**Zeitschrift:** Mitteilungen der Naturforschenden Gesellschaft in Bern

**Herausgeber:** Naturforschende Gesellschaft in Bern

**Band:** 45 (1988)

**Artikel:** Ökologische Untersuchungen zum Wasser- und Energiehaushalt der Vegetation in der Hunzigenaue bei Belp

**Autor:** Rosset, Marc

**DOI:** https://doi.org/10.5169/seals-318531

**Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

**Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

**Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

**Download PDF:** 13.07.2025

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch**

MARC ROSSET*

# Ökologische Untersuchungen zum Wasser- und Energiehaushalt der Vegetation in der Hunzigenaue bei Belp

## 1. Einleitung

In der Auenlandschaft zwischen Bern und Thun sind am linken Aareufer, auf der Höhe zwischen Münsingen und Rubigen einschneidende Eingriffe in das Naturschutzgebiet «Aarelandschaft Thun–Bern» (BLN-Objekt 1314) geplant: Der Wasserverbund Bern will dort eine Grundwasserfassung zur Trinkwasserversorgung der Stadt Bern einrichten.

Es liegt auf der Hand, dass durch die notwendigen baulichen Tätigkeiten (mechanische Zerstörung durch Baumaschinen), vor allem aber durch die zwangsläufige Absenkung des Grundwasserspiegels von lokal über einen Meter, erhebliche Veränderungen der zum Teil höchst reichhaltigen und schützenswerten Vegetation eingeleitet werden.

Ein Schutzkonzept KÜCHLI, GROSSENBACHER, HÄFELI (1982) sieht vor, das dem Gebiet entzogene Wasser von der Aare her zu ersetzen; der Erfolg dieser Massnahmen ist jedoch unsicher – die Wasserversorgung ausgedehnter Feuchtgebiete ist in Frage gestellt. Natürlicherweise am stärksten durch eine Grundwasser-Absenkung gefährdet sind jene Pflanzenstandorte, die sich im Verlandungsbereich der im betreffenden Gebiet zahlreichen Giessen befinden. Es sind dies reichhaltige Riedflächen, die regelmässig im Frühjahr – bedingt durch den hohen Wasserstand der nahen Aare – vom Grundwasser überflutet werden.

Eine Absenkung des Grundwassers lässt also erwarten, dass die erwähnten Standorte trockener werden; das Bestandesklima, das eng mit der Wasserversorgung eines Standortes zusammenhängt, wird sich so verändern, dass ein sukzessiver Übergang der heute vorhandenen Vegetation zu mehr Trockenheit bevorzugenden Vegetationstypen unabwendbar scheint.

Es war darum das Ziel dieser Arbeit, die voraussichtlich am stärksten von der Grundwasserentnahme betroffenen und botanisch wertvollsten Standorte mikroklimatisch zu untersuchen, damit später – nach den vorgesehenen Eingriffen – ähnlich durchzuführende Messungen den Vergleich mit dem «Vorher-Zustand» möglich machen.

* Anschrift des Verfassers: MARC ROSSET Systematisch-Geobotanisches Institut der Universität Bern, Altenbergrain 21, 3013 Bern

Meine Untersuchungen umfassten neben oberflächlich gehaltenen pflanzensoziologischen Erhebungen der Messorte detaillierte Aufnahmen mikroklimatischer Daten sowie Messungen des Bodenwassergehaltes und damit die Berechnung des Energiehaushaltes.

### *1.1 Definitionen und Abkürzungen*

*Untersuchungsgebiet:* Waldregion zwischen Aare und Belpberg, nördlich begrenzt durch Hunzigenbrügg (Koord. 607500/193100), südlich begrenzt durch Entengüll (607500/193100).

*Messort:* Etwa 200 $m^2$ grosse Fläche innerhalb des Untersuchungsgebietes. Es gibt drei Messorte, Hunzigen, Entengüll und Witigüll. Ein Messort umfasst zwei Mess-Stellen, eine feuchte und eine trockene im Wald.

*Messstelle:* Fläche innerhalb eines Messortes von etwa 20 $m^2$. Hier wird das Mikroklima gemessen.
Zur Bezeichnung der Messstellen:
H = Hunzigen W = Witigüll E = Entengüll F = Feucht W = Wald bzw. trocken
Beispiel: HF = Messort Hunzigen, Feucht-Messstelle
WW = Messort Witigüll, Wald-Messstelle
Alle Zeitangaben erfolgen in Ortszeit, d. h. Sommerzeit, sind also gegenüber unserer Zonenzeit um eine Stunde verschoben (Sommerzeit = GMT + 2 Stunden).

## 2. Theoretische Einführung

Als *Mikroklima* bezeichnet man das Klima der bodennahen Luftschicht. In dieser bodennahen Luftschicht finden alle Wechselwirkungen zwischen der Atmosphäre und den Lebewesen statt (Energieumsatz, Luft- und Wasseraustausch). Im Zentrum mikroklimatischer Untersuchungen stehen somit Analysen der physikalischen Austauschvorgänge wie Wärmekonvektion, Evaporation und Bodenwärmestrom.

### *2.1 Der Strahlungshaushalt im Ökosystem*

Triebfeder für alle obgenannten Vorgänge ist die Sonne. Die von ihr ausgehende Strahlung erzeugt auf der Erde einen Energieumsatz. Wir unterscheiden zwischen einfallender und von der Erde ausgehender Strahlung; ferner zwischen langwelliger Strahlung (Wellenlängen 3000–10 000 nm) und kurzwelliger Strahlung (280–3000 nm).

Die Energiemenge, die bei diesem Strahlungsumsatz von der Erde absorbiert oder abgegeben wird, bezeichnet man als Strahlungsbilanz (Q), sie ist am Tage positiv, nachts negativ.

Abbildung 1 zeigt die einzelnen Strahlungsströme, die bei Tag und Nacht an der Erdoberfläche umgesetzt werden.

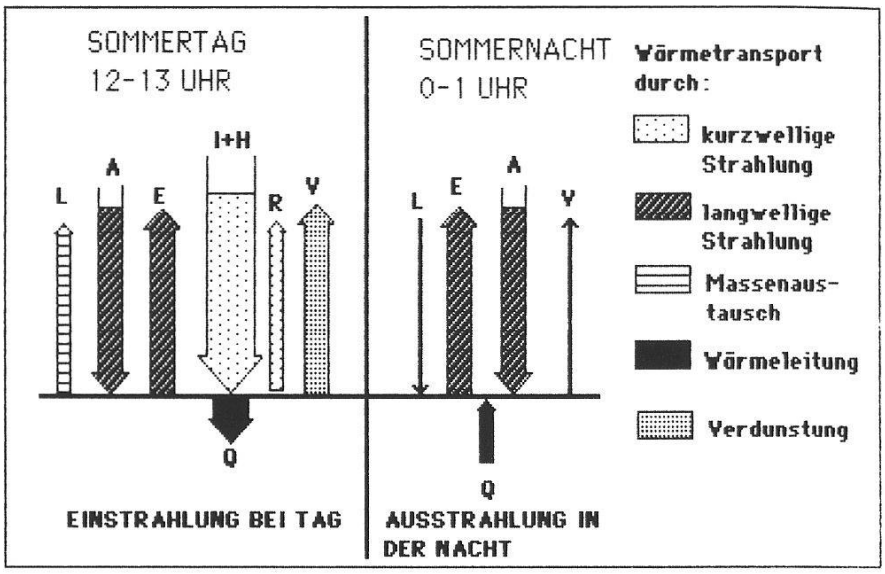



*Abbildung 1:* Energieumsatz bei Ein- und Ausstrahlung (nach R. GEIGER 1961)

Es bedeuten:
Q = Strahlungsbilanz
I = Direkte Sonnenstrahlung, H = Diffuse Himmelsstrahlung, (I + H = Globalstrahlung G)
A = Atmosphärische Gegenstrahlung, E = Temperaturstrahlung der Erde
V = Evapotranspiration, L = Konvektionswärmeaustausch, R = Reflektierter Anteil von I + H

Die Strahlungsströme als Gleichung formuliert: $Q = I + H + A - E - R$ Gl. 1

## *2.2 Der Wärmehaushalt eines Ökosystems*

Die als Strahlungsbilanz von der Erde zurückgehaltene Energie wird nun an der Erdoberfläche auf verschiedene Energieumsätze verteilt, was zu folgender *Energiehaushaltsgleichung* führt:

$$Q = V + B + L + P + P1 \qquad \text{Gl. 2}$$

Es bedeuten:
Q = Strahlungsbilanz, V = Evapotranspiration, L = Konvektionswärmeaustausch
B = Bodenwärmestrom, P = Wärmestrom in/aus der Bestandesmasse, P1 = Wärmestrom in/aus der Bestandesluft

Im nächsten Abschnitt werden diese Energieströme eingehender besprochen.

Wegen ihres geringen Beitrages können P und P1 vernachlässigt werden. Damit vereinfacht sich Gleichung 2 wie folgt:

$$Q = V + B + L \qquad \text{Gl. 3}$$

Positiv gerechnet werden jene Energieströme, die der *Erdoberfläche* Wärme entziehen; negativ jene, die ihr Wärme zuführen.

Während eines Sommertages von 12–13 Uhr sind somit die Wärmeströme V, B, L positiv zu rechnen, damit aber auch die Strahlungsbilanz Q.

## *2.3 Die einzelnen Energiehaushalts-Komponenten*

### 2.31 Die Evapotranspiration V

Die Evapotranspiration beinhaltet die Evaporation und die Transpiration. Sie erfasst die Energie, die in Form von Verdampfungswärme der Erdoberfläche beim Verdunsten von Wasser entzogen, bzw. ihr beim Freiwerden von Kondensationswärme zugeführt wird, weiter die durch pflanzliche Transpiration abgeführte Energie.

V ist tagsüber (oder während des Tages) normalerweise positiv, d. h. Wärmeenergie wird der Erdoberfläche entzogen, doch sind auch negative Werte möglich, wenn nämlich Tau oder Reif sich an der Erdoberfläche niederschlägt, wobei Kondensations- und Sublimationswärme frei werden.

### 2.32 Konvektionswärmeaustausch

Durch die tagsüber zum Teil grossen Temperaturgradienten zwischen Bodenoberfläche und angrenzender Luftschicht kommt es zu einer Erwärmung dieser Luftmassen, wodurch diese spezifisch leichter werden und aufsteigen, damit der Bodenoberfläche Wärme entziehen ($L > O$). Wir haben also nicht nur Wärmeleitung, sondern vor allem einen Massenaustausch.

### 2.33 Der Bodenwärmestrom

Als wichtigster Mechanismus des Wärmetransportes gilt die Wärmeleitung; Wärme wird durch die molekulare Bewegung der Bodenteilchen weitergegeben. Bestimmend hierfür sind im wesentlichen die folgenden Faktoren:

- Wärmeleitfähigkeit in (W/[m * K]); sie gibt die Wärmemenge an, die pro Sekunde durch eine Fläche von $1m^2$ fliesst, bei einem Temperaturgradienten von 1 K/m.
- Volumetrische Wärmekapazität oder Volumenwärme C ($J/[m^3 * K]$). Sie entspricht dem Produkt aus der spezifischen Wärme und der Dichte; sie gibt die Wärmemenge an, die notwendig ist, um 1 $m^3$ Boden um 1 K zu erwärmen.

Weitere wichtige Einflussgrössen auf den Bodenwärmestrom:

- Intensität und Einfallswinkel der Strahlung, Meereshöhe
- Oberflächenbeschaffenheit; die Intensität der den Boden erreichenden Strahlung ist von der Bodenbedeckung abhängig.

## 3. Das Untersuchungsgebiet

### *3.1 Geographische Lage*

Das Untersuchungsgebiet, ein Waldgebiet, liegt etwa 15 Kilometer südlich von Bern, zwischen Aare und Belpberg. Politisch gehört es zur Gemeinde Belp, diese ist auch Besitzerin dieses Waldes. (Siehe die Karte in Abb. 2)

Das Gebiet ist von zahlreichen Giessen durchzogen, deren Bette zum Teil ausgebaggert und in grosse Becken erweitert worden sind. Daneben existieren kleinere Seen und Tümpel, welche als Grundwasseraufstösse in keinen der Giessenläufe einbezogen sind.

Alle drei Messorte liegen am Rande solcher Tümpel, da sich bevorzugt an diesen Stellen botanisch wertvolle Feuchtgebiete entwickelt haben.

### *3.2 Geologie und Böden des Untersuchungsgebietes*

Das Untersuchungsgebiet liegt auf einer 5–10 Meter mächtigen Schicht aus postglazialem Aareschotter. Darunter liegen postglaziale Seetone, gefolgt von interglazialen Seetonen und eiszeitlichen Schottern bis zur Molasse des in diesem Bereich bis 270 Meter tiefen Aare-Glazialtroges.

Der Geologie entsprechend sind die Böden sehr skelettreich; nur in der Nähe von Wasserläufen und Tümpeln, vor allem in ausgetrockneten Giessenläufen findet man eine dicke Humusauflage von bis zu 20 cm. Sonst aber ist der Wald durchzogen von Kiesbänken, und die organische Auflage des Bodens besteht meist nur aus wenigen Zentimetern Humus, unterlagert von sandigem Grobkies.

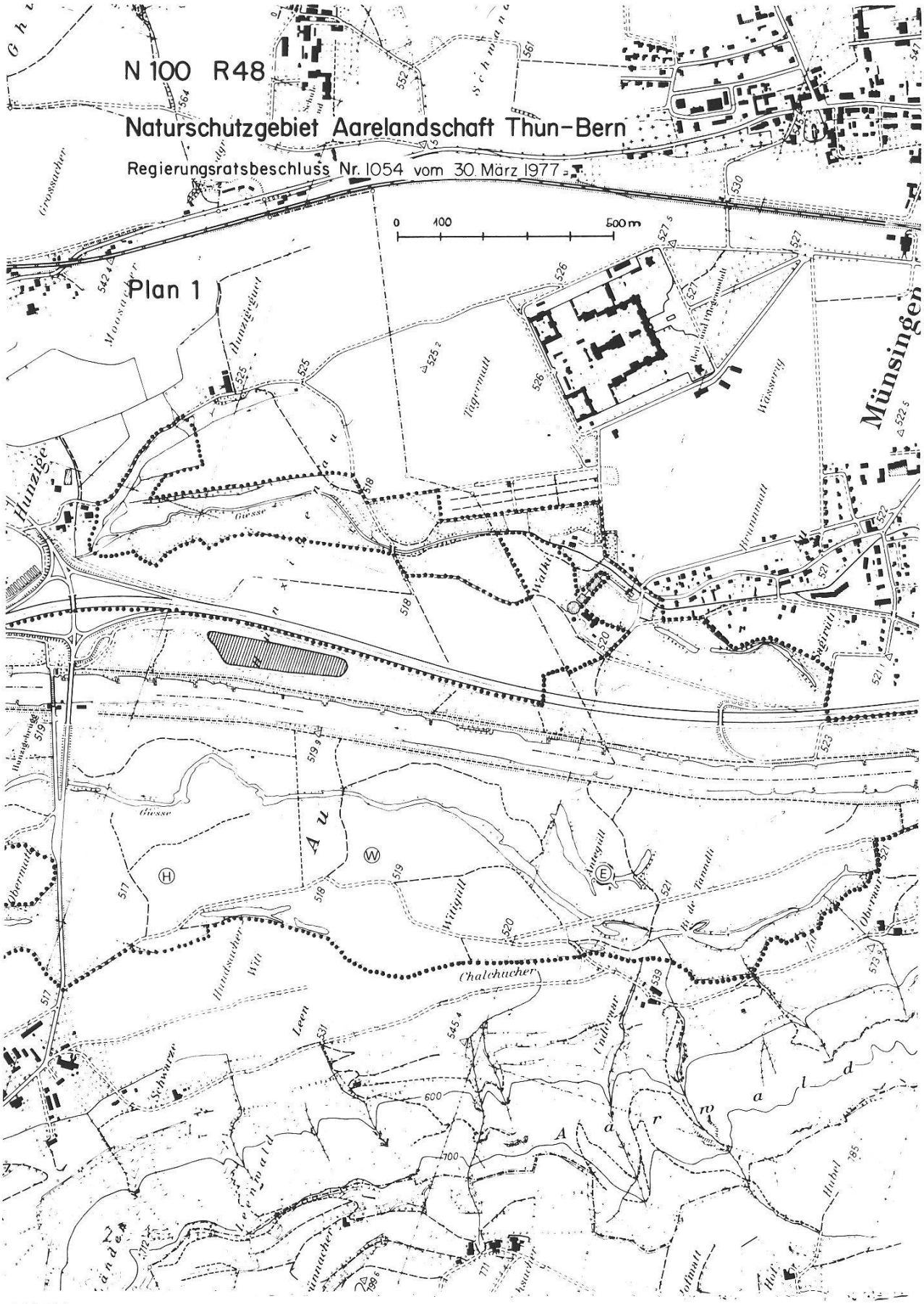



*Abbildung 2:* Ausschnitt aus dem Plan des Naturschutzgebietes der Aarelandschaft Thun-Bern. (Reproduziert mit Bewilligung des kant. Vermessungsamtes Bern vom 23. März 1987). Die Messorte sind eingezeichnet: H = Hunzigen, W = Witigüll, E = Entengüll

### *3.3 Vegetation*

Seit der Eindämmung der Aare um 1820 fehlen dem ursprünglichen Auenwald die periodischen Überschwemmungen, auch wurde durch die damit verbundene Grundwasserabsenkung das Gebiet trockener. Seither entwickelt sich der Wald vom Alno-Fraxinion in Richtung Fagion. Durch die erwähnten Feuchtstellen ist das Gebiet reich an botanisch, aber auch zoologisch interessanten Standorten.

Besonders diese Orte sind aber leider durch die intensive Holznutzung, durch die Landwirtschaft, den Erholungstourismus, aber vor allem durch den Kiesabbau und die geplante Grundwasserentnahme stark bedroht. Vegetationsaufnahmen der Messstellen vgl. Tabelle 2, Seite 104.

## 4. Methodik

### *4.1 Das Messkonzept*

Das Ziel der Arbeit bestand in der quantitativen Erfassung der Energie- und Wasser-Haushaltskomponenten zweier Messorte, welche von einer erwarteten Grundwasserabsenkung betroffen sind. Diese Messorte nenne ich im folgenden Haupt-Messorte.

Eine solche Untersuchung eines Haupt-Messortes wird aber erst aussagekräftig, wenn gleichzeitig die Energiehaushaltsgrössen eines Referenz-Messortes zum direkten Vergleich mitgemessen werden. Haupt- und Referenz-Messort sollen eine Feucht- und eine Trocken-Messstelle umfassen, die 10–20 Meter voneinander entfernt sind. Dies ermöglicht den Direktvergleich des Mikroklimas unmittelbar benachbarter Messorte mit unterschiedlichen ökologischen Gegebenheiten, siehe Abbildung 3.

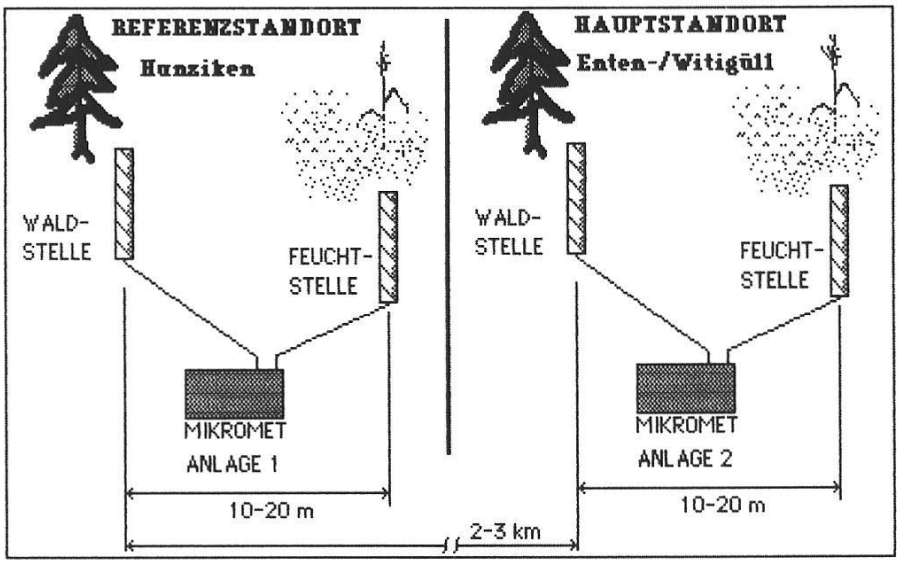



*Abbildung 3:* Schema des Messkonzeptes

Es standen zur Mikroklima-Datenerfassung zwei Anlagen zur Verfügung; jede Anlage erlaubt die Datenerfassung an zwei Messstellen, also gleichzeitig einer Wald-Stelle und einer Feucht-Stelle.

Die Datenerfassung war immer an nur einem der zwei Haupt-Messorte möglich, da die zweite Anlage zur Erfassung des Referenz-Messortes diente. Während der darauffolgenden Datenerfassungsperiode kam der jeweils andere Haupt-Messort an die Reihe.

### *4.2 Kurze Beschreibung Datenerfassungsanlage Mikromet*

Unsere Mikroklima-Datenerfassungsanlagen bestehen je aus folgenden Teilen: 1 Steuereinheit, 2 Messfühler-Umschalter (MUX), 2 20 m-Kabel, Messfühler-Garnitur, Externer Akkumulator, Aluminium-Mast zum Befestigen der Sensoren.

Die Steuereinheit ist in einem tragbaren Alu-Koffer untergebracht und enthält neben einem BASIC-programmierbaren Kleincomputer mit Vierfarbendrucker ein Kassetten-Tonbandgerät zur Datenregistrierung. Diese Teile sind nach dem Öffnen des Koffers durch den Anwender bedienbar. Im Koffer unzugänglich untergebracht ist ein Digitalvoltmeter, das die von den zwei MUX ankommenden Signale misst, weiter eine Schnittstelle, welche die gemessenen Werte dem Computer übergibt sowie ein Akkumulator zur Stromversorgung.

An jeden der zwei MUX können maximal 16 Messfühler angeschlossen werden. Die Messfühler-Signale werden im MUX der Reihe nach verstärkt und über das 20 m-Kabel an die Steuereinheit gesandt. Somit eignet sich eine Anlage zur Datenregistrierung mit zwei mal 16 Sensoren, d. h. zur Datenerfassung an einem Messort mit zwei Messstellen.

#### 4.21 Installation der Anlage im Feld

Abbildung 4 erläutert, welche Grössen gemessen wurden. Abgesehen von den Bodenthermometern wurden sämtliche Fühler an dem etwa drei Meter hohen Aluminiummast mit Hilfe von Schraubmuffen fixiert.

#### 4.22 Betriebsmodus der Datenerfassungsanlage

Aus der theoretischen Einführung ergibt sich, dass für Energiehaushalts-Untersuchungen vor allem strahlungsintensive Tage, d. h. Tage mit Sonnenschein, aufschlussreich sind. Die Datenerfassung erfolgte denn auch nur bei Schönwetterperioden von mehreren Tagen. Zu Beginn einer solchen Periode wurden die zwei Anlagen installiert, eine am Referenz-Messort, die andere in Witigüll oder Entengüll.

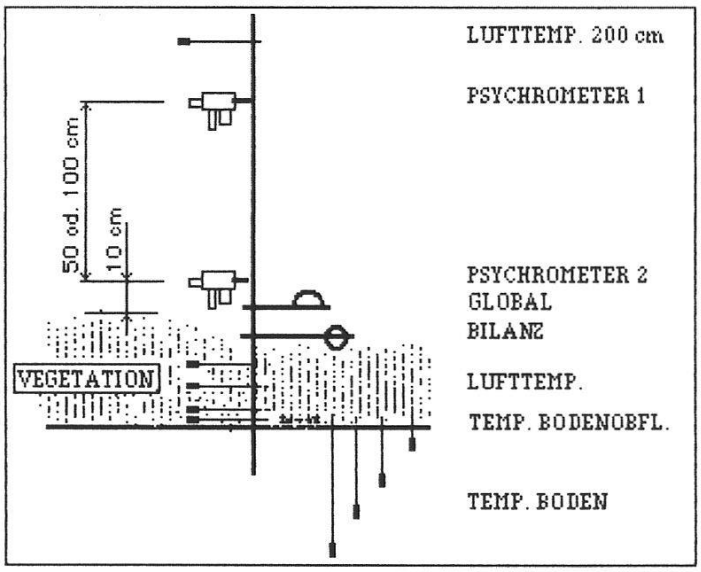



*Abbildung 4:* Schema der Messfühleranordnung an einer Messstelle (*Global* = Globalstrahlung, *Bilanz* = Strahlungsbilanz)

Die Anlagen registrierten fortan rund um die Uhr im 5-Minuten-Zyklus die erforderlichen Daten.

Es wurden sämtliche Einzelwerte auf Tonband gesichert, zudem bildete die Anlage zur vollen Stunde das Stundenmittel für jeden Kanal, druckte diese Werte jeweils nach Stunden und Messstelle getrennt aus, und sie speicherte den Gesamtblock von Stundenmittelwerten um Mitternacht auf Band ab.

## *4.3 Bestimmung der Energieströme*

### 4.31 Bodenwärmestrom B

B wurde nach der Gradienten-Methode auf der Basis von stündlichen Bodentemperatur-Mittelwerten berechnet. Die dazu erforderliche Wärmekapazität ergab sich aus den volumetrischen Anteilen von Bodenwasser, Skelett und organischem Material. Letzterer wurde ermittelt durch Verbrennung der Bodenproben bei 600° C, die Bestimmung des Bodenwassergehaltes und des Porenvolumens geschah mit Hilfe eingegrabener Tensiometer und anschliessenden Untersuchungen auf der porösen Platte, bzw. mit der Zentrifuge.

### 4.32 Konvektions- und Evapotranspirationswärmestrom (L und V)

Diese Berechnung erfolgt nach der sogenannten *Sverdrup*- oder Energiebilanz-Bowen-Ratio-Methode. Die dazu nötigen Daten liefern die zwei Psychrometer, als

Trocken- und Feuchttemperatur, woraus sich die Temperatur- und Dampfdruck-Gradienten zwischen den zwei Niveaus errechnen lassen.

Die Methode setzt voraus, dass zur Vermeidung horizontaler Energieaustauschprozesse des Versuchsgelände in allen Richtungen dieselben mikroklimatischen Gegebenheiten aufweist. Dies trifft im untersuchten Gebiet nicht zu; die Messorte sind Bestandteile eines reichen Mosaiks der Auenlandschaft. Die Feucht-Messorte sind Lichtungen, die von Wald umgeben sind und nahe, d. h. etwa 15 m neben kleinen offenen Wasserflächen liegen. Trotz diesem Mangel bleibt die Methode vorderhand die einzige, um auf diesen Flächen die Verdunstung abzuschätzen; Lysimetermessungen würden einen zu massiven Eingriff in diese Riedflächen bedeuten.

## 5. Ergebnisse

Die Beschreibung der Messstellen erfolgt in der Originalarbeit (Rosset, 1986) in drei Schritten:

- Allgemeine Charakterisierung jeder Messstelle, deren Topographie, deren Umgebung, Besprechung der Horizonteinengung und der Bodenverhältnisse.
- Angaben zur geographischen Lage und Höhe über Meer sowie tabellarische Zusammenstellung der bodenphysikalischen Gegebenheiten, Bilder der Horizonteinengung.
- Charakterisierung der Vegetationsverhältnisse der Messstellen.

Als Beispiel wird im folgenden der Vergleich der Feucht-Messorte von Hunzigen (HF) und Entengüll (EF) wiedergegeben; zunächst die Beschreibung der Messstellen:

### *5.1 Hunzigen-Feucht (HF, Referenzmessstelle)*

HF liegt in einem 5–8 m breiten Aare-Altlauf; dieser kann bei Frühjahr-Hochwasser bis 10 cm unter Wasser stehen. 15 m südlich der Messstelle ist der Altlauf etwa einen Meter tiefer, so dass dort dauernd ein etwa 8 m breiter und gegen 30 m langer Teich besteht. Anhand des dort gemessenen Wasserspiegelniveaus lässt sich an der Messstelle HF die Entfernung des Grundwasserspiegels von der Bodenoberfläche abschätzen – sie beträgt durchschnittlich 40–50 cm. Auf beiden Seiten des Altlaufes steigt das Terrain um etwa 50 cm an, die dort wachsenden Sträucher und Bäume bewirken, dass der Altlauf allmählich mit Jungpflanzen derselben besiedelt wird.

Ab etwa 10 Uhr empfängt HF volles Sonnenlicht und ab etwa 15 Uhr steht es im Schatten des umgebenden Waldes. HF ist als eine kleine Waldlichtung zu betrachten.

Die Bodenverhältnisse: Unter der dünnen Sand-Humusauflage von 5–10 cm Dicke, die bei hochsommerlicher Hitze durch ein rissiges Muster geprägt wird, finden wir bereits den in dieser ursprünglichen Auenlandschaft typischen Grobkies-Boden.

### *5.2 Entengüll-Feucht (EF, eine der Hauptmessstellen)*

Die Entengüll ist ein noch wasserführender Altlauf mit flachen, verlandenden Ufern und einigen Seitenarmen. Am Ende eines solchen etwa 5 m breiten Seitenarmes liegt die Messstelle EF, der Seitenarm wird landeinwärts durch eine alte Traktorspur fortgesetzt. Der Grundwasserstand liegt dauernd nahe der Bodenoberfläche, so dass während der Messkampagnen das unterste Bodenthermometer immer im Wasser steckte. Der Seitenarm ist östlich, d. h. gegen die Entengüll von einer Baum- und Strauchreihe gesäumt, den westlichen Rand der Lichtung bildet der Wald, der dort als recht üppiger Mischwald eine Höhe von gegen 15 cm erreicht. Hier haben wir ebenfalls während einiger Stunden über Mittag vollen Sonnenschein, der ab etwa 15 Uhr durch Bäume abgeschirmt wird. Die Krautschicht ist üppig; unter der 5–10 cm dicken Humusschicht folgt Grobkies.

### *5.3 Vergleich der Feuchtstellen HF und EF aufgrund der Messungen vom 10. Juni 1986*

*Tabelle 1:* Vergleich der Messstellen EF und HF

| | EF | HF |
|---|---|---|
| Deckungsgrad der Vegetation: | 95 % | 60 % |
| Vol % Wasser der obersten Bodenschicht: | 70 % | 54 % |
| Tages-Stunden mit voller Besonnung im Juli: | 2,5 Std. | 4 Std. |

#### 5.31 Vergleich der Messgrössen (Abb. 5 und Abb. 6)

Anhand der Tagesgänge fällt zunächst der unterschiedliche Temperaturverlauf in 2 cm Höhe über Boden auf; um 14 Uhr steigt dieser Wert in HF auf 45,2° C und übersteigt damit die Lufttemperatur in 200 cm um 15,3° C, in EF steigt die Temperatur in 2 cm auf 37,4° C, was eine Überwärmung gegenüber der Luft in 200 cm um 8,8° C entspricht. Bei HF überwärmt sich die Luft in 2 cm gegenüber jener in 8 cm um 6° C. Sämtliche markanten Lufttemperaturdifferenzen zwischen verschiedenen Niveaus folgen bei beiden Messstellen in ihrem Verlauf jenem der jeweiligen Strahlungsbilanz.

Nach GEIGER (1961, § 31) wandert mit zunehmender Beschattung des Bodens durch die dichter werdende Vegetation die Zone der grössten Tagestemperaturschwankung von der Bodenoberfläche zur sogenannten äusseren tätigen Oberfläche. Je dichter die Vegetation umso höher in der Vegetation liegt diese Schicht. Die vorliegenden Messungen bestätigen dies: bei HF liegt diese Schicht 2 cm, bei EF 5 cm über Boden, siehe Abbildungen 11 und 12.

Ein Vergleich der 14-Uhr-Tautochronen bestätigt, dass sich in HF die Bodenoberfläche, aber auch alle Bodenschichten stärker erwärmen als in EF (Abb. 9 und 10).

Die Globalstrahlung wächst bei HF auf maximal 762 W/m$^2$, bei EF auf 651 W/m$^2$. Die Bilanzkurven erreichen an beiden Orten ähnliche Maxima, jedoch ist jene von EF bedeutend schlanker; in den frühen Morgenstunden wird die Strahlungsbilanz Q von HF stärker negativ als Q von EF, also gibt HF mehr Energie durch Ausstrahlung ab als EF.

### 5.32 Vergleich der Energiehaushalt-Komponenten (Abb. 7 und 8)

Der Bodenwärmestrom erreicht zwischen 13–14 Uhr bei HF höhere Werte, entsprechend auch stärker negative Werte nach der Aufwärmungs-Phase als dies bei EF der Fall ist. Der Evapotranspirationsstrom folgt bei EF auffallend der Bilanzkurve, geht also nach 15 Uhr rapide zurück, während bei HF die Verdunstung, trotz des Rückganges der Bilanzwerte, zwar auch abnimmt, aber weniger abrupt.

Am augenfälligsten sind die Unterschiede der Konvektionswärmeströme L: zwischen 12–13 Uhr stellen wir bei EF einen leichten Anstieg auf etwa 20 W/m$^2$ fest, während bei HF zwischen 13 und 16 Uhr L Werte bis 136 W/m$^2$ annimmt.

### 5.33 Interpretation

Alle nachfolgenden Überlegungen betreffen den Zeitraum 12 bis 20 Uhr: Wenn die Bilanzsumme gebildet wird, fällt auf, dass HF wesentlich mehr Energie durch Strahlung empfängt als EF, nämlich 7537 kJ/m$^2$ gegenüber 5325 kJ/m$^2$.

Unterschiedlich gestaltet sich auch die Aufteilung dieser verfügbaren Energie auf die drei untersuchten Energieströme: Bei EF wird mit 90 % der verfügbaren Energie Wasser verdunstet, 11 % fliessen in den Boden; die Luft erwärmt den Bestand mit einem Energiebetrag, der 1 % der Bilanz entspricht und damit negativ gerechnet werden muss. Für HF lauten die entsprechenden Anteile 78 %, 20 % und 2 %.

Der Grund für die während der strahlungsintensiven Zeit hohe Verdunstung bei EF liegt in der dort stärkeren Durchfeuchtung des Bodens. Unterstützt wird die hohe Evapotranspiration durch die bei EF wesentlich dichtere Vegetation, die mittels Transpiration Wasser abgibt.

Diese dichte Vegetation sowie die schwächere Sonneneinstrahlung, verursacht durch die Schattenwürfe der umgebenden Bäume, bewirken bei EF eine geringere Erwärmung des Bodens und damit den auffallend geringen L-Strom.

Bei HF, wo die Sonnenstrahlung intensiver ist, wird durch die weniger dichte Vegetation der Boden stärker aufgeheizt, dadurch stellt man zwischen 13–14 Uhr einen grösseren Bodenwärmestrom fest als bei EF, und durch die starke Erwärmung der Bodenoberfläche einen hohen L-Strom. Allein daraus folgt bereits, und Messungen bestätigen dies, dass der Boden bei EF feuchter ist als bei HF.

Nach 16 Uhr, wenn die Strahlungsbilanz abnimmt, gehen beide Böden über zur Wärmeabgabe in Richtung Bodenoberfläche, der Boden von HF gibt mehr Wärme ab als jener bei EF, denn er konnte auch mehr Wärme speichern.

Die bodennahe Luftschicht gibt nach 16 Uhr an beiden Stellen Wärme an die Bodenoberfläche ab, d. h. L wird negativ, aber bei HF in stärkerem Masse, weil sich dort die Luftmassen intensiver erwärmt haben. Diese von Luft und Boden abgegebene Energie wird zur Verdunstung von Wasser eingesetzt; da hierfür bei HF der Bodenwärmestrom und L mehr Energie liefern, fällt V entsprechend langsam ab, bei EF dagegen sind die Beträge von V und B so gering, dass V nach dem Rückgang der Strahlungsbilanz ebenfalls zurückgeht.

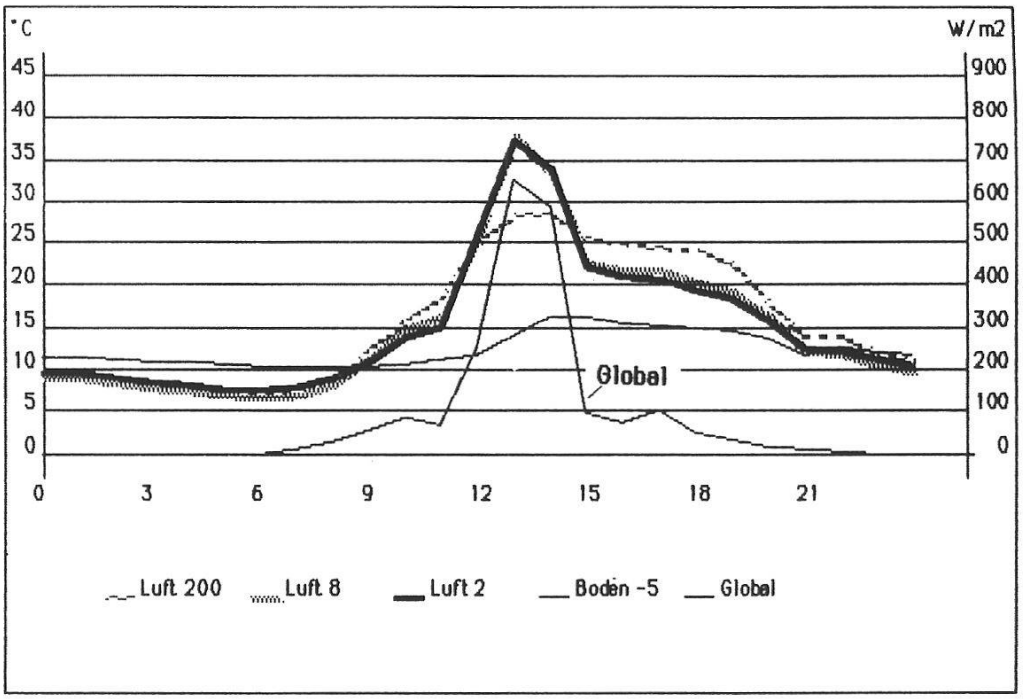



*Abbildung 5:* Tagesgang von Temperaturen und Globalstrahlung bei Entengüll-Feucht vom 10. Juni 1986

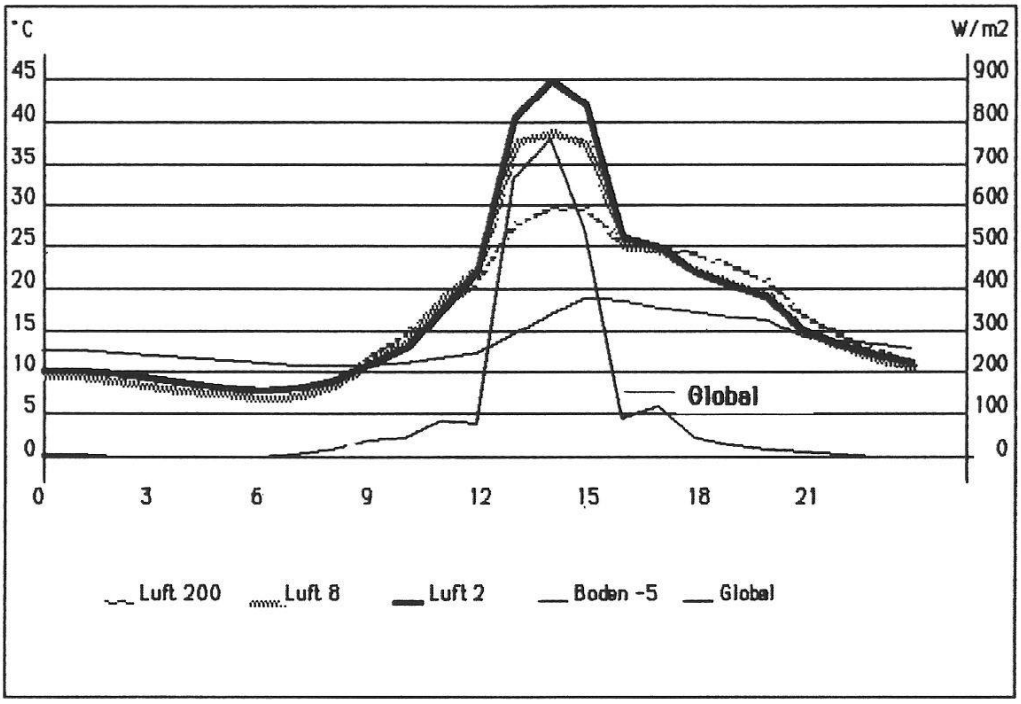



*Abbildung 6:* Tagesgang von Temperaturen und Globalstrahlung bei Hunzigen-Feucht vom 10. Juni 1986

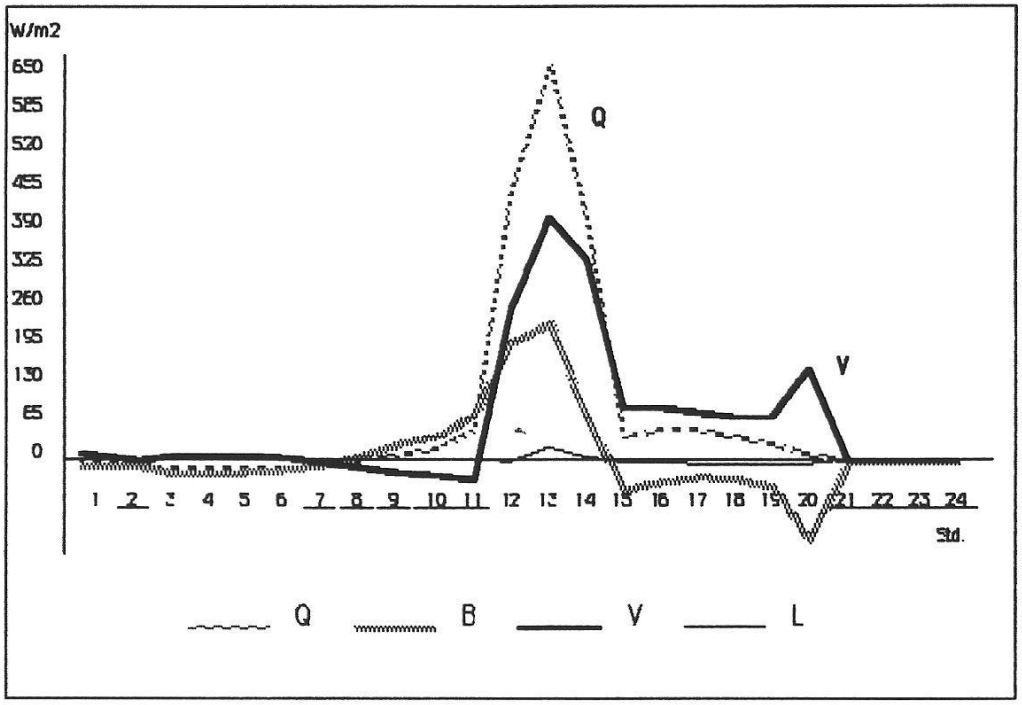



*Abbildung 7:* Energiehaushalt Entengüll-Feucht vom 10. Juni 1986

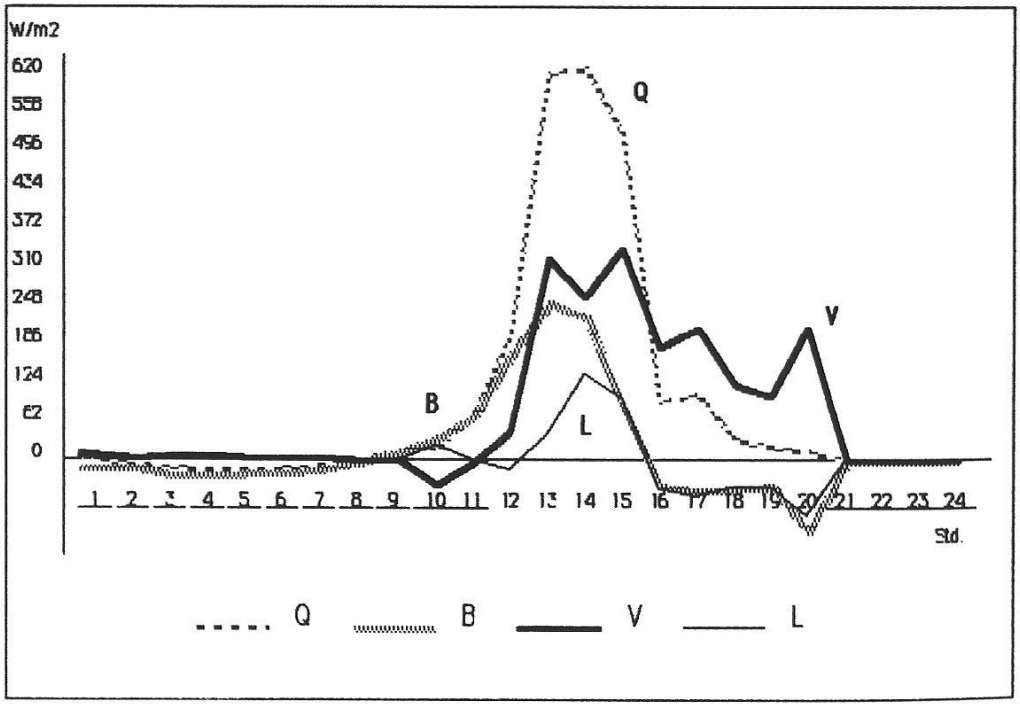



*Abbildung 8:* Energiehaushalt Hunzigen-Feucht vom 10. Juni 1986

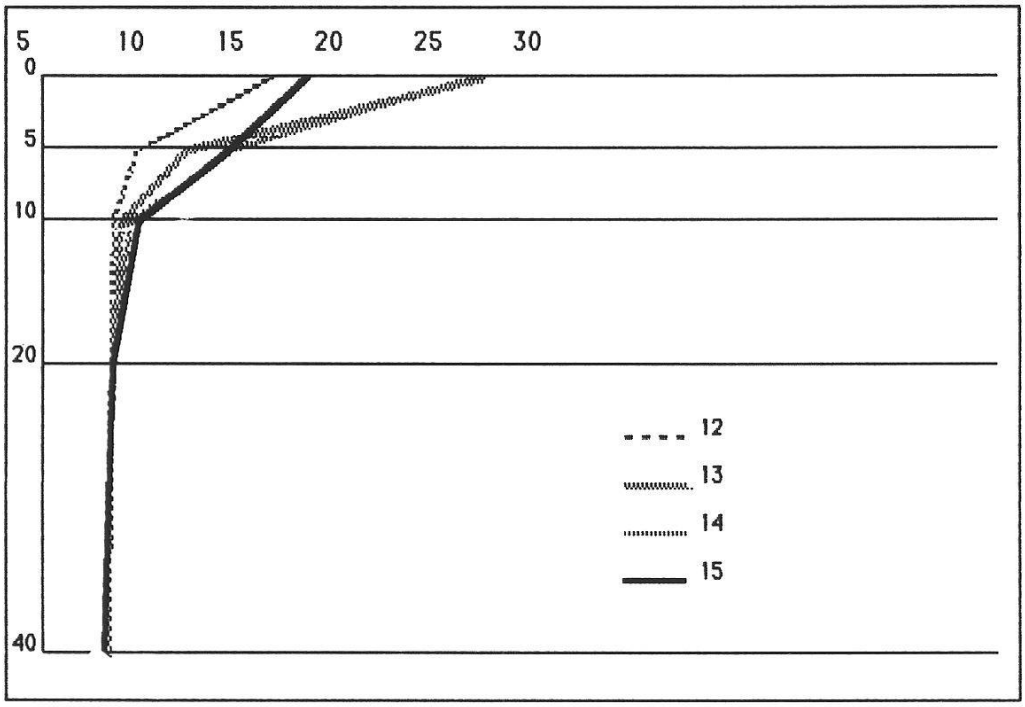



*Abbildung 9:* Tautochronen der Bodentemperatur bei Entengüll-Feucht vom 10. Juni 1986. (Abszisse: Bodentemp. in °C; Ordinate: Bodentiefe in cm; 12–15: Stundenangabe)

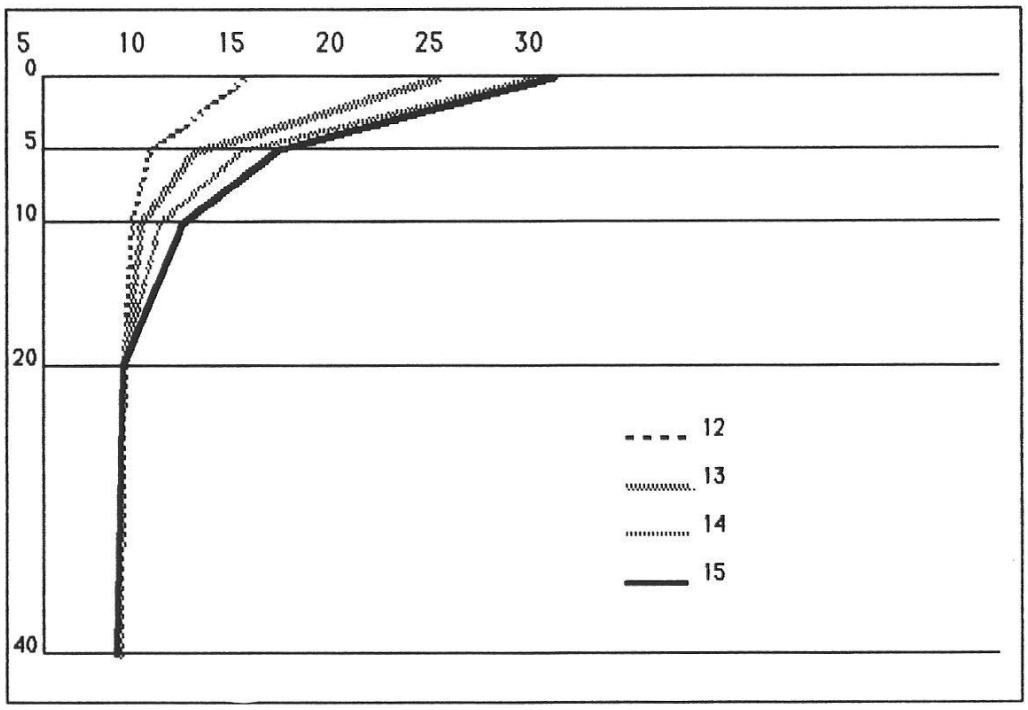



*Abbildung 10:* Tautochronen der Bodentemperatur bei Hunzigen-Feucht vom 10. Juni 1986 (12–15: Stundenangabe)

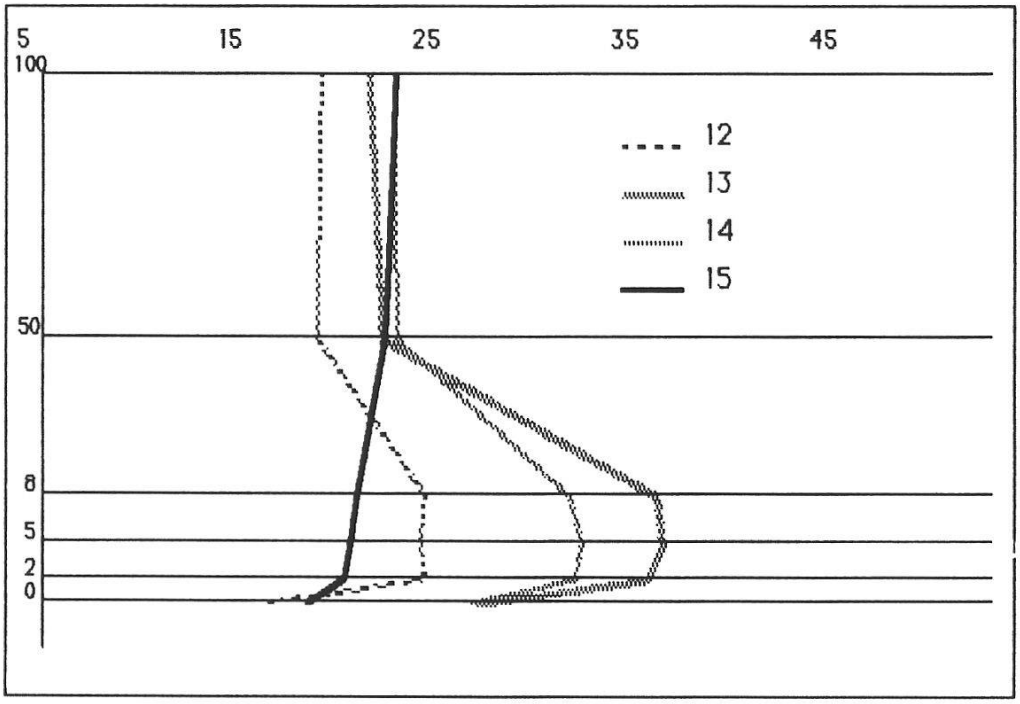



*Abbildung 11:* Tautochronen der bodennahen Luft-Temperatur bei Entengüll-Feucht vom 10. Juni 1986. (Abszisse: Luftemp. in °C; Ordinate: Höhe über Boden in cm)

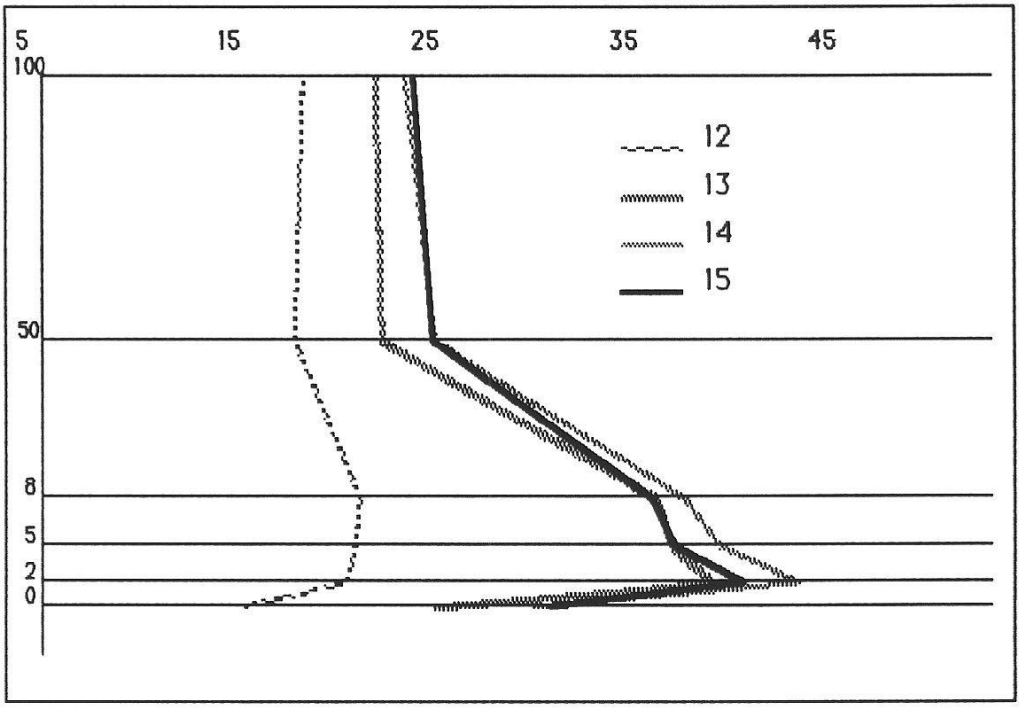


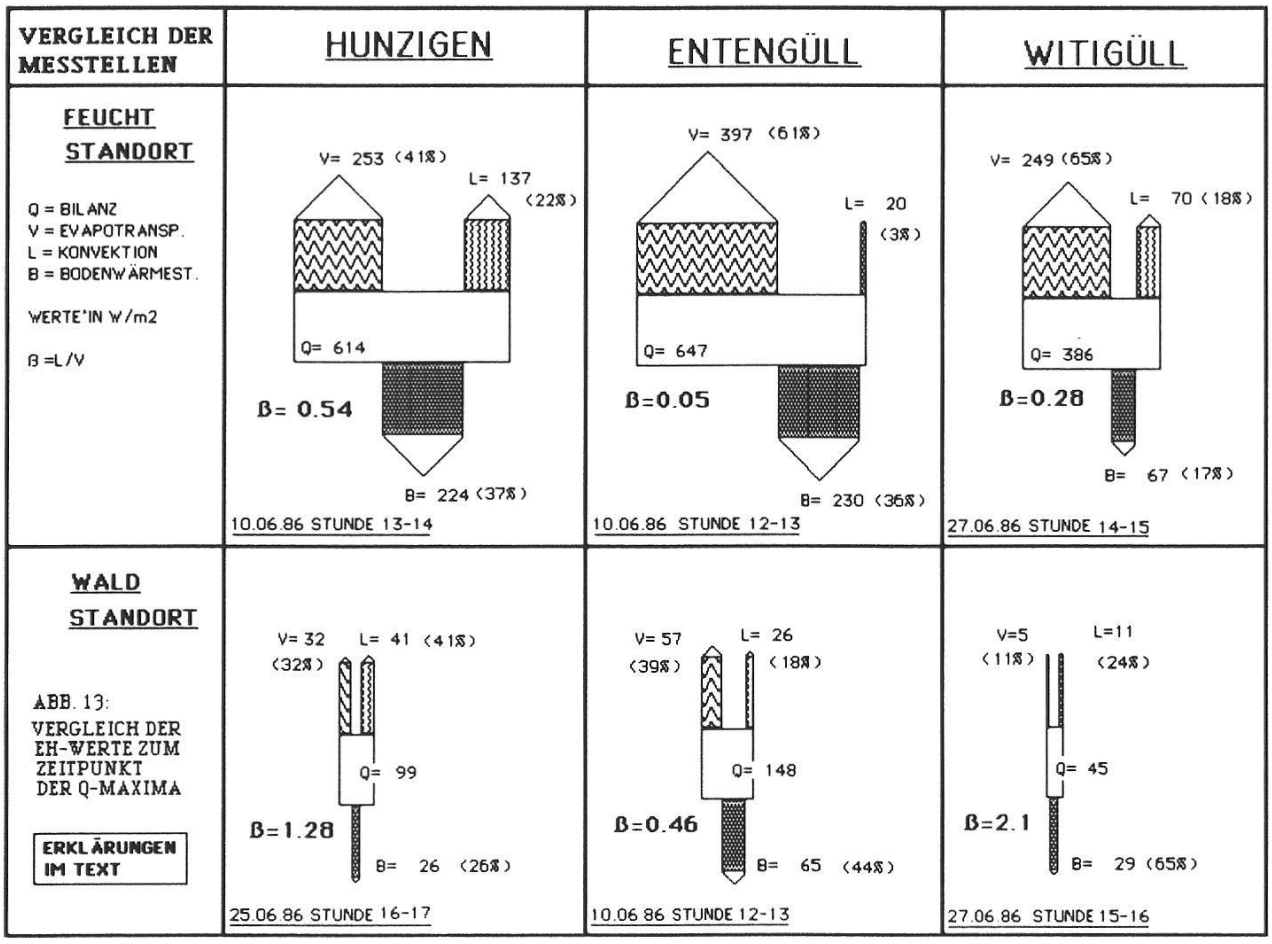

*Abbildung 12:* Tautochronen der bodennahen Luft-Temperatur bei Hunzigen-Feucht vom 10. Juni 1986 (12–15: Stundenangabe)

## 5.34 Zusammenfassung

Wegen der schwächeren Horizonteinengung durch die umgebenden Bäume ist der Energieumsatz bei HF grösser als bei EF. Durch die bei HF schwächer geschlossene Vegetation erreicht mehr Sonnenstrahlung die Bodenoberfläche als bei EF.

Bedingt durch die bei EF dichtere Vegetation und die stärkere Durchfeuchtung der oberen Bodenschichten verdunstet dort während der strahlungsintensiven Phase mehr Wasser, aber weniger während der verbleibenden Zeit, so dass während des betrachteten Intervalles bei HF dennoch mehr Wasser durch Evapotranspiration verloren geht. Dieser Umstand sorgt mit dem bei HF tiefer liegenden Grundwasserspiegel dafür, dass der Boden bei HF oberflächlich rascher austrocknet.

Die Abbildungen 12 und 13 geben einen Überblick über die Energiehaushalte aller Messstellen; dabei wurde unterschieden zwischen der im Zeitraum 12 bis 20 Uhr umgesetzten Energiemenge und derjenigen zur Stunde des maximalen Energieumsatzes (meistens die Stunde 13). Die Breite der Pfeile, welche die Energieströme symbolisieren, ist proportional zur umgesetzten Energie bzw. Leistung pro Flächeneinheit, die Breite des Rechteckes proportional zur umgesetzten Energie bzw. Leistung pro Flächeneinheit, die Breite des Rechteckes proportional zur umgesetzten Gesamtenergie, d. h. zur Strahlungsbilanz Q. Die angegebene Grösse ß = L/V macht eine Aussage über die Wasserversorgung des Messortes: ß-Werte < 0,5 deuten auf gute Wasserversorgung hin.




Die Graphiken erlauben kurz folgende Schlüsse: Der Energieumsatz ist an den durch ein Laubdach abgeschirmten Waldmessstellen generell kleiner, der Boden daselbst ist trockener. Von den Feuchtstellen ist Entengüll die am besten mit Wasser versorgte (%-Anteil von V am grössten), Hunzigen-Feucht aber jene mit dem grössten Energieumsatz, weil bei ihr die Bäume am wenigsten Licht abschirmen.

## Dank

Zu besonderem Dank verpflichtet bin ich einerseits Herrn Dr. O. Hegg vom Systematisch-Geobotanischen Institut der Universität Bern, er leitete meine Arbeit mit fachlicher Weitsicht und grossem Entgegenkommen, andererseits Herrn Prof. Dr. A. Ohmura vom Geographischen Institut der ETHZ; er überprüfte meine Arbeit, gab mir nützliche Hinweise und überliess mir eine Kopie seines Meteorologie-Skriptums sowie Nachdrucke von einigen seiner Publikationen.

Den folgenden Personen und Institutionen sei herzlich für ihre Mithilfe bei meiner Arbeit gedankt: Prof. Dr. A. Cernusca vom Botanischen Institut der Universität Innsbruck, er führte mich ein in die Funktionsweise der von ihm konstruierten Datenerfassungsanlage *Mikromet*-1.

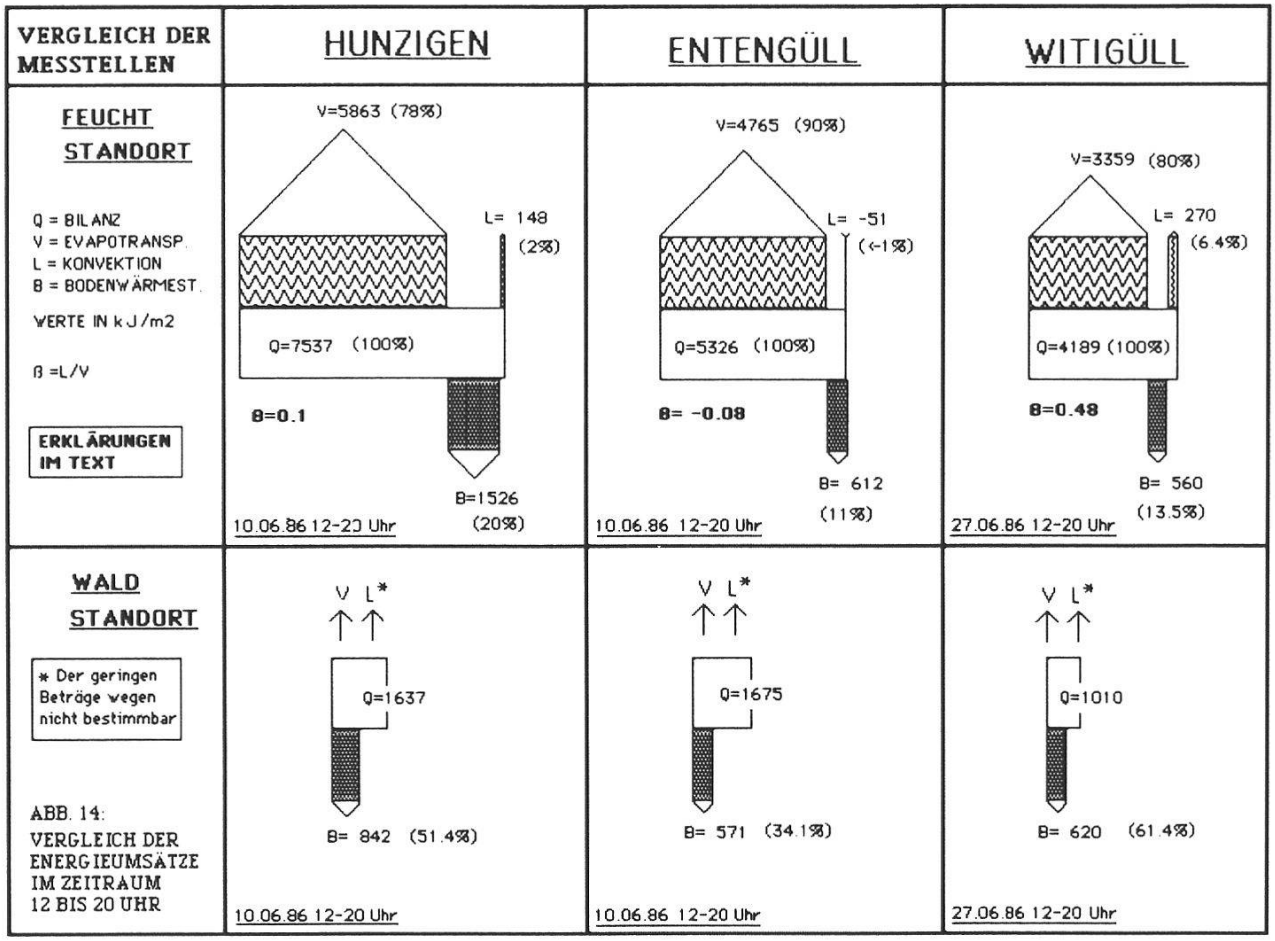



ABB. 14: VERGLEICH DER ENERGIEUMSÄTZE IM ZEITRAUM 12 BIS 20 UHR

Die Stiftung Aaretal und das Wasser- und Energiewirtschaftsamt des Kantons Bern leisteten finanzielle Unterstützungsbeiträge.

Für Material und sonstige Hilfeleistungen danke ich weiter: Der Burgergemeinde Belp und Revierförster A. Biland, der Eidgenössischen Forschungsanstalt für Agrikultur und Umwelt-Hygiene (FAC), Liebefeld (Herren W. Stauffer und F. Schär).

Herrn Dr. H. Turner (EAFV Birmensdorf), Herrn Dr. Ch. Häfeli (Kellerhals und Häfeli, Bern), Herrn W. Jordi (Lips und Jordi, Münsingen) Herrn H. Neuenschwander, Belp, den Herren H. U. Bleuer und H. Läuffer (Universität Bern), Daniela Jost, Felix Jakob, Robert Brügger, Hans-Peter Stähli sowie Jürg Stähli.

## 6. Literatur

Geiger, R. (1961): Das Klima der bodennahen Luftschicht. F. Vieweg & Sohn, Braunschweig. 1961, 4. Auflage.

Küchli, Ch., Grossenbacher, K., Häfeli, Ch. (1982): Grundwasserwerk Aaretal II in Belp – Hunzigenau; Schutzkonzept für das Naturschutzgebiet. Wasserverbund Region Bern.

Rosset, M. (1986): Ökologische Messungen zum Wasser- und Energiehaushalt in der Hunzigenaue bei Belp; Lizentiatsarbeit am Systematisch-Geobotanischen Institut der Universität Bern.

*Tabelle 2:* Vegetationsaufnahmen aller Messstellen

| Messstellen: | EF | HF | WF | HW | EW | WW | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Baumschicht** bzw. bei Feuchtmessorten jene der Lichtungsränder | | | | | | | |
| Deckung (%): | | | | 25 | 20 | 70 | |
| Höhe max (m): | 15 | 15 | 15 | 15 | 18 | 15 | |
| *Picea abies* | + | + | + | + | + | 1 | Fichte |
| *Pinus silvestris* | . | + | + | + | + | 1 | Wald-Föhre |
| *Fagus silvatica* | + | . | . | . | + | 2 | Rotbuche |
| *Fraxinus excelsior* | + | + | . | + | . | + | Esche |
| *Acer pseudoplatanus* | . | + | . | + | + | . | Berg-Ahorn |
| *Quercus robur* | . | + | . | + | + | . | Stiel-Eiche |
| *Prunus padus* | + | + | . | . | + | . | Traubenkirsche |
| *Alnus incana* | + | + | . | . | + | + | Grau-Erle |
| *Salix eleagnos* | + | . | + | . | . | + | Lavendel-Weide |
| *Salix purpurea* | . | . | + | . | . | . | Purpur-Weide |
| *Corylus avellanna* | . | . | . | . | + | . | Hasel |
| **Strauchschicht** bzw. bei Feuchtmessorten jene der Lichtungsumgebung | | | | | | | |
| Deckung (%): | . | . | . | 30 | 20 | 20 | |
| Höhe (m): | . | . | . | 3 | 3 | 2,5 | |
| *Picea abies* | . | . | . | + | 1 | . | Fichte |
| *Fagus silvatica* | . | . | . | | + | . | Rotbuche |
| *Viburnum lantana* | + | + | . | + | + | + | Wolliger Schneeball |
| *Viburnum opulus* | . | . | . | . | . | + | Gemeiner Schneeball |
| *Ligustrum vulgare* | . | . | . | . | + | + | Liguster |
| *Crataegus monogyna* | . | . | . | + | + | 1 | Eingriffliger Weissdorn |
| *Corylus avellana* | . | + | . | . | + | . | Hasel |
| *Lonicera xylosteum* | . | + | + | + | + | + | Rote Heckenkirsche |
| *Cornus sanguinea* | . | + | . | . | . | r | Roter Hartriegel |
| *Fraxinus excelsior* | . | . | . | . | + | . | Esche |
| *Acer pseudoplatanus* | . | . | . | . | + | . | Berg-Ahorn |
| *Berberis vulgaris* | . | + | + | + | + | + | Berberitze |
| *Rhamnus carthatica* | . | + | . | + | + | . | Purgier-Kreuzdorn |
| *Salix eleagnos* | . | + | . | . | . | . | Lavendel-Weide |
| *Salix purpurea* | . | + | . | . | . | . | Purpur-Weide |
| *Salix caprea* | . | + | . | . | . | . | Sal-Weide |
| *Juniperus communis* | + | . | . | . | + | r | Wacholder |
| *Prunus spinosa* | . | . | + | + | . | + | Schwarzdorn |
| *Prunus padus* | . | . | . | + | + | . | Traubenkirsche |
| *Prunus avium* | . | . | . | + | . | . | Süsskirsche |
| *Alnus incana* | . | . | . | . | + | + | Grauerle |
| *Rosa spec.* | . | . | . | . | . | r | Heckenrose |
| *Frangula alnus* | . | . | . | + | . | r | Faulbaum |
| *Daphne mezereum* | . | . | . | . | . | r | Seidelbast |
| **Krautschicht** | | | | | | | |
| Deckung (%): | 95 | 60 | 60 | 30 | 50 | 50 | |
| Höhe (m): | 50 | 50 | 50 | 50 | 40 | 30 | |

*Tabelle 2:* Vegetationsaufnahmen aller Messstellen

| Messstellen: | EF | HF | WF | HW | EW | WW | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Magnocaricion** | | | | | | | **Gross-Seggenried** |
| *Carex elata* | . | . | + | . | . | . | Steife Segge |
| *Galium palustre* | + | + | . | . | . | . | Sumpf-Labkraut |
| *Iris pseudacorus* | . | r | . | . | . | . | Gelbe Schwertlilie |
| *Mentha aquatica* | + | + | + | . | . | . | Wasser-Minze |
| **Molinietalia** | | | | | | | **Feuchtwiesen** |
| **Caricion Davallianae** | | | | | | | |
| *Carex flava* | + | 1 | + | . | . | . | Gelbe Segge |
| *Carex davalliana* | + | . | . | . | . | . | Davalls Segge |
| *Carex pulicaris* | + | . | . | . | . | . | Floh-Segge |
| *Carex panicea* | . | 1 | . | . | . | . | Hirse-Segge |
| *Carex hostiana* | + | . | r | . | . | . | Hosts Segge |
| *Angelica silvestris* | . | + | . | . | + | + | Wald-Engelwurz |
| *Primula farinosa* | + | . | . | . | . | . | Mehl-Primel |
| **Molinion** | | | | | | | **Pfeifengraswiese** |
| *Molinia coerulea* | 3 | 2 | 2 | . | . | . | Blaues Pfeifengras |
| *Calamagrostis epigeios* | 1 | . | . | . | . | . | Gemeines Reitgras |
| *Carex flacca* | + | 1 | . | r | . | . | Schlaffe Segge |
| *Potentilla erecta* | + | . | . | . | . | . | Gemeiner Tormentill |
| *Cirsium palustre* | + | . | . | . | . | . | Sumpf-Kratzdistel |
| *Valeriana dioeca* | 1 | . | . | . | . | . | Sumpf-Baldrian |
| *Pinguicula vulgaris* | r | . | . | . | . | . | Gemeines Fettblatt |
| Schwach nitrophile: | | | | | | | |
| *Prunella vulgaris* | + | . | . | . | . | . | Gemeine Brunelle |
| *Lysimachia vulgaris* | + | . | . | . | . | . | Gilbweiderich |
| **Calthion** | | | | | | | **Dotterblumen-Wiesen** |
| *Caltha palustris* | + | . | . | . | . | . | Sumpfdotterblume |
| *Cirsium oleraceum* | . | r | . | . | . | . | Kohldistel |
| *Myosotis palustris* | + | | | | | | Sumpf-Vergissmeinnicht |
| *Lythrum salicaria* | + | . | . | . | . | . | Blutweiderich |
| **Aegopodion** | | | | | | | |
| *Eupatorium cannabinum* | . | 1 | . | . | . | . | Wasserdost |
| *Tussilago farfara* | . | 1 | . | . | . | . | Huflattich |
| *Epilobium hirsutum* | + | . | . | . | . | . | Zottiges Weidenröschen |
| *Solidago virgaurea* | . | . | . | . | + | . | Gemeine Goldrute |
| **Alno-Ulmion** | | | | | | | **Grauerlen-Auewald** |
| Nasse und eher nasse: | | | | | | | |
| *Alnus incana* | . | . | + | . | . | . | Grau-Erle |
| *Prunus padus* | . | . | + | . | + | . | Traubenkirsche |
| *Frangula alnus* | . | + | + | . | . | . | Faulbaum |

*Tabelle 2:* Vegetationsaufnahmen aller Messstellen

| Messstellen: | EF | HF | WF | HW | EW | WW | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Frische: | | | | | | | |
| *Brachypodium silvaticum* | . | + | . | + | + | + | Wald-Zwenke |
| *Listera ovata* | . | . | . | r | . | . | Grosses Zweiblatt |
| *Knautia dipsaccifolia* | . | 1 | + | + | . | + | Wald-Witwenblumen |
| *Viburnum opulus* | . | . | . | + | . | . | Gemeiner Schneeball |
| *Viburnum lantana* | . | . | . | + | + | + | Wolliger Schneeball |
| *Fraxinus excelsior* | + | + | + | + | + | + | Esche |
| *Acer pseudoplatanus* | r | + | + | + | + | + | Berg-Ahorn |
| *Picea abies* | r | + | + | + | + | . | Fichte |
| *Quercus robur* | . | . | . | + | + | r | Stiel-Eiche |
| *Corylus avellana* | . | + | . | r | + | . | Hasel |
| *Cornus sanguinea* | . | . | . | . | . | r | Roter Hartriegel |
| *Euonymus europaeus* | . | . | . | r | . | . | Pfaffenhütchen |
| Trockenere: | | | | | | | |
| *Carex ornitopoda* | . | . | 1 | . | r | + | Vogelfuss-Segge |
| *Epipactis helleborine* | . | . | + | . | r | + | Breitblättrige Sumpfwurz |
| *Daphne mezereum* | . | . | . | . | . | r | Seidelbast |
| *Prunus avium* | r | . | + | . | . | + | Süsskirsche |
| **Erico-Pinion** | | | | | | | **Erika-Föhrenwälder** |
| *Carex alba* | . | . | . | 1 | 1 | 2 | Weisse Segge |
| *Euphorbia cyparissias* | . | . | . | + | + | + | Zypressen-Wolfsmilch |
| *Polygala chamaebuxus* | . | . | . | + | . | . | Buchsblättrige Kreuzblume |
| *Juniperus communis* | . | . | . | . | + | . | Wacholder |
| *Campanula rotundifolia* | . | . | . | . | + | . | Rundblättrige Glockenblume |
| **Querco-Fagetea** | | | | | | | **Laubmischwälder** |
| *Melica nutans* | + | + | 1 | + | + | 1 | Nickendes Perlgras |
| *Viola riviniana und)* *Viola reichenbachiana)* | . | + | + | + | + | + | Wald-Veilchen |
| *Crataegus monogyna* | . | + | . | + | + | + | Eingriffliger Weissdorn |
| *Ligustrum vulgare* | . | + | . | + | + | + | Liguster |
| *Ajuga reptans* | r | + | . | . | . | . | Kriechender Günsel |
| *Galium silvaticum* | + | . | . | . | + | . | Wald-Labkraut |
| *Rubus idaeus* | . | . | . | . | . | + | Himbeere |
| *Potentilla sterilis* | . | + | + | . | . | . | Erdbeer-Fingerkraut |
| *Berberis vulgaris* | . | . | + | + | . | + | Berberitze |
| *Aquilegia atrata* | . | . | . | + | . | . | Dunkle Akelei |
| *Anemone nemorosa* | . | + | . | + | . | + | Buschwindröschen |
| *Fragaria vesca* | . | + | . | + | + | . | Erdbeere |
| *Mercurialis perennis* | . | . | . | + | . | . | Ausdauerndes Bingelkraut |
| *Lonicera xylosteum* | . | . | . | + | . | . | Rote Heckenkirsche |
| *Polygonatum multiflorum* | . | . | . | . | . | r | Salomonssiegel |
| *Fagus silvatica* | . | . | . | + | . | . | Rotbuche |