSEN M, KLAASSEN W (1992). On regional surface fluxes over partly forested areas. *Contr. Atm. Phys.* **65**, 243-248.
- FABIAN P, MENZEL A (1998). Wie sehen die Wälder von morgen aus – aus der Sicht eines Klimatologen. *Forstw. Cbl.* **117**, 339-354.
- GIORGI F, MEARNNS L (1991). Approaches to the simulation of regional climate change: a review. *Rev. Geophysics* **29**, 191-216.
- IZIOMON MG, MAYER H, WICKE W, MATZARAKIS A (2001). Radiation balance over low-lying and mountainous areas in south-west Germany. *Theor. Appl. Climatol.* **68**, 219-231.
- KALTHOFF N, FIEDLER F, KOHLER M, KOLLE O, MAYER H, WENZEL A (1999). Analysis of energy balance components as a function of orography and land use and comparison of results with the distribution of variables influencing local climate. *Theor. Appl. Climatol.* **62**, 65-84.
- KESSLER A, JAEGER L (1999). Long-term changes in net radiation and its components above a pine forest and a grass surface in Germany. *Int. J. Climatol.* **19**, 211-226.
- KOHLER M, MAYER H, WICKE W (1997). Klimatische Auswirkungen der Aufforstung von Grasland-Flächen. *REKLIP-Jahresbericht* 1996, 91-98.
- LIU H, FOKEN T (2001). A modified Bowen ratio method to determine sensible and latent heat fluxes. *Meteorol. Z.* **10**, 71-80.
- MAYER H, FERNBACH G, JAEGER L, MATZARAKIS A, REDEPENNING D (2000). Forstmeteorologische Messstelle Hartheim des Meteorologischen Institutes der Universität Freiburg. *Ber. Meteor. Inst. Univ. Freiburg* Nr. 5, 55-84.
- SONG J, WILLMOTT CJ, HANSON B (1997). Influence of heterogeneous land surfaces on surface energy and mass fluxes. *Theor. Appl. Climatol.* **58**, 175-188.

von STORCH H (1998). The global and regional climate system. In  
Anthropogenic climate change (ed. by H. von Storch and G.  
Flöser), Berlin, *Springer-Verlag*, 287-328.

von STORCH H, GÜSS S, HEIMANN M (1999). Das Klimasystem und  
seine Modellierung. Berlin, *Springer-Verlag*.

VOGT R, PARLOW E (1997). Die Strahlungs- und Energiebilanz eines  
Kiefernwaldes während HartX. *REKLIP Jahresbericht 1996*.

WICKE W, BERNHOFER C (1996). Energy balance comparison of the  
Hartheim forest and an adjacent grassland site during the  
HartX experiment. *Theor. Appl. Climatol.*, **53**, 49-58.

WOHLRAB B (1992). Landschaftswasserhaushalt. Hamburg, *Verlag  
Paul Parey*.