

Kanton Aargau
Department Bau, Verkehr und Umwelt
Abteilung Wald
Entfelderstrasse 22
5001 Aarau

Studie: Die Kühlwirkung des Waldes verstehen

Bericht

16. Oktober 2024

Impressum

Studie: Die Kühlwirkung des Waldes verstehen

Auftraggeber: Department Bau, Verkehr und Umwelt des Kantons Aargau
Projektverantwortlicher: Maurus Landolt

Auftragnehmer: GEO Partner AG, Basel und Zürich
Projektleitung: Dr. Andreas Wicki
Fachbearbeitung: Dr. Andreas Wicki, Constanze Burckhardt
Qualitätssicherung: Regula Winzeler

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	5
1.1	Ausgangslage und Fragestellungen	5
1.2	Projektziele und Vorgehen	6
1.3	Untersuchungsraum	6
2	Literaturrecherche.....	9
2.1	Meteorologische Prozesse.....	9
2.1.1	Energiebilanz	9
2.1.2	Waldklima.....	13
2.1.3	Thermische Zirkulationssysteme.....	20
2.1.4	Kaltluftproduktion	24
2.2	Diskussion Kühlwirkungsmechanismen gemäss Literaturstudie.....	35
2.2.1	Mechanismen am Tag	35
2.2.2	Mechanismen in der Nacht	36
2.2.3	Bewertung der Mechanismen.....	38
2.2.4	Spezifische Fragestellungen	38
2.2.5	Hinweise für das Waldmanagement.....	39
3	Simulationsstudie	44
3.1	Methodik.....	44
3.1.1	Fallbeispiele.....	44
3.1.2	Szenarien	45
3.1.3	Modelle.....	45
3.1.4	Vorgehen	46
3.1.5	Charakterisierung der Waldbestände	47
3.2	Resultate.....	50
3.2.1	Thermisches Wohlbefinden in den Waldbeständen.....	50
3.2.2	Nächtlicher Kaltluftabfluss in den Waldbeständen.....	57
3.2.3	Thermisches Wohlbefinden in Schneisen/Verjüngungsflächen	63
3.2.4	Nächtlicher Kaltluftabfluss in Schneisen/Verjüngungsflächen	66
3.2.5	Mechanismen ausserhalb des Waldes	70
3.3	Diskussion der Kühlwirkungsmechanismen gemäss Simulationen	74
3.3.1	Mechanismen am Tag	74
3.3.2	Mechanismen in der Nacht	75
3.3.3	Bewertung der Mechanismen.....	76
3.3.4	Spezifische Fragestellungen	77
3.3.5	Hinweise für das Waldmanagement.....	78
4	Fazit	80
	Anhang.....	82
A.1	Zitierte Grundlagen.....	82
A.2	Abbildungsverzeichnis	86
A.3	Tabellenverzeichnis	88
A.4	Glossar	89
A.5	Details zu den Modellen	92
A.6	Profillinien.....	93
A.7	Modellansichten	94
A.8	Abhängigkeiten im räumlichen Mittel.....	96

Zusammenfassung

Bereits heute zeigen sich die Auswirkungen des Klimawandels in der Schweiz mit einer markanten Häufung von Hitzeperioden in den letzten 20 Jahren. Grünräume und der Wald im Speziellen stellen an heissen Tagen Entlastungsräume mit angenehmem thermischem Komfort dar. Die genauen Wirkmechanismen der Kühlwirkung des Waldes sind noch wenig erforscht.

Gemäss dieser Literaturrecherche und Simulationsstudien ist der entscheidende Kühlwirkungsmechanismus am Tag die Wirkung des Waldes als Entlastungsraum. Die tagsüber niedrigeren Temperaturen innerhalb des Waldes sowie die starke Beschattung bieten Naherholung für die Bevölkerung. Bei Wäldern mit dichten, lichtundurchlässigen Kronendächern ist das Waldklima am angenehmsten ausgeprägt, und der Hitzestress wird am stärksten reduziert. Ab einer gewissen Dichte des Kronendachs wird ein optimales Waldklima erreicht, welches sich mit zunehmender Dichte nicht substanziell verbessert. Hinweise auf grossräumige Windzirkulationen, welche die kühle Luft aus dem Waldbestand in den Siedlungsraum befördern, wurden keine gefunden. Auch bei erzwungenem Wind vom Wald ins Siedlungsgebiet wird die kühle Waldluft rasch von den meteorologischen Prozessen über der vorherrschenden Landnutzung überprägt.

Die nächtliche Kaltluftproduktion ist ein viel beschriebenes und unter bestimmten Witterungsbedingungen deutlich ausgeprägtes Phänomen. Generell wird davon ausgegangen, dass unbewaldete Freiflächen kühlere Luft produzieren als Wälder. Zudem führt der grössere Reibungswiderstand dazu, dass die Luft im Wald mit geringerer Geschwindigkeit abfließt und der Wald als Hindernis für sich ausbreitende Kaltluftströme wirkt. Unklarheiten bestehen bezüglich der Kaltluftproduktionsrate unterschiedlicher Oberflächen, insbesondere verschiedener Waldtypen. Einige Studien gewichten den Einfluss der Topografie stärker als den Einfluss der Landnutzung und attestieren steilen - oft bewaldeten - Hängen eine sehr hohe Kaltluftproduktion. Auch die Simulationsresultate deuten darauf hin, dass die Topografie der entscheidende Einflussfaktor für die Kaltluftproduktion ist und waldbauliche Massnahmen eine untergeordnete Rolle spielen. Die abschirmende Wirkung der Baumkronen gegen übergeordnete Winde kann jedoch dazu führen, dass sich häufiger Kaltluftereignisse einstellen und somit die Häufigkeit von Kaltluftabflüssen zunimmt.

Vergleiche zwischen der Relevanz der Kühlwirkung am Tag und in der Nacht sind wenig sinnvoll. Denn Exposition und Mobilität der Betroffenen am Tag und in der Nacht sowie die beteiligten Prozesse sind zu unterschiedlich. Allein auf den Wald bezogen ist seine Funktion als thermisch angenehmer Entlastungsraum am Tag wichtiger als seine Rolle als Kaltluftproduzent in der Nacht. Kaltluftproduktion findet auch ohne Wald, voraussichtlich sogar effektiver, statt. Für die thermische Entlastung am Tag braucht es jedoch Waldflächen. Argumente für den Wald als Kaltluftproduzent gegenüber Freiflächen sind eine möglicherweise grössere Regelmässigkeit der Kaltluftabflussereignisse sowie der rechtliche Schutz der Waldfläche gegen Versiegelung.

1 Einleitung

1.1 Ausgangslage und Fragestellungen

Bereits heute zeigen sich die Auswirkungen des Klimawandels in der Schweiz mit einer markanten Häufung von Hitzeperioden in den letzten 20 Jahren. Für die Zukunft werden noch häufigere, langanhaltendere und intensivere Hitzeperioden erwartet. Gerade im Siedlungsraum erhöht sich durch die extremen Temperaturen am Tag und die geringere Abkühlung in der Nacht während dieser Phasen die thermische Belastung für den Menschen. Dies kann zu gesundheitlichen Beschwerden bis hin zur Übersterblichkeit bei älteren Personen und Menschen mit chronischen Vorerkrankungen führen.

**Häufung und Intensivierung von
Hitzeperioden**

Grünräume und der Wald im Speziellen stellen bei Hitzeperioden Entlastungsräume mit angenehmem thermischem Komfort dar. Sie bieten ein erholsames Aufenthaltsklima und sind nachts an der Kaltluftproduktion beteiligt. Daher haben Sie das Potenzial, die negativen Effekte für die Bevölkerung abzuschwächen. Bei der Siedlungsentwicklung werden nächtliche Kaltluftströme aus dem Freiland und dem Wald teilweise bereits in die Planung miteinbezogen. Die unmittelbare Kühlwirkung von Wäldern für Städte ist jedoch noch wenig erforscht.

**Relevanz von Entlastungsräumen
mit thermischem Komfort**

Die vorliegende Studie beleuchtet und vergleicht die verschiedenen Kühlwirkungen des Waldes, insbesondere im Kanton Aargau. Dabei steht auch die Frage nach Forschungslücken und Unsicherheiten im Fokus.

Fragestellungen

Konkret soll die Studie Antworten zu folgenden Fragestellungen, unterteilt in drei Themenpunkte, geben:

Kühlwirkungsmechanismen:

- Welches sind die Mechanismen der Kühlwirkung des Waldes auf den Raum, insbesondere den Siedlungsraum, am Tag resp. in der Nacht und wie funktionieren sie?

Gewichtung der Kühlwirkungsmechanismen:

- Wie gross sind diese Effekte quantitativ?
- Wie gross ist der Anteil der Kühlwirkungsmechanismen an der generellen Kühlwirkung? In welchem Verhältnis stehen die Kühlwirkungsmechanismen zueinander?

Einfluss des Waldmanagements auf die Kühlwirkung:

- Wie kann das Waldmanagement bzw. die Waldbewirtschaftung die Kühlwirkung beeinflussen, um sie mindestens zu erhalten oder im Idealfall sogar zu vergrössern/maximieren?
- Wie wirken sich Eingriffe in die Waldbestände unmittelbar auf die Kühlleistung des Waldes aus? Gibt es Eigenschaften waldbaulicher Eingriffe, welche die Kühlleistung erheblich beeinflussen oder beeinträchtigen?

1.2 Projektziele und Vorgehen

Das übergeordnete Ziel der Studie ist es, die verschiedenen Kühlwirkungen des Waldes für angrenzende Siedlungsgebiete besser zu verstehen, damit Massnahmen für das Waldmanagement formuliert werden können. Dazu wird die Studie in zwei Teilprojekte untergliedert.

Übergeordnetes Projektziel

Teilprojekt 1 ist eine Literaturstudie mit dem Ziel, den aktuellen Stand der Forschung zu den Kühlwirkungen zusammenzutragen und Forschungslücken aufzuzeigen (Kapitel 2). Insbesondere wird die Bedeutung für das Untersuchungsgebiet, die Aargauer Wälder und das angrenzende Siedlungsgebiet, herausgearbeitet.

Teilprojekt 1: Literaturstudie

Im Rahmen der Literaturrecherche werden zunächst die gesammelten Resultate aus wissenschaftlichen Publikationen und Lehrbüchern zusammengetragen und wichtige Grundlagen zum Thema beschrieben (Kapitel 2.1). Die gewonnenen Erkenntnisse bezogen auf die Kühlwirkungsmechanismen werden in Kapitel 2.2 zusammengefasst und bewertet. Dabei werden zunächst die Kühlwirkungsmechanismen am Tag und in der Nacht beschrieben und bewertet (Kapitel 2.2.1 bis 2.2.3). In Kapitel 2.2.4 werden spezifische Fragestellungen beantwortet. Hinweise für das Waldmanagement werden in Kapitel 2.2.5 diskutiert.

Aufbau Teilprojekt 1

Die Erkenntnisse aus Teilprojekt 1 werden für die Szenarienbildung in Teilprojekt 2 genutzt (Simulationsstudie, Kapitel 3). Dabei wird die Kühlwirkung des Waldes mit Simulationen berechnet und anhand konkreter Fallbeispiele dargestellt. Basierend auf den Simulationsresultaten werden die Erkenntnisse aus der Literaturrecherche (Kapitel 2.2) überprüft und ergänzt (Kapitel 3.3). In Kapitel 4 werden die gewonnenen Erkenntnisse aus Literaturrecherche und Simulationsstudie im Sinne eines Fazits zusammengefasst.

Teilprojekt 2: Szenarienbildung und Modellierung

1.3 Untersuchungsraum

Neben der Beschreibung und Untersuchung der meteorologischen Prozesse im und um den Wald im Allgemeinen steht die Relevanz der Ergebnisse für die Aargauer Wälder im Vordergrund. Der Kanton Aargau gilt mit einer Waldfläche von über 490 km², die gut 35% des Kantons bedecken, als Waldkanton.

«Waldkanton» Aargau

Die Aargauer Wälder befinden sich zu einem grossen Teil in Hanglagen (Abbildung 1). Etwa 83 % der Wälder weisen eine leichte Neigung von unter 40% Gefälle auf. 20% befinden sich in mittleren Hangneigungslagen zwischen 3° und 10°. Die restlichen Wälder (18%) liegen im Flachem (<0.5° Neigung). In der Klasse der schwach geneigten Hänge (0.5° bis 3° Neigung) gibt es im Kanton Aargau keine Waldflächen. Dies geht auch aus der zweiten Aargauer Waldinventur [1] hervor.

Grossteil der Wälder in leicht geneigten Hanglagen

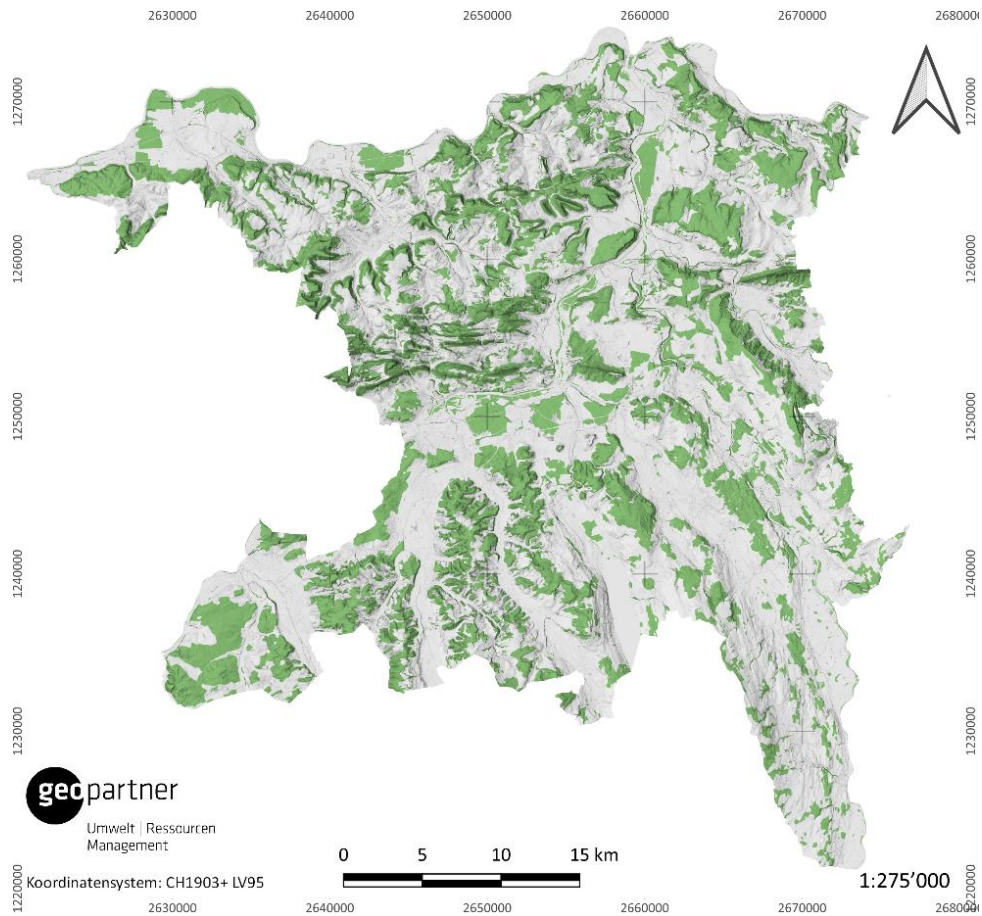


Abbildung 1: Waldflächen im Kanton Aargau (Geodaten Kanton Aargau).

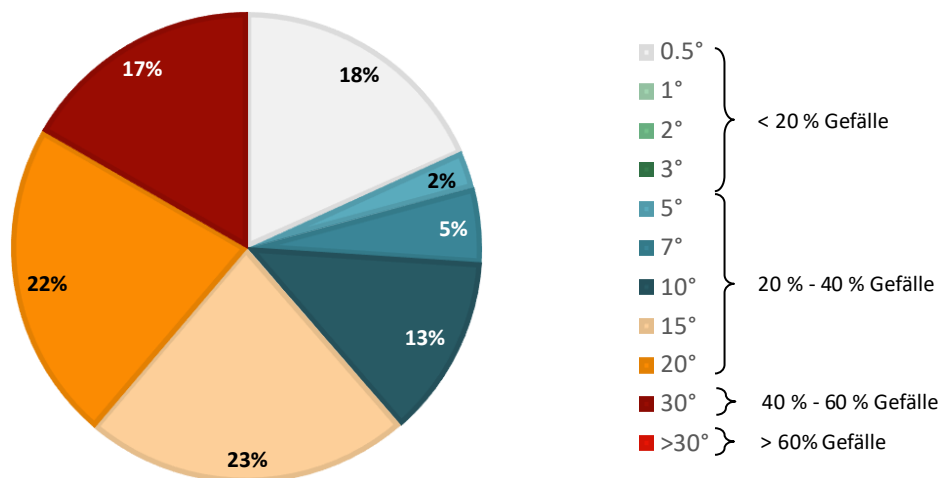


Abbildung 2: Hangneigungsklassen von Waldflächen im Kanton Aargau (Geodaten Kanton Aargau).
Die Einteilung der Klassen erfolgte nach der bodenkundlichen Kartierungsanleitung.

Waldflächen im Kanton Aargau mit einer Hangneigung von über 3° sind gemäss den verwendeten Geodaten zu 40% nach Norden und zu 20% Richtung Süden ausgerichtet. Knapp 30% haben eine Ost-West-Ausrichtung. Nur gut 10% der Wälder haben eine Ausrichtung zwischen den vier Haupthimmelsrichtungen (Tabelle 1).

Wald in Hanglage meist Nord- oder Südausrichtung

Tabelle 1: Hangausrichtung von Waldflächen mit über 3° Hangneigung im Kanton Aargau (Geodaten Kanton Aargau). Für die Flächen wurde hierfür der Modalwert der Ausrichtung bestimmt (Mehrheitlich vorhandene Ausrichtung). Werte gerundet.

Ausrichtung	Fläche [km ²]	Anteil
Nord	157	39%
Süd	86	21%
West	59	15%
Ost	53	13%
Nordost	16	4%
Nordwest	13	3%
Südost	9	2%
Südwest	9	2%
Total	400	100%

Ein weiteres Charakteristikum der Aargauer Wälder ist die Zusammensetzung der Pflanzengesellschaften. Für über 90% aller Waldflächen wurde ein Buchenwald klassifiziert, wobei die Kategorie Waldmeister-Buchenwälder mit 58% am häufigsten auftritt (Tabelle 2).

Vorherrschende Baumart Buche

Tabelle 2: Pflanzengesellschaften von Waldflächen im Kanton Aargau (Geodaten Kanton Aargau). Werte gerundet.

Pflanzengesellschaft	Fläche [km ²]	Anteil
Waldmeister-Buchenwälder	285	58%
Kalk-Buchenwälder	112	23%
Waldhirschen-Buchenwälder	27	6%
Erlen-Eschenwälder	25	5%
Orchideen-Buchenwälder	11	2%
Simsen-Buchenwälder	9	2%
Fichten-Tannenwälder	6	1%
Linden-Bergahornwälder	1	0%
Eichen-Föhrenwälder	1	0%
Tannen-Buchenwälder	0	0%
nicht kartierte Waldfläche	13	3%
Total	491	100%

2 Literaturrecherche

2.1 Meteorologische Prozesse

2.1.1 Energiebilanz

2.1.1.1 Energiebilanz an der Erdoberfläche

Für das Verständnis der Prozesse in der bodennahen Atmosphäre ist die *Energiebilanz* an der Erdoberfläche grundlegend. Die Energiebilanz beschreibt den Energieumsatz an der Erdoberfläche und ist abhängig von der jeweiligen Oberflächenbedeckung. Entscheidender Faktor für die Energiebilanz ist die *Strahlungsbilanz*, welche z.B. den Energieeintrag durch Sonneneinstrahlung oder den Energieverlust durch infrarote Wärmestrahlung umfasst. Man spricht von einer positiven Strahlungsbilanz, wenn die Energiezufuhr am Tag überwiegt und Energie für die Erwärmung der Luft, die Verdunstung oder die Speicherung im Boden zur Verfügung steht. Ist die Strahlungsbilanz nach Sonnenuntergang negativ, findet Auskühlung statt (s. Info-Box 2.1.1.1).

Beschreibung Energiebilanz

Info-Box 2.1.1.1: Energie und Strahlungsbilanz

Energiebilanz der Erdoberfläche

Die Energiebilanz beschreibt die Gesamtheit der zur Oberfläche hin sowie davon weg gerichteten Energieflüsse. In dieser inbegriffen sind die Strahlungsbilanz, der turbulente Strom latenter Wärme, der turbulente Strom fühlbarer Wärme und der Bodenwärmestrom. Abbildung 3 veranschaulicht die Komponenten. Die Richtung zur Erdoberfläche hin stellt einen Energiegewinn dar, umgekehrt ist es ein Energieverlust.

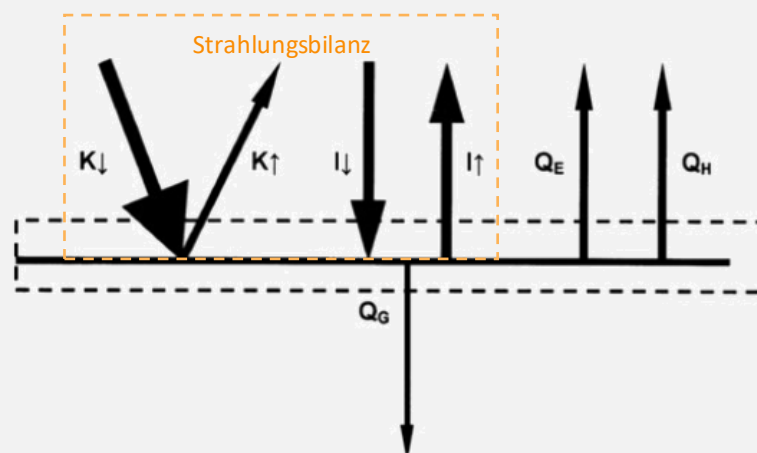


Abbildung 3: Schematische Darstellung der Energiebilanz an der Erdoberfläche (verändert nach [2]). Orange umrandet sind die Komponenten der Strahlungsbilanz. $K_{\downarrow}$ bezeichnet die einfallende kurzwellige Globalstrahlung, $K_{\uparrow}$ die reflektierte kurzwellige Strahlung, $I_{\downarrow}$ ist die langwellige Gegenstrahlung der Atmosphäre und $I_{\uparrow}$ die langwellige Ausstrahlung der Erdoberfläche. Zusätzlich zur Strahlungsbilanz ergeben die turbulenten Ströme fühlbarer Wärme (Q_H) und latenter Wärme (Q_E) und der Bodenwärmestrom (Q_G) die Energiebilanz.

Strahlungsbilanz

Von zentraler Bedeutung für die Energiebilanz ist die Strahlungsbilanz (oranger Kasten in Abbildung 3). Diese umfasst alle lang- und kurzwelligen Strahlungsflüsse, welche zum Erdboden hin oder weggerichtet sein können. Die kurzwellige Strahlung beschreibt dabei das solare Strahlungsspektrum von Ultraviolett ($0.2\ \mu\text{m}$) bis ins nahe Infrarot ($3\ \mu\text{m}$). Die langwellige Strahlung wird in der Meteorologie als Wärmestrahlung definiert, welche von der Erde emittiert wird und im Spektralbereich zwischen $3\ \mu\text{m}$ und $100\ \mu\text{m}$ liegt. Den grössten Input in Richtung der Oberfläche liefert die kurzwellige Globalstrahlung ($K_{\downarrow}$ direkte und diffuse Sonneneinstrahlung). Davon wird ein Teil - abhängig von den Reflexionseigenschaften und beschrieben durch die Albedo (Rückstrahlvermögen) - direkt an der Erdoberfläche reflektiert. Dieser kurzwellige Anteil $K_{\uparrow}$ der Strahlungsbilanz ist somit von der Oberfläche weg gerichtet. Ein weiterer Inputterm, welcher zur Erdoberfläche hin gerichtet ist, ist die langwellige atmosphärische Gegenstrahlung $I_{\downarrow}$. Diese umfasst die Wärmestrahlung, welche von den Gasen und Teilchen in der Atmosphäre emittiert und reflektiert werden. Demgegenüber verliert die Erdoberfläche stetig Energie durch die langwellige Ausstrahlung $I_{\uparrow}$. Diese ist massgeblich für die nächtliche Auskühlung der Erdoberfläche verantwortlich.

Energieverluste an der Erdoberfläche

Die zur Verfügung stehende Energie aus der Strahlungsbilanz teilt sich nun, abhängig von den Oberflächeneigenschaften, auf die unterschiedlichen Komponenten der Energiebilanz auf. Die turbulenten Flüsse transportieren Wärme über die Atmosphäre ab, wobei die latente Wärme Q_E die Energie beinhaltet, die zur Verdunstung von Wasser aufgewendet werden muss. Die fühlbare Wärme Q_H beschreibt die Energie zur Erhöhung oder Senkung der Lufttemperatur. Der Bodenwärmestrom Q_G transportiert Wärme in tiefere Bodenschichten ab.

2.1.1.2 Energiebilanz im Wald

Die Energiebilanz im Wald unterscheidet sich grundlegend von derjenigen im Freiland aufgrund der unterschiedlichen Schichten, welche an den Strahlungsprozessen beteiligt sind. Vereinfacht sind dies im Wald der Stammraum und der Kronenraum. Der Kronenraum entkoppelt dabei den Stammraum von der Atmosphäre oberhalb des Waldes. Somit kann zur Beschreibung der Prozesse der Energieaustausch der Kronenoberfläche (zwischen Atmosphäre und Kronenraum) und der Energieaustausch des Stammraums (zwischen Boden, Stammraum und unterer Kronenraum) unterschieden werden [2], [3], [4], [5]. Dies ist jedoch eine rudimentäre Vereinfachung eines sehr vielschichtigen und komplexen Systems.

Entkopplung des Energieaustauschs durch den Kronenraum

Im oberen Teil des Kronenraums spielt sich ein Grossteil des Strahlungsgeschehens ab. So wird die meiste solare Strahlung in den oberen 30% eines Bestandes von geschlossenen Kronenräumen absorbiert. Der gleiche Teil des Kronenraums ist auch massgeblich an der nächtlichen Ausstrahlung Richtung Atmosphäre beteiligt [6].

Strahlungsgeschehen im oberen Teil des Kronenraums

Die Bedeutung der Entkopplung des Waldbodens von der freien Atmosphäre wird in Kapitel 2.1.2.2 genauer beschrieben.

Die Temperatur der Pflanze hängt von der Strahlungsbilanz ab. Ist diese infolge der solaren Einstrahlung am Tag positiv, so steigt die Pflanzen- und Blattoberflächentemperatur über die der umgebenden Luft. Dadurch wird fühlbare Wärme von der Pflanze auf die umgebende Luft übertragen und erwärmt diese. In der Regel ist, insbesondere an sehr heissen Sommertagen, jedoch eine leichte Überwärmung der Blattoberfläche zu beobachten. Pflanzenorgane können sich leicht mehr als 10-15 °C über die Lufttemperatur erwärmen. Lediglich bei geringer Strahlungsbilanz kann die Blattoberfläche unter die Lufttemperatur sinken, wodurch fühlbare Wärme von der Luft zum Blatt übergeht, und die Luft auskühlt. Kleine Blätter sind für diesen Prozess aufgrund des optimaleren Oberfläche-Volumen-Verhältnisses effektiver als grosse Blätter [7].

Energiebilanz auf Pflanzen- und Blattebene

Bei negativer Strahlungsbilanz nachts wird die Pflanze bzw. ihre Blätter kälter als die Luft. Die Auskühlung der Blattoberflächen wird durch den fühlbaren Wärmestrom kompensiert (d.h. die Luft kühlt aus). Die abgekühlte Luft sinkt in den Stammraum und warme Luft aus der Umgebung strömt nach. Es stellt sich ein Zirkulationssystem ein, bei dem stets warme Luft herangeführt wird, Energie an die Blattoberfläche abgibt und in den Kronenraum absinkt. Die Kronenoberflächen kühlen dadurch trotz stetigem Energieverlust nicht weiter aus [8], [9] (s. auch Kapitel 2.1.4.2).

Negative Strahlungsbilanz nachts

2.1.1.3 Energiebilanz des Menschen

Das Human-Bioklima, auch Bioklima, beschreibt die mikroklimatischen Wechselwirkungen zwischen Atmosphäre und Mensch [10]. Dabei geht es insbesondere um die Wirkung von mikroklimatischen Gegebenheiten auf das Wohlbefinden und die Gesundheit des Individuums [11]. Das thermische Wohlbefinden eines Individuums ist am Tag von unterschiedlichen Einflussfaktoren abhängig und kann über die Energiebilanz des Menschen beschrieben werden (Info-Box 2.1.1.3).

Thermisches Wohlbefinden am Tag

Um das thermische Wohlbefinden zu quantifizieren, wurden unterschiedliche Hitzeindizes entwickelt. Diese Hitzeindizes berücksichtigen die Energiebilanz des Menschen und ermöglichen eine Aussage zur Wärme- bzw. Kältebelastung. Häufig verwendet wird z.B. die *physiologisch äquivalente Temperatur (PET)*, Info-Box 2.1.1.3). Die PET wird auf Grundlage der Strahlungstemperatur (lang und kurzwellige *Strahlungsflüsse* resp. Solar- und Wärmestrahlung), Lufttemperatur, Luftfeuchte, Wind, Bekleidung und Aktivität einer fiktiven Person berechnet [12].

PET

Während mehrtägigen Hitzewellen ist die nächtliche Erholung vom Hitzestress am Tag essentiell. Der menschliche Organismus kann viel besser mit Hitzestress umgehen, wenn er sich nachts regenerieren kann [13]. Dabei nimmt die Bedeutung der Lufttemperatur für das thermische Wohlbefinden zu. Aufgrund der fehlenden Mobilität sind Menschen nachts den vorliegenden Bedingungen, wie z.B. der *städtischen Wärmeinsel* mit deutlich höheren Lufttemperaturen in urbanen Gebieten, stärker ausgeliefert. Abhängig vom Standort innerhalb der Stadt und dem Gebäudealter resp. der Gebäudetechnik kann so die Erholung erheblich reduziert sein.

Nachts Lufttemperatur relevant

Info-Box 2.1.1.3: PET

Hitzestress tagsüber

Tagsüber kommt es, besonders an warmen, besonnten und windschwachen Orten, zu starkem Hitzestress. Dieser beeinflusst das thermische Wohlbefinden eines Individuums drastisch [10], [13]. Mittels Hitzeindizes kann das thermische Wohlbefinden berechnet werden. Als einer der Standards hat sich die Physiologisch Äquivalente Temperatur (PET, von engl. *physiological equivalent temperature*) etabliert [12]. Die PET entspricht vereinfacht dem empfundenen Hitzestress.

Erklärung PET (empfundener Hitzestress)

Temperatur, welche in einem Innenraum ohne direkte Sonneneinstrahlung und Wind sowie einer Luftfeuchtigkeit von 50% herrschen müsste, um den gleichen Hitzestress zu erzeugen wie aktuell von einer Person im Freien empfunden.

Komponenten der Energiebilanz des Menschen

Der Index PET beruht auf der Energiebilanz des Menschen. Daher beinhaltet er die Strahlungstemperatur (lang und kurzwellige Strahlungsflüsse resp. Solar- und Wärmestrahlung), Lufttemperatur, Luftfeuchte, Wind, Bekleidung und Aktivität (Abbildung 4).

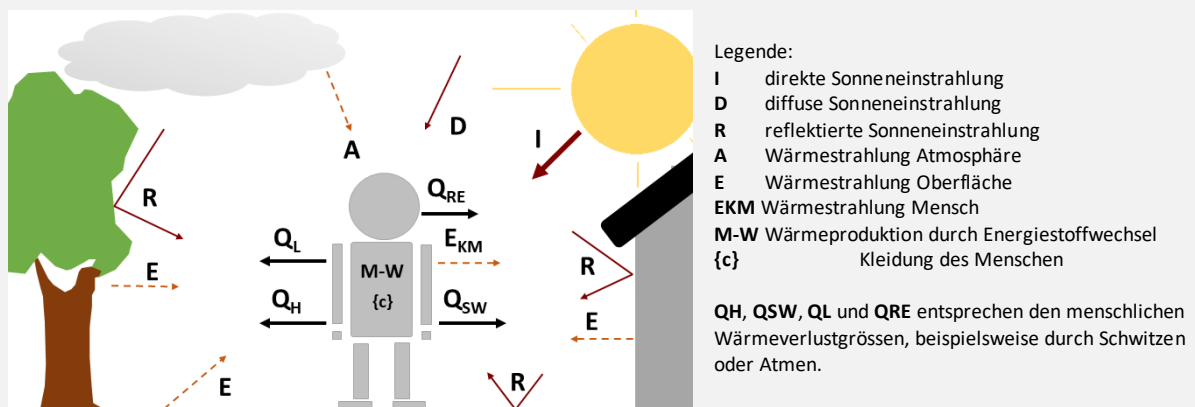


Abbildung 4: Einflussfaktoren auf die thermische Behaglichkeit eines Individuums (nach dwd.de).

Thermisches Empfinden

Die Einheit der PET ist °C und beschreibt die Temperatur, welche in einem Innenraum ohne direkte Sonneneinstrahlung und Wind sowie einer Luftfeuchtigkeit von 50% herrschen müsste, um den gleichen Hitzestress zu erzeugen wie aktuell von einer Person im Freien empfunden. Ab 29 °C PET wird der Hitzestress als moderat empfunden, ab 35 °C als stark und ab 41 °C als extrem. Eine PET von 41 °C bedeutet, dass man als Individuum mit Standardbekleidung bei leichter Bewegung im Freien den gleichen Hitzestress empfindet wie sitzend in einem Raum mit 41 °C Lufttemperatur. Die vollständige Einordnung der Temperaturen für thermisches Empfinden und der Grad der physiologischen Belastung sind im Glossar Anhang A.4 dargestellt.

2.1.2 Waldklima

2.1.2.1 Einteilung der Skalenbereiche

In der Atmosphäre werden verschiedene Skalenebenen herangezogen, um Prozesse zu beschreiben. Das Mikroklima bezieht sich auf die kleinste Skalenebene in der Atmosphäre. Diese umfasst einen räumlichen Bereich von wenigen Metern bis zu einem Kilometer [2]. Zum Teil überschneidet sich die Skalenebene des Mikroklimas mit derjenigen des Lokalklimas. Zum Lokalklima zählen Prozesse zwischen einigen 100 Metern bis mehreren Zehnerkilometern [14]. Für die vorliegende Studie werden Prozesse beider Skalenebenen betrachtet.

Skalenebenen: Mikroklima und Lokalklima

In die Höhe erstreckt sich der fürs Mikro- und Lokalklima relevante Bereich so weit, wie ein Einfluss der rauen und energieumsetzenden Erdoberfläche merkbar ist. Dieser Bereich, die sogenannte atmosphärische Grenzschicht, beschreibt die ersten ca. ein bis zwei Kilometer über der Erdoberfläche in die Höhe [14]. Die Höhe der Grenzschicht wird hierbei von der *Turbulenz* bestimmt, die von den Energieaustauschprozessen und der Reibung der Erdoberfläche ausgelöst wird und für die Luftdurchmischung sorgt. An einem sonnigen, eher windschwachen Sommertag wird die Erdoberfläche beispielsweise stark erhitzt und löst eine aufwärtsgerichtete Strömung (*Thermik*) aus, welche deutlich über einem Kilometer Höhe noch Einfluss hat.

Atmosphärische Grenzschicht

2.1.2.2 Mikrometeorologische Prozesse des Waldes

Innerhalb der Mikrometeorologie können spezielle Mikroklimata unterschieden werden. Da in Wäldern besondere Bedingungen bezüglich meteorologischer Parameter wie Temperatur, relative Feuchte oder Wind herrschen und diese sich klar von den umgebenden Bereichen (oberhalb des Waldes oder an den Waldrändern) unterscheiden, kann das Waldklima als spezielles Mikroklima beschrieben werden.

Mikroklima innerhalb des Waldes - Waldklima

Viele Einflussfaktoren bestimmen das Waldklima. Nach Hupfer et al. [15] sind die Zusammensetzung (Laub-, Nadel- oder Mischwälder), die Bewirtschaftungsform (Reinbestand, Plenterwald, Dauerwald, Femel-, Saum- oder Kahlschläge) und das Alter des Bestandes in Bezug auf Schonung, Dickung, Stangenholz oder Hallenwald entscheidend für die Ausprägung des angenehmen, kühlenden Waldklimas. Subjektiv wird ein Wald mit einem Wechselspiel aus Licht und Schatten zwar als attraktiv bewertet. Je grösser jedoch die Unterbrechungen im Kronendach sind, desto höher können die Temperaturen, die Einstrahlung und der Verlust von Feuchte sein. Die eigentlich kühlende, regenerative Wirkung wird dadurch deutlich gemindert [16].

Attraktivität des Waldes

Wie in Kapitel 2.1.1.2 beschrieben ist, kann der Wald zur Veranschaulichung der Prozesse grob in einen Stammraum und einen Kronenraum unterteilt werden. Die Entkopplung des Stammraumes führt dazu, dass sich innerhalb des Waldes ein anderer Tagesgang der Lufttemperatur entwickelt als über der Waldfläche (Abbildung 5). Der Unterschied ist vor allem tagsüber deutlich. Das Maximum der Lufttemperatur tritt, leicht verzögert zum Sonnenhöchststand, im oberen Kronenraum auf. Das heisst, dass am Tag im Stammraum eine *stabile* Schichtung (oben wärmer als unten) und über dem Wald eine *labile* Schichtung vorherrscht (unten deutlich wärmer als oben; s. Info-Box 2.1.2.2) [2].

Entkopplung und Schichtung

In der Nacht ändern sich die Strahlungsflüsse im Vergleich zum Tag grundsätzlich. Da der Wald nachts an seiner Oberfläche Wärme durch Ausstrahlung verliert, bildet sich das nächtliche Lufttemperatur-Minimum ebenfalls im Kronenraum (Abbildung 5). Die Folge ist eine stabile Schichtung über dem Wald. Durch das Absinken dieser kalten Luft sinkt auch das Minimum zeitnah auf den Waldboden [2], [6]. Die Minima und Maxima sind innerhalb des Waldes jedoch gegenüber der Luft über dem Wald weitaus gemässiger und weniger extrem [11]. Mehrere Studien beschreiben in der Nacht, insbesondere in Hanglagen, *neutrale* Bedingungen im Stammraum [5], [17], [18], [19]. Grund dafür ist ein starkes Durchmischen bei einsetzender hangabwärts gerichteter Strömung.

Lufttemperatur des Waldklimas in der Nacht

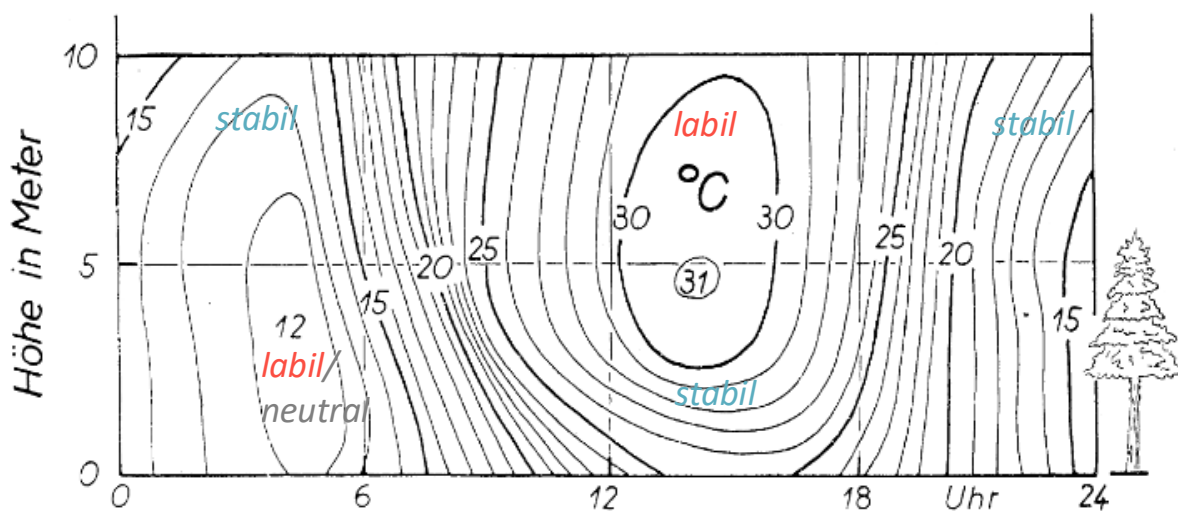


Abbildung 5: Tagesgang der Lufttemperatur in und über einem Wald (verändert aus [2]).

Info-Box 2.1.2.2: Stabilität

Stabilität der Atmosphäre

Die mittlere Temperaturabnahme der Atmosphäre beträgt $0,65\text{ }^{\circ}\text{C pro } 100\text{ m}$. Dieser sogenannte adiabatische Temperaturgradient beschreibt die vertikale Temperaturabnahme in einer neutral (indifferent) geschichteten Atmosphäre. Durch Erwärmung der bodennahen Atmosphärenschichten am Tag kann die vertikale Temperaturabnahme z.B. auch grösser als $0,65\text{ }^{\circ}\text{C pro } 100\text{ m}$ sein. In dem Fall spricht man von einer labilen (instabilen) Schichtung. Durch nächtliche Auskühlungsprozesse kann aber auch der gegenteilige Fall eintreten und die Lufttemperatur weniger als $0,65\text{ }^{\circ}\text{C pro } 100\text{ m}$ abnehmen. In diesem Fall spricht man von einer stabilen Schichtung, welche auch Austauschprozesse stark einschränkt. Der Extremfall ist eine Temperaturschichtung, bei der es nach oben hin wärmer wird. Dies wird als Inversion bezeichnet [4]. Unter stabilen Bedingungen ist der vertikale Austausch eingeschränkt.

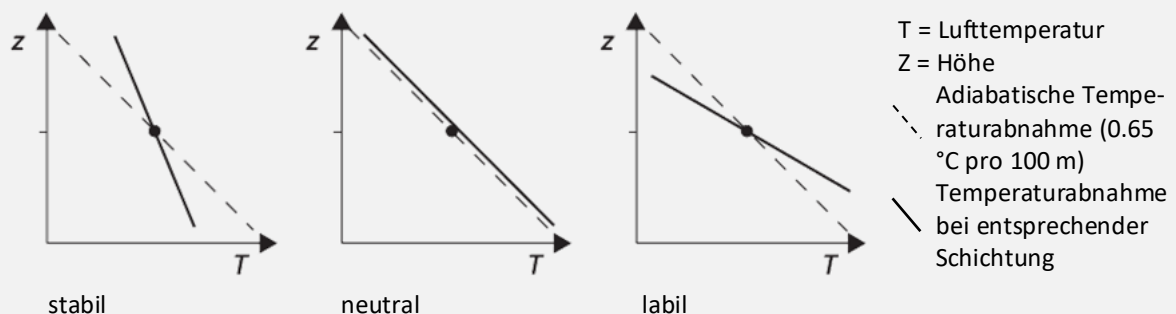


Abbildung 6: Temperaturabnahme bei entsprechenden Schichtungsverhältnissen [20].

Neben den tagsüber tieferen Temperaturen innerhalb des Waldbestands wird auch der Wind beeinflusst. Während oberhalb eines Waldbestandes die Windgeschwindigkeit mit zunehmender Höhe in der Regel gemäss dem sogenannten logarithmischen Windprofil zunimmt, ist sie innerhalb des Bestandes im Kronenraum am höchsten und wird durch den starken Reibungseinfluss des Waldes bis zum Waldboden exponentiell abgebremst (Abbildung 7). Die etwas geringere Reibung im lichterem Stammraum ohne dichtes Unterholz begünstigt ein sekundäres Geschwindigkeitsmaximum [2]. Am Tag liegt dieses in hügeligen Gebieten tendenziell im oberen Stammraum. In der Nacht werden die höchsten Windgeschwindigkeiten in der untersten Ebene beobachtet, wo der *Kaltluftabfluss* am effektivsten ist [19]. Dies ist jedoch auch abhängig von der Dichte des Unterwuchses. Bei sehr steilen Wäldern wurden auch schon S-förmige Windprofile mit einem Maximum im Stammraum und einem zweiten Maximum über dem Kronendach gefunden [18], [21].

Abgeschwächter Wind innerhalb des Waldes

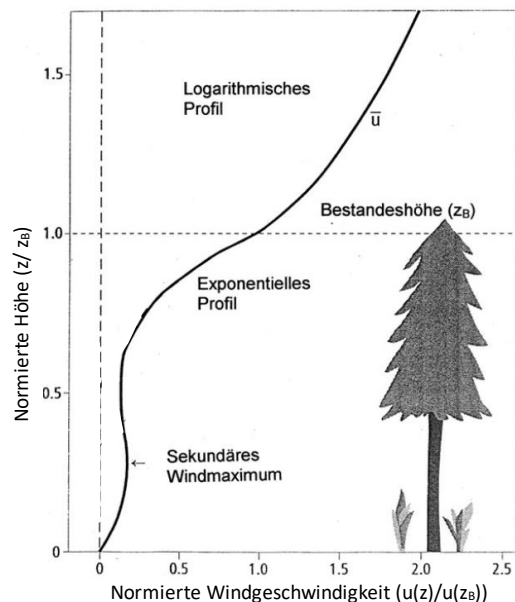


Abbildung 7: Profil der Windgeschwindigkeit innerhalb eines Waldes und darüber (verändert nach [2]). Über dem Waldbestand zeigt sich das logarithmische Windprofil (zunehmende Windgeschwindigkeit bei zunehmender Höhe). Innerhalb des Waldes ergibt sich im Stammraum ein sekundäres Windmaximum.

Wälder in Hanglage zeigen eine deutlich zweiteilige Verteilung ihres Windfeldes. Mit dem Tag-/Nachtwechsel kehrt die Windrichtung rasch um 180°. Über dem Waldbestand ist dies meist nicht so deutlich und auch nur für kurze Zeit erkennbar. Die Strömungsrichtung wird dort eher vom übergeordneten Talwindsystem überprägt, sobald dieses einsetzt [19], [22].

Wind in Wäldern an Hängen

2.1.2.3 Waldrandklima

Ein weiteres mit dem Wald verbundenes Mikroklima ist das Waldrandklima. Die Verhältnisse unterscheiden sich hier grundlegend von denen innerhalb des Waldes. Dabei gibt es nicht nur grosse Unterschiede meteorologischer Grössen, sondern auch einen Übergang der Vegetation vom Wald zur Freifläche, eine Veränderung der hydrologischen Verhältnisse und möglicherweise auch der Böden.

Waldrandklima

Die Ausrichtung des Waldrandes in Bezug auf die Sonneneinstrahlung und die Windrichtung ist dabei ein entscheidender Faktor. Für einen besonnten Waldrand, also einen gegen Süden ausgerichteten Waldrand, sind die veränderten Bedingungen der atmosphärischen Parameter in Abbildung 8 dargestellt. Aufgrund der stärkeren Einstrahlung, nicht nur durch direktes und diffuses Sonnenlicht, sondern auch durch die kurz- und langwellige Reflexstrahlung sind die Luft- und Bodentemperatur vor dem Wald höher als ohne diesen zusätzlich vom Waldrand reflektierten und emittierten Eintrag. Die relative Luftfeuchte und, bedingt durch eine stärkere Verdunstung, auch die Bodenfeuchte sind hingegen tief [23]. Der Wald bietet zudem bei entsprechender Windrichtung einen Windschatten, sodass dieser Waldrandbereich bei ungünstiger Exposition zu einem bioklimatisch unangenehmen Bereich während Hitzewellen werden kann. Es gibt auch Hinweise darauf, dass diese Faktoren das Waldrandsterben fördern. Gemäss der Studie sind jedoch auch Schadstoffeinträge von Autobahnen mitverantwortlich [24].

Meteorologische Verhältnisse

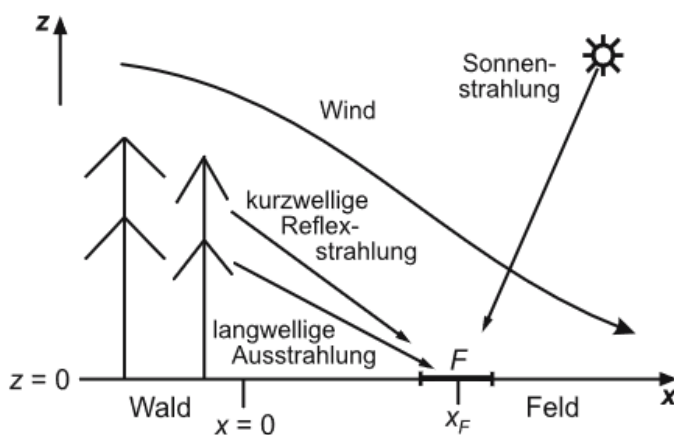


Abbildung 8: Mikroklimatische Verhältnisse des Waldrandklimas für einen besonnten Waldrand [23]. Der Waldrand befindet sich bei $x=0$, die x -Achse beschreibt also die Distanz zum Waldrand. Die Höhe wird über die z -Achse beschrieben. Ein Flächenelement F wird an der Stelle x_F betrachtet.

2.1.2.4 Biochemische Prozesse des Waldes

Wälder geben durch Verdunstung eine grosse Menge an Feuchtigkeit in die Atmosphäre ab. Studien zufolge sind es für Laubwälder der Mittelbreiten rund 300-600 mm Wasserdampf (Wasser in gasförmigem Zustand), also umgerechnet 600 l/m² [15]. Diese Befeuchtung der Atmosphäre ist essenziell für die Bildung von Wolken.

Hohe Verdunstung

Allerdings bedarf es für die Bildung von Wolken weiterer Bestandteile. Damit aus dem gasförmigen Wasserdampf Wolkentröpfchen werden, werden sogenannte Kondensationskeime benötigt. Diese sorgen dafür, dass Wasserdampf zu Wasser kondensiert und daraus Wolken entstehen. Typischerweise sind Partikel wie Salz aus den Ozeanen oder Staub solche Kondensationskeime.

Wolkenbildung an Kondensationskeimen

Auch biogene Stoffe können solche Kondensationskeime bilden. Darunter zählen vor allem organische Dämpfe aus Nadelwäldern, wie wir sie z.B. in einem Pinienwald wahrnehmen. Man spricht hier von flüchtigen organischen Verbindungen (VOC, von engl. *volatile organic compounds*), die aufgrund ihres Ursprungs als biogen bezeichnet werden. Durch weitere chemische Prozesse entwickeln sich diese zu festen Teilchen, welche dann die eigentliche Rolle des Kondensationskeims übernehmen [25], [26].

VOC als Kondensationskeime

Damit ergibt sich ein indirekter Kühlungseffekt der Wälder. Verdunstung, Kondensationskeime und gute Durchmischung der Luft über dem Wald begünstigen die Wolkenbildung. Da die Wolkenbedeckung gleichzeitig für Beschattung sorgt, reduziert sich der Hitzestress lokal. Für grosse Waldbereiche in Westeuropa wurde der Effekt anhand von Satellitendaten bereits nachgewiesen [27]. Dabei konnte vor allem eine signifikant kleinere Wolkenhäufigkeit festgestellt werden, nachdem grosse Teile des Waldes im Jahr 2009 durch Sturm Klaus verwüstet worden waren. Im Rahmen der naturnahen Waldbewirtschaftung sind keine negativen Beeinflussungen der zusätzlichen Wolkenbildung zu erwarten, da die Eingriffe im Verhältnis zu klein sind. Gleichermassen ist das Potenzial für zusätzliche Wolkenbildung durch geeignete Bewirtschaftung gering.

Indirekter Kühleffekt durch Wolken

2.1.2.5 Waldfunktionen

Wälder bieten dank ihrem ausgeglichenen Waldklima am Tag gegenüber dem Umland einen um einige Grad Celsius kühleren Aufenthaltsraum. Zudem reduziert sich der Hitzestress in Wäldern durch die weitreichende Beschattung markant (s. Info-Box 2.1.2.5). Gerade während Hitzewellen steigt daher der Bedarf für stadtnahe Wälder als Naherholungsräume. Im Kanton Aargau suchen knapp 43% der Bevölkerung ein- bis zweimal pro Woche Wälder auf (Schweiz: 37%). Knapp 16% sogar fast täglich (Schweiz: 13%). Im Minimum halten sich dabei die meisten Personen zwischen einer halben Stunde und einer Stunde im Wald auf [16], [28].

Naherholungswert am Tag

Die Luftqualität innerhalb des Waldes gehört zu den speziellen Ausprägungen des Waldklimas und zu seinen wichtigen Waldfunktionen. Die reduzierte Windgeschwindigkeit und die fehlende Durchmischung der Luft am Tag können diese zwar verschlechtern, da sich belastete Luftmassen, ebenso wie die Luftfeuchte, eher bodennah anreichern können. Gleichzeitig bieten die Blätter jedoch eine grosse Ablagefläche, welche Partikel aufnehmen kann. Dadurch hat der Wald eine Filterwirkung, welche die Luft säubert [11]. Dies kann teilweise auch das Ausmass von Allergien verringern [16]. Die Filterwirkung des Waldes führt auch dazu, dass aus dem Wald strömende Luft nicht mit Abgasen verunreinigt ist [29], [30]. Zudem fehlt im Wald in der Regel auch die Schadstoffquelle.

Luftqualität im Wald

Das Waldklima bietet dadurch einen Ort für vielseitige Nutzungsformen wie Sport, Tourismus und verschiedenste Freizeitaktivitäten. Gut drei Viertel der Aargauer Bevölkerung gehen zu Fuss in den Wald (Schweiz: 67%), zwei Drittel der Bevölkerung benötigt für die Anreise weniger als zehn Minuten (Schweiz: 57%) [28], [31]. Dabei stehen vor allem sportliche Aktivitäten wie Wandern, Spazieren, Joggen oder Radfahren im Fokus. Sämtliche Waldfunktionen, welche Wohlfahrtsauswirkungen für den Menschen haben bzw. den Wald zum angenehmen Aufenthaltsort machen, stammen von Kuttler (2008) [11] und sind in Tabelle 3 aufgelistet.

Vielseitige Waldnutzung und Waldfunktionen

Tabelle 3: Allgemeine Wohlfahrtsauswirkungen des Waldes für den Menschen [11].

Allgemeine Wohlfahrtsfunktion	Beschreibung
Günstiges thermisches Milieu	- Dämpfung der Extremwerte der Lufttemperaturen im Tages- und Jahresgang - Deutlich niedrigere Strahlungstemperaturen als im Freiland - Frontenbedingter Wetterwechsel tritt nur in abgeschwächter Form auf - Dämpfung von Windgeschwindigkeit und kurzweiliger Einstrahlung - Stammraum stellt ein mildes Schonklima dar
Schutz gegen Luftverschmutzung	- Aktive Filter wegen grosser Oberflächenrauigkeit - Deposition luftgetragener Stäube im Wesentlichen an der Leeseite des Bestandes - Trockene und nasse (über den Niederschlag erfolgende) Deposition von Luftinhaltsstoffen in Nadelwäldern grösser als in Laubwäldern - Wesentlich höhere Ablagerungswerte an Luftinhaltsstoffen durch Nebeldeposition im Bestand als im Freiland (Filterfunktion) - Teilweise stomatäre (durch die Spaltöffnungen erfolgende) Aufnahme gasförmiger Luftverunreinigungen
Schonendes Lichtklima	- Starke Reduktion der solaren Beleuchtungsstärke in Abhängigkeit von der Höhe über Grund im Stammraum - Kein Auftreten unangenehmer Lichtreize - Wellenlängenabhängige Strahlungsveränderung (Dominieren der grünen Farbe mit positiven Auswirkungen auf die menschliche Psyche)
Lärmdämpfung	- Durch Platzhaltereffekt Abstandsvergrösserung zu Lärmquellen - Zusätzliche Dämpfung durch Stellung und Dichte von Ästen und Blättern - Nadelwälder dämpfen aufgrund der Nadelstruktur insbesondere Schallwellen hoher Frequenz - Grösste Schallabsorption geht von jungen Beständen mit tiefhängenden Ästen aus
Schutz vor Niederschlägen und Starkregenabflüssen	- Vollständige Abschirmung bei leichten und kurz andauernden Niederschlägen (bei Nadelbäumen mehr, bei Laubbäumen weniger) - Interzeptions-Anteil (Benetzungswasser, das nach Niederschlag an Ästen und Blättern haftet, von dort aus verdunstet und deshalb den Boden nicht erreicht) von Bäumen liegt zwischen 10% und 30%, in Einzelfällen können 70% (Zirben) erreicht werden - Hohe Wasserspeicherfähigkeit des Waldbodens durch hohen Humusanteil verhindert Abflussspitzen nach Starkregenereignissen

2.1.3 Thermische Zirkulationssysteme

2.1.3.1 Flurwinde

Ein System wie die Atmosphäre strebt immer einen Gleichgewichtszustand an. Wenn also zwei Orte einen unterschiedlichen Luftdruck aufweisen, braucht es eine Ausgleichsströmung (Wind), um die Bedingungen an beiden Orten anzugleichen [11]. Die Gründe für die Luftdruckunterschiede und das sich entwickelnde Zirkulationssystem der Ausgleichsströmungen werden in Info-Box 2.1.3.1 an einem einfachen Beispiel auf einer flachen Ebene beschrieben.

Wind als Ausgleichsströmung

In Realität ist die Flächennutzung für die Entwicklung der Druckunterschiede relevant. Denn verschiedene Flächen mit unterschiedlichen physikalischen Eigenschaften des Bodens führen zu einer räumlich differenzierten Erwärmung und Abkühlung der Erdoberfläche. Hierdurch entstehen die in Info-Box 2.1.3.1 beschriebenen horizontalen Luftdruckunterschiede, die in ebenem Gelände eine thermisch induzierte Zirkulation bewirken. Im Stadt-/Umlandbereich wird diese reale Zirkulation „*Flurwindsystem*“ genannt [15].

Flächennutzung als Auslöser

Für Städte in der Ebene ist der *Flurwind* entscheidend für die Kühlung und die Frischluftzufuhr. Aufgrund der Unterschiede der Oberflächen zwischen der dicht bebauten, versiegelten Stadt und dem vegetationsreicheren Umland ergibt sich eine Temperaturdifferenz (vgl. *städtische Wärmeinsel*). Flurwinde dringen bodennah, wenige Meter mächtig und mit geringer Geschwindigkeit in die Stadt ein [15]. Da sich die Temperaturdifferenz im Tagesverlauf nicht umkehrt, ändert sich auch die Richtung des Flurwindes nicht. Es wird also immer die Luft des ruralen Umlandes in die Stadt «angesaugt». Die Temperaturdifferenz hat jedoch einen Tagesgang und beträgt am Tag im Mittel nur knapp 0.5 °C, in der Nacht gut 2-3 °C [11], [32], [33]. Dadurch sind Flurwinde nachts am deutlichsten ausgeprägt [14], [34].

Flurwinde kühlen ebene Städte

Dieser Zirkulation wirkt stadteinwärts jedoch die Reibungskraft entgegen, deren Grösse z.B. von der Landnutzung und der Hindernishöhe abhängt [23]. Die sich während eines Flurwindereignisses ergebende theoretisch maximale Windgeschwindigkeit ist u.a. abhängig von den horizontalen Temperaturunterschieden zwischen Stadt und Umland.

Reibung als limitierender Faktor

Info-Box 2.1.3.1: Thermische Zirkulation

Thermische Zirkulation auf der Ebene

Man betrachtet eine Oberfläche (brauner Balken in Abbildung 9), auf der zunächst keine Temperaturunterschiede vorherrschen, sodass auch keine Druckunterschiede vorliegen, welche eine Luftbewegung verursachen (Abbildung 9 (1)).

Wird nun durch Einstrahlung wie in Abbildung 9 (2) die Oberfläche unterschiedlich stark erwärmt, dehnt sich die wärmere Luft stärker aus und bewirkt dadurch einen horizontalen Druckunterschied. In der Höhe entsteht im wärmeren Bereich ein hoher Luftdruck und im kühleren Bereich ein tiefer Luftdruck.

Dieses «Ungleichgewicht» verursacht eine Ausgleichsströmung, welche in der Höhe durch das grössere horizontale Druckgefälle stärker ist als in Bodennähe (Abbildung 9 (3)). Das Abströmen vom wärmeren Bereich in den kühleren Bereich führt schliesslich dazu, dass das Druckgefälle in der Höhe abnimmt. Gleichzeitig wird die Luftsäule im kälteren Bereich durch die Zufuhr von Luft schwerer bzw. im wärmeren Bereich durch das Abströmen der Luft leichter.

Daher entwickelt sich in Bodennähe ein Druckunterschied mit Ausgleichsströmung, welche entgegengesetzt ist zu derjenigen in der Höhe (Abbildung 9 (4)). Durch das Zusammenströmen der Luft in Bodennähe und das Wegströmen der Luft in der Höhe im wärmeren Bereich kommt es schliesslich zu vertikalen Bewegungen, welche die Zirkulation schliessen [35]. Dieses einfache System lässt sich auf komplexere Beispiele anwenden, wie das in Kapitel 2.1.3.2 beschriebene Berg-Tal-Windsystem.

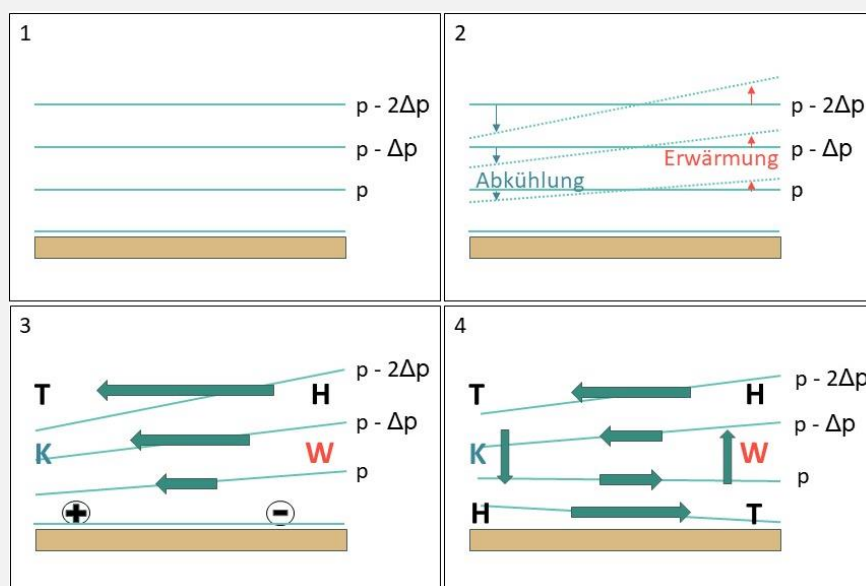


Abbildung 9: Thermisch induzierte Zirkulation (verändert nach [35]). Es gibt keine horizontalen Temperaturunterschiede, sodass die Luftdruckebenen (hellblaue Linien), deren Luftdruck p mit der Höhe um den Luftdruck Δp jeweils abnimmt, parallel zueinander liegen. Es gibt also keine Luftbewegung (1). Die Oberfläche wird nun in der horizontalen unterschiedlich erwärmt. Durch die Ausdehnung von Luft mit höherer Temperatur ergeben sich horizontale Druckunterschiede (2). Aufgrund dieser thermisch ausgelösten Druckunterschiede entwickelt sich zunächst eine Ausgleichsströmung in der Höhe vom hohen Luftdruck (H) zum tieferen Luftdruck (T, 3). Diese bewirkt bodennahe Druckveränderungen, sodass eine der Höhe entgegengesetzte Ausgleichsströmung einsetzt. Das bodennahe Zusammenströmen und Entweichen in der Höhe für den erwärmten Bereich (W) und umgekehrt für den kühleren Bereich (K) bewirkt schliesslich vertikale Bewegungen, welche die Zirkulation in einen Kreislauf bringen (4).

2.1.3.2 Waldbrise

Lokale Windsysteme wie die in Kapitel 2.1.3.1 beschriebenen thermisch induzierten Windsysteme können die grossräumige Wetterlage überprägen. Wie in Kapitel 2.1.2.3 beschrieben wurde, ist die Luft im Stammraum des Waldes am Tag deutlich kühler als die Luft über angrenzenden besonnten Freiflächen. In der Theorie könnte sich daher eine thermisch induzierte Ausgleichsströmung vom Wald hin zu den Freiflächen entwickeln [14]. Dafür bräuchte es jedoch ein Zirkulationssystem, welches auch eine absinkende Komponente aus dem Kronenraum in den Stammraum beinhaltet. Der Kronenraum ist jedoch tendenziell wärmer als der Stammraum, weshalb keine solche Tendenz vorhanden ist (Kapitel 2.1.2.2) [6]. Studien haben zudem ergeben, dass in Hanglagen bereits bei geringen Neigungen topografische Effekte die thermisch induzierten Windsysteme überwiegen [36], [37]. Auf einer kleineren Skalenebene kann vermutlich ein leichter Effekt durch kühle Brisen am Waldrand auf die unmittelbare Nähe beobachtet werden [14].

Keine Tendenz wegen wärmerem Kronenraum

Für steile nord- oder ostausgerichtete, bewaldete Hänge sind Abflüsse kühler Luft aus dem Wald in angrenzende Siedlungsgebiete auch am Tag vorstellbar [38]. Durch die geringere Sonneneinstrahlung kann die Energiebilanz dort auch am Tag negativ sein, womit die Voraussetzung für den Kaltluftabfluss gegeben wäre. Frühmorgens kann auch nach Sonnenaufgang noch Kaltluft aus Wäldern abfliessen, insbesondere an beschatteten Westhängen [14].

Abfluss aus Schattenhängen

In der Forschung wird unter Waldbrise auch eine Strömung von den an den Wald angrenzenden Freiflächen zum Wald hin (also in umgekehrter Richtung) beschrieben. Auslöser ist hier die Thermik über den Wäldern, die sich durch ihre dunklere Oberfläche stärker erwärmen als die angrenzenden Freiflächen und zudem reichlich verdunsten. Am ehesten würden diese Strömungen in sehr grossen und flachen Wäldern auftreten, wie sie im Kanton Aargau nicht vorkommen [39], [27].

Waldbrise als umstrittener Begriff

Theoretisch könnten übergeordnete Winde eine Brise aus dem Wald in angrenzende Bereiche erzeugen, wovon kleinräumig profitiert werden kann. Ein möglichst reibungsfreier Stammraum (d.h. wenig Hindernisse wie Unterholz, Sträucher, dicke Stämme, Holzpolter) und ein offener Waldrand (d.h. keine dichte Vegetation, Sträucher etc.) würden sich sicherlich positiv auf diese Form der Waldbrise auswirken. Zu diesem Phänomen wurde jedoch wenig Evidenz gefunden und es wurde auch kaum in der Literatur beschrieben.

Waldbrise durch übergeordneten Wind

2.1.3.3 Berg-Tal-Windsystem und Kaltluftabfluss

Eine besondere thermisch induzierte Zirkulation betrifft lokale Winde in komplexer Topografie, wie sie im Kanton Aargau grossflächig vorhanden ist (Kapitel 1.3). Insbesondere bei wolkenlosen, windschwachen Wetterlagen kommt es zur Ausbildung eines orographischen Windsystems, dem sogenannten Berg-Tal-Windsystem (Info-Box 2.1.3.3).

Berg-Tal-Windsystem

Info-Box 2.1.3.3: Berg-Tal-Windsystem

Situation Nacht

Während der Nacht kühlen die Hänge aufgrund der negativen Strahlungsbilanz aus und kühlen dadurch die am Hang aufliegende Luft. Diese Luft wird im Vergleich zur Umgebung schwerer und beginnt in Richtung Talboden zu fließen. Es entsteht ein Hangabwind, welcher mit zunehmender Kaltluftansammlung am Talboden einen Bergwind (talwärts gerichtete Strömung) zur Folge hat, der bis nach Sonnenaufgang andauert (schwarze Pfeile in Abbildung 10 a).

Situation Tag

Die exponierten Hügelregionen erwärmen sich nach Sonnenaufgang stärker als das Tal. Dadurch entwickelt sich ein Sog, der die Luft aus den Ebenen entlang der Täler bergauf zieht, ein sogenannter Talwind (bergwärts gerichtete Strömung, schwarze Pfeile in Abbildung 10 b und c). Bei Sonnenuntergang resp. bei Umkehr der Strahlungsbilanz (Strahlungsverlust grösser als Einstrahlung) kehrt die Situation, und die anfangs beschriebene Kaltluftproduktion beginnt sich von Neuem zu bilden [35], [2], [37].

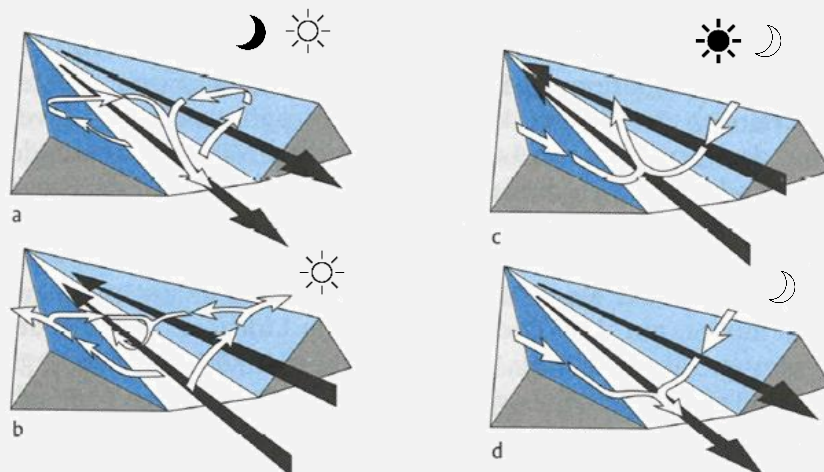


Abbildung 10: Schematische Darstellung der Hangwinde und der Berg- und Talwinde nach Defant (verändert nach [35]). Dargestellt sind die Tageszeiten Sonnenaufgang (a), Mittag (b), Abend (c) und Nacht (d).

Das Ausmass der *Kaltluftproduktion* und der Beginn der Kaltluftbildung sind auch von der Geländeexposition abhängig. So setzt die Kaltluftbildung an früh-abendlichen Schattenhängen eher ein und erreicht an Nordhängen grössere Produktionsraten als an Südhängen, da der den Strahlungsverlust kompensierende Bodenwärmestrom geringer ist [37]. Die Bildung dieser Windsysteme spielen für die Frostgefährdung, jedoch auch für die Durchlüftung und Frischluftzufuhr von wärmebelasteten Städten und Siedlungen durch Kaltluftvolumenströme eine entscheidende Rolle [40].

Einfluss Geländeexposition

Die weissen Pfeile in Abbildung 10 beschreiben das Hangwindssystem. Dieses ist kleinräumiger als das Berg-Tal-Windsystem und weist geringere Strömungsgeschwindigkeiten auf. Die nächtlichen Hangabwinde sind typischerweise Kaltluftabflüsse. Beide lokalen Windphänomene treten parallel, aber nicht zeitgleich zueinander auf. Das Berg-Tal-Windsystem ist durch sein grossräumiges Einzugsgebiet etwas träger und somit verzögert zum Hangwindssystem [35], [2]. Je nach Zeitpunkt, Ort und Topografie kann für einen spezifischen Standort das Hangwindssystem relevanter sein als das übergeordnete Bergwindssystem. Die Fliessgeschwindigkeit eines Hangwindsystems beträgt in der Regel $0.5\text{--}3\text{ m s}^{-1}$, bei geringer Hangneigung jedoch meist weniger als 1 m s^{-1} [21], [37], [41], [42]. Für steilere Hänge mit hoher Kaltluftmächtigkeit kann die Geschwindigkeit auch grösser sein [14]. Jedoch erfolgt die Ausbreitung nicht in einem kontinuierlichen Strom, sondern eher schubartig, periodisch abgeschwächt. Grund hierfür sind vermutlich Hindernisse, die die kühle Luft aufstauen, bis der Punkt erreicht wird, an welchem diese das Hindernis überwindet [14]. Die vertikale Mächtigkeit eines solchen Systems beschränkt sich in der Regel auf wenige Dekameter [37], [41].

Hangwindssystem

2.1.4 Kaltluftproduktion

2.1.4.1 Bedingungen für Kaltluftabfluss

Zwei grundsätzliche Bedingungen müssen für die Entwicklung von Kaltluftabflüssen erfüllt sein. Dies ist zum einen die ungehinderte Ausstrahlung, welche nur bei möglichst wolkenfreien Nächten gegeben ist. Bei zu hoher Gegenstrahlung der Atmosphäre, bedingt durch eine Wolkendecke, kühlt die bodennahe Luftschicht nicht stark genug aus. Als Grenzwert wird dabei eine Wolkenbedeckung von 50% angenommen [40]. Zum anderen bedarf es auch einer geringen Geschwindigkeit des übergeordneten Windes. Bei zu starkem Wind hingegen wird die auskühlende bodennahe Luft mit der darüberliegenden wärmeren Luft durchmischt, wodurch sich kein Zirkulationssystem entwickelt. Der Grenzwert für die Windgeschwindigkeit wird je nach Quelle auf $1\text{--}3\text{ m s}^{-1}$ festgelegt [34], [37]–[39]. Allgemein kann man davon ausgehen, dass bei Windgeschwindigkeiten von mehr als 3 m s^{-1} keine signifikanten Kaltluftabflüsse auftreten [37], [41].

Meteorologische Bedingungen für thermische Zirkulationssysteme

In der Regel werden versiegelten Flächen und insbesondere bebauten Flächen keine Kaltluftproduktionsraten zugeschrieben, da die bodennahe Auskühlung gehemmt und der vertikale Temperaturunterschied in der Regel klein ist. Eine weitere Bedingung für die nächtliche Kaltluftproduktion ist somit auch, dass eine Oberfläche unverbaut und nicht versiegelt ist. Die übrigen Landnutzungsklassen zeigen starke Unterschiede, welche von multiplen Faktoren abhängig sind.

Landnutzung bedingt Kaltluftproduktion

Für das Einsetzen eines Hangwindsystems braucht es mindestens $1\text{--}2^\circ$ Hangneigung [34], [37], [41], [45]. Über Flächen mit höherem Bewuchs (ohne freien Stammraum) beträgt die Mindesthangneigung sogar 5° [37]. Theoretisch können Abflüsse bereits bei Neigungen unter 1° auftreten, sind dann aber schwach ausgeprägt und von windschwachen Bedingungen sowie einer geringen Rauigkeit des Untergrunds abhängig [7], [46]. Der Kaltluftstrom nimmt bei einer Zunahme der Hangneigung nicht linear zu und wäre bei einem 10° geneigten Hang doppelt so stark wie bei einem 1° geneigten Hang [45].

Erforderliche Hangneigung

Für die Ausbildung von klimaökologisch bedeutsamen Strömungen (s. auch Klimakarten Kanton Aargau [47]) muss neben einem starken Gefälle von mehr als 5° auch ein entsprechendes Einzugsgebiet beteiligt sein (>3 km² bei einem Hangwind, >15 km² bei einem Bergwind). Ausserdem sollte die Differenz von Bergrücken zu Talboden mindestens 50 m bei einem Hangwind und 250 m bei einem Bergwind betragen [34].

Ausbildung bedeutsamer Strömungen

2.1.4.2 Kaltluftproduktionsrate unterschiedlicher Oberflächen

Obwohl die Prozesse weitreichend beobachtet und erforscht sind, herrscht immer noch Unklarheit über die genauen Einflussmechanismen auf die nächtliche Kaltluftproduktion. Insbesondere bezüglich der Frage nach der Kaltluftproduktionsrate unterschiedlicher Oberflächen ist sich die Fachliteratur uneinig [21], [37], [48], [49]. Auch der Entwurf der überarbeiteten und die aktuelle deutsche VDI-Norm beschreiben die Literatur zu dieser Thematik als «spärlich» und weisen explizit auf das unzureichende Wissen zur Kaltluftentstehung innerhalb unterschiedlicher Waldtypen hin [21], [37]. Neben der Ausstrahlung einer Oberfläche, welche mehrheitlich durch die Landnutzung bestimmt ist, spielt auch die Hangneigung, die Exposition des Hanges, die Hanglänge, die Dauer der Ausstrahlung, die Bodenrauigkeit, die Grösse des Einzugsgebiets, die thermische Schichtung der Atmosphäre, die Blattdichte der Bäume usw. eine Rolle [31], [35], [43]-[45].

Prozesse im Detail noch immer mit vielen Ungewissen

Ungeachtet der vielen Einflussfaktoren auf die Kaltluftproduktionsrate sind bevorzugte Kaltluftentstehungsgebiete unbebaute Flächen mit einer geringen Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität der Oberflächen. Diese setzt sich zusammen aus dem Substrat sowie der Oberflächenbedeckung, die meist aus pflanzlichem Bewuchs besteht. Der Einfluss der Vegetation ist abhängig von ihrem Flächenanteil an der Gesamtfläche sowie von der Art des Bestandsaufbaus (z.B. Wiesen-, Kraut-, Strauch- oder Baumvegetation). Auch die Bodenart und die Bodenbearbeitung, insbesondere die Auflockerung und Verdichtung, können einen Einfluss auf die Kaltluftproduktion haben. Dichte Böden leiten die Wärme besser und sind schlechtere Kaltluftproduzenten als Böden mit geringerer Dichte und geringerer Wärmeleitfähigkeit. Die Schwankungen im Bodenwassergehalt sowie im Bewuchs des Bodens führen zudem dazu, dass die Kaltluftproduktionsrate wiederum mit grossen Unsicherheiten behaftet ist. Aufgrund der Verdunstungsleistung am Tag sind auch feuchte Böden Kaltluftbildner [37]. Auch auf Ackerflächen kann sich die Ausgangslage ändern. Wenn nämlich z.B. ackerbaulich genutzte Flächen durch Pflügen aufgelockert werden, steigt das Porenvolumen des Bodens (der Luftgehalt des Bodens erhöht sich), und an der Oberfläche wird unter Umständen mehr Kaltluft produziert [53].

Einfluss Oberflächenbeschaffenheit

Bei vegetationsbedecktem Boden erfolgt die Ausstrahlung hauptsächlich von den Blättern des Bewuchses, wobei der Wärmetausch mit der Atmosphäre bei einer insgesamt grossen Blattfläche in Verbindung mit ihrer geringen Wärmekapazität besonders effektiv ist. Wiesen, Weide- und Ackerland erweisen sich deshalb als gute Kaltluftproduzenten [40], [54].

Ausstrahlung von den Blättern

Bei Waldgebieten sind die Verhältnisse etwas komplizierter, weil die Ausstrahlung - und damit die primäre Abkühlung - nicht aus der unmittelbaren Bodennähe, sondern hauptsächlich aus dem oberen Kronenbereich der Bäume erfolgt. In der Regel sind die oberen 30% des Kronenraums am Kaltluftgeschehen beteiligt [6]. Die dort produzierte Kaltluft sinkt ab und vermischt sich mit der wärmeren Luft des Stammraumes. Die am Boden messbare Abkühlung der Atmosphäre ist aufgrund dieser Durchmischung, jedenfalls bei geschlossenem Bestand, im Wald zumeist geringer als über vegetationsbedeckten Freiflächen [8].

Komplex für Waldgebiete

Daher wird generell auch davon ausgegangen, dass die Kaltluftströme, welche über Freiflächen entstehen, tiefere Temperaturen aufweisen als die Kaltluftströme von Wäldern [15], [37], [49], [51], [54], [55]. In der Agrarmeteorologie gelten z.B. auch Täler, deren Hänge bewaldet sind, als weniger frostgefährdet [7], [37].

Auskühlung auf Freiflächen grösser als in Wäldern

Mehrere Studien beschreiben auch, dass bewaldete Hänge, insbesondere auf stark geneigten Flächen, ein grösseres Kaltluftvolumen produzieren als Hänge mit niedriger Vegetation. Die Kaltluft ist dadurch weniger kühl als über der Freifläche, das Volumen jedoch grösser [8], [17], [37], [53]. Dies lässt sich dadurch erklären, da der gesamte Bestand am Prozess beteiligt ist [17], [29].

Kaltluftproduktionsrate

Weiter lässt sich diese Vermutung auch mit der Energiebilanz erklären. Satellitenbilder zeigen, dass die Oberflächentemperatur von grossen Wäldern in Hanglage in klaren Nächten deutlich höher ist als diejenige von Wäldern in Flachlagen oder von unbewaldeten Hügeln. Dies führt dazu, dass die langwellige Strahlungsbilanz deutlich negativer ist. Die Oberfläche verliert damit mehr Energie. Die einzige Komponente der Energiebilanz, welche diesen Verlust effektiv ausgleichen kann, ist der sensible Wärmestrom, sprich die Abkühlung der Luft (s. auch Kapitel 2.1.1.2) [8], [9]. Der Temperaturunterschied zwischen der Kronenoberfläche und der Luft ist jedoch geringer als zwischen der Luft und grasbedeckten Hängen, daher ist auch die Kühlrate geringer. Um trotzdem grosse Mengen an Energie aus der Luft zu absorbieren, muss ein grösseres Volumen, d.h. ein Teil des Kronenraums, in den Prozess involviert sein [8], [37]. Bei einer geringen Abkühlung eines grossen Luftvolumens kann der gleiche Betrag fühlbarer Wärme umgesetzt werden wie bei einer starken Abkühlung eines wesentlich geringeren Volumens [9].

Erklärung über Energiebilanz

Demgegenüber gibt es einige Studien, welche den offenen Freiflächen neben der stärkeren Auskühlung auch eine höhere Kaltluftproduktionsrate attestieren [15], [29], [49], [51], [55]. Insbesondere bei windschwachen Wetterlagen soll diese ausgeprägt sein [15]. Die Studien berufen sich meist auf Simulationsresultate, welche jedoch bereits bei der Parametrisierung Unsicherheiten aufweisen. Bezüglich dem Verständnis der Prozesse ergeben sich noch immer viele Ungewissheiten [46]. Eine einfache Parametrisierung scheint nicht angemessen, da die Einflussfaktoren und die Zusammenhänge zu multivariant sind.

Uneinige Studien aufgrund unangemessener Parametrisierung

Ein entscheidender Faktor für die Kaltluftproduktion ist auch die Ausbildung einer stabilen bodennahen Strömung. Bei windstarken Bedingungen ist diese eingeschränkt resp. findet nicht statt, womit auch der Kaltluftabfluss nicht zustande kommt. Da in Wäldern das Kaltluftgeschehen von der darüberliegenden Luftschicht abgeschirmt ist, sollte in Wäldern häufiger Kaltluftabfluss stattfinden [22], [41], [56]. So wurden in Wäldern auch noch Kaltluftabflüsse gefunden, wenn der übergeordnete Wind deutlich über den eigentlich definierten Grenzwerten von $1.5\text{--}2.5\text{ m s}^{-1}$ lag [22], [51]. Die abschirmende Wirkung von Wäldern wurde bei Windgeschwindigkeiten bis 5 m s^{-1} festgestellt, obwohl sie bei tiefen Windgeschwindigkeiten am effektivsten ist [56].

Wälder können Häufigkeit von Kaltluftabfluss erhöhen

Einige Studien schreiben der Landnutzung auch eine untergeordnete Rolle zu, insbesondere in sehr steilem Gelände [44], [52]. So kann die Kaltluftproduktion eines steilen bewaldeten Hanges unter Umständen viel grösser sein als diejenige einer nur wenig geneigten Wiese [57].

Topografie möglicherweise wichtiger als Landnutzung

2.1.4.3 Kennzahlen zur Kaltluftproduktion

Die Bestimmung der Kaltluftproduktionsrate ist anspruchsvoll. Direkte Messungen vor Ort sind nicht möglich, da produzierte Kaltluft eine relative Grösse ist. Bei integralen Messungen über eine grössere Fläche, z.B. am Fuss eines Hanges, müssten engmaschig Profile der Windgeschwindigkeit erfasst werden. Selbst dann ist es praktisch unmöglich, den reinen lokalen Kaltluftabfluss vom grössräumigeren Wind eindeutig zu unterscheiden [29]. Zur Abschätzung der Kaltluftproduktion wird daher oftmals am Talausgang von markanten Windsystemen der gebündelte Fluss gemessen und über das erwartete Einzugsgebiet geteilt [8]. Dieses Vorgehen führt dazu, dass die ermittelten Produktionsraten aus einem komplexen Zusammenwirken verschiedener Einflussgrössen bestehen und sich dadurch in der Regel keine eindeutige Abhängigkeit feststellen lässt. Ausserdem sind so auch Fehleinschätzungen aufgrund von Abgrenzungsproblemen zu erwarten [37].

Messungen Kaltluftvolumenstrom schwierig

Geht es um die Quantifizierung und Vergleichbarkeit von Einflussfaktoren auf die Kaltluftproduktion, ergeben sich weitere Schwierigkeiten. Die Vergleichbarkeit von Messresultaten unterschiedlicher empirischer Studien ist dabei starken Unsicherheiten unterworfen. Es gibt kaum an einem Ort der Welt zwei exakt vergleichbare Einzugsgebiete mit unterschiedlicher Landnutzung, um die oben beschriebenen Messverfahren testen zu können. Ausserdem sind auch die meteorologischen Bedingungen kaum mit der nötigen Exaktheit vergleichbar. Zudem können aufgrund der Dimensionen der dem Prozess zugrundeliegenden Faktoren keine einfache Versuchsabläufe hergestellt werden. Dies führt dazu, dass einerseits die empirisch bestimmten Produktionsraten stark variieren und gleichermassen die Grundlagen für die Parametrisierung von Modellen, welche wiederum zu Rate gezogen werden, unklar sind [8], [55].

Vergleichbarkeit schwierig

Die Bandbreite innerhalb der Literatur übersteigt dabei auch die Schwankung der einzelnen Werte (Tabelle 4). Für gemischte Landnutzungen wurden Kaltluftproduktionsraten von $6\text{--}36\text{ m}^3\text{ m}^{-2}\text{ h}^{-1}$ gefunden. Freilandflächen oder entwaldete Gebiete schwanken gemäss Literatur zwischen $8\text{ und }25\text{ m}^3\text{ m}^{-2}\text{ h}^{-1}$. Ackerland, welches je nach Zustand (z.B. dicht oder direkt nach Pflügen) ganz unterschiedliche thermische Eigenschaften haben kann, wird eine Kaltluftproduktionsrate von $10\text{--}16\text{ m}^3\text{ m}^{-2}\text{ h}^{-1}$ zugeschrieben. Für Wälder sind die Schwankungen innerhalb der Literatur am deutlichsten. Zudem handelt es sich bei den meisten Werten um Modellabschätzungen. Die Minderheit beruht auf Messungen. Je nach Quelle beträgt die Kaltluftproduktionsrate von Wäldern $4\text{--}54\text{ m}^3\text{ m}^{-2}\text{ h}^{-1}$.

Starke Schwankungen

Ein interessanter Ansatz wurde von Thamm (2000) im Rahmen seiner Dissertation entwickelt. Er berechnete die Kaltluftproduktion eines Einzugsgebiets auf Basis der nächtlichen Strahlungsbilanz und von einfachen physikalischen Gesetzmässigkeiten. Er fand mit $36\text{ m}^3\text{ m}^{-2}\text{ h}^{-1}$ für das Zartener Becken (östlich von Freiburg im Breisgau) plausible Werte [9]. Der Vorteil dieser Energiebilanzmethode ist, dass sie ohne Parametrisierung unterschiedlicher Oberflächen auskommt.

Berechnung über Energiebilanz

Tabelle 4: Zusammenfassung der Kaltluftproduktionsraten gemäss Literatur.

Flächennutzung	Kaltluftproduktionsrate [m ³ m ⁻² h ⁻¹]	Lokalität	Volumenstrom [m ³ m ⁻¹ s ⁻¹]	Bestimmung	Quelle	Zitiert in
gemischt, unbebaut	15	Rohrackerthal		Messung, Hochrechnung	[43]	[37]
gemischt, unbebaut	13 14			unklar	[43]	[44]
gemischt, unbebaut	14	Würzenbachtal	38'000	Messung, Hochrechnung	[58]	[37]
Gemischt	13	Dreisamtal		modelliert	[59]	[37]
gemischt, z.T. bebaut	6	Pfinztal		Messung, Hochrechnung	Heldt 1984*	[37]
gemischt, z.T. bebaut	10	Michelbachtal	30'000	Messung, Hochrechnung	[60]	[37]
Gemischt	36	Zartener Becken		Berechnet	[9]	
verschiedene Nutzung	4 - 33	Kronsberg		Messung, Hochrechnung	Hergert et al. 1993*	[37]
gemischt, unbebaut, 50% bewaldet	32	Beierbachtal	23'000	Messung, Hochrechnung	[61]	[9]
entwaldet	11	Dreisamtal		modelliert	[59]	[37]
waldfrei	25	Finkenbachtal		modelliert	[8]	
offene Flächen, Wiese, waldfrei	12	Eifeltäler		Messung, Hochrechnung	[9]	[9]
Wiese	20			Parametrisierung Modell	[57]	
Freiland	10 - 20			Parametrisierung Modell	[62]	
Freiland	~10			Literatur, Schätzung	[63]	
Freiland	8 - 14			Literatur	[44]	
Ackerland	16	Dreisamtal		modelliert	[59]	[37]
Ackerland	16			Berechnung	[64]	[53]
Ackerland	10-15			Parametrisierung Modell	[57]	
Wald	4 - 8			Literatur	[44]	
Wald	43	Finkenbachtal		modelliert	[8]	
Wald	54	Freiburg Umgebung		Messung, Hochrechnung	[65]	[9]
Wald	5 - 40			Parametrisierung Modell	[62]	
Wald	15			Parametrisierung Modell	[57]	
Stadt	0			Abschätzung	[62]	
Siedlungsraum	1			Parametrisierung Modell	[57]	
Wasser	0			Abschätzung	[62]	

* Primärquelle nicht auffindbar

Bezüglich der *Untertemperatur* der Kaltluftströmung werden unterschiedliche Werte genannt, wobei die Differenzen im Vergleich zur Umgebungsluft in der Regel im Bereich von 2-4 °C liegen [19], [41], [42], [66], [51], [53]-[55]. Bodennah können die Differenzen im Vergleich zu Luftschichten über dem Kaltluftstrom bei sonst windstillen Bedingungen auch 7-8 °C betragen [41]. Bei sehr mächtigen Kaltluftströmen wurden im Vergleich zum überwärmten Stadtgebiet bis zu 8 °C tiefere Temperaturen im Kaltluftstrom gemessen [68].

Temperatur der Kaltluftströmung

Bezogen auf die Abhängigkeit der sich einstellenden Untertemperaturen sowie des produzierten Kaltluftvolumens von der Landnutzung besteht jedoch nach wie vor Forschungsbedarf [21].

Bestehender Forschungsbedarf

2.1.4.4 Einflussfaktoren auf Kaltluftproduktionsrate von Wäldern

Wie in Kapitel 2.1.4.3 beschrieben ist, mangelt es an exakten Angaben über die vom Flächennutzungstyp abhängige Kaltluftentstehung. Hierzu zählt insbesondere das vielfach noch unzureichende Wissen über die Kaltluftentstehung unterschiedlicher Waldtypen (z.B. Nadelwald vs. Laubwald). Entsprechend ist es schwierig, den Einfluss des Waldmanagements zu quantifizieren [21], [37]. Um quantitative Aussagen treffen zu können, wären mehrere Messtürme in ähnlicher Umgebung mit unterschiedlicher Landnutzung nötig [6]. Aufgrund der wenigen Beobachtungsstudien kann über die Muster und die Einflüsse von Dichte oder Struktur der Wälder daher nur spekuliert werden [69].

Einfluss des Waldmanagements in Literatur nicht untersucht

Geht man z.B. davon aus, dass der Volumenfluss unter anderem mit der Höhe der Vegetation zunimmt, wäre ein Waldbestand mit hohen Bäumen für die Produktion eines grossen Kaltluftvolumenstroms von Vorteil [53].

Hohe Vegetation könnte grösseres Kaltluftvolumen erzeugen

Ein ausreichend dichtes Kronendach dürfte die Häufigkeit von Kaltluftabflüssen erhöhen, da dadurch auch bei stärkerem Wind Kaltluftabfluss stattfinden kann (Kapitel 2.1.4.1). Es gibt jedoch auch Hinweise, dass auch ein wenig dichtes Kronendach die bodennahen Windflüsse vor zu starken Turbulenzen schützt [56]. In tropischen Klimaregionen wurde zudem festgestellt, dass bei sehr dichtem Bewuchs nur sehr wenig Kaltluft in den Vegetationsbestand einfliesst und der Abfluss der Kaltluft deshalb an der Bestandsoberfläche stattfindet [37].

Kronendach kann Häufigkeit von Kaltluftabfluss erhöhen

Neben der Kaltluftproduktion ist vor allem auch der Einfluss des Bestands auf die Strömungscharakteristika entscheidend. Je dichter die Vegetation ist, desto komplexer ist die Strömung [5]. In der Nacht werden die höchsten Windgeschwindigkeiten in der untersten Ebene beobachtet, wo der Kaltluftabfluss am effektivsten ist [19]. Hier ist auch der Einfluss des Unterholzes am grössten. Daher kann ein dichter Bewuchs am Waldboden die Kaltluftdynamik hemmen [67]. Zudem ist die Durchmischung der Kaltluft mit der warmen Luft im Stammraum grösser, je höher die Rauigkeit ist. Je mehr Hinderniswirkung im Stammraum vorhanden ist, desto geringer ist somit die Wirkung der Kaltluft [41]. Der Reibungswiderstand des Bestands bestimmt die Flüsse im Stammraum stärker als die Dichte des Bestands. Ein freier Stammraum ist daher wichtiger für die nächtlichen Kaltluftflüsse als die Dichte des Kronendachs [3], [4], [67].

Rauigkeit im Bestand entscheidend

Beim Übergang von einem dichten über einen lichten Wald bis hin zu Einzelbäumen kann generell davon ausgegangen werden, dass sich die Strömungscharakteristika einigermassen linear verändern. Ab einem gewissen Punkt wird die Bestandsschicht dünn genug, sodass sich das Windprofil deutlich von demjenigen eines dichten Waldes unterscheidet und die Turbulenz eine Überlagerung der Wellen einzelner isolierter Pflanzen darstellt [6].

Übergang Wald zu Einzelbaum

Wie bereits beschrieben wurde, findet in dichten Wäldern erwartungsgemäss nachts eine schwächere Auskühlung statt als in weniger dichten Wäldern [49], [56]. Bei weniger dichten Wäldern kann davon ausgegangen werden, dass die Eigenschaften bezüglich nächtlicher Kaltluftproduktion und Lufttemperatur aus dem Mittel der Werte eines bewaldeten und eines unbewaldeten Standorts abgeschätzt werden können [69].

Dichte und Auskühlung

Die Kaltluftproduktion von Wäldern ist auch von der topografischen Lage abhängig [29], [37], [70]. Bei Beständen, die in einer Ebene liegen, sinkt die im Kronendach abgekühlte Luft in den Stammraum ab, stagniert dort oder fliesst aus dem Bestand heraus [70]. Wälder in Flachlagen (ca. $<1^\circ$) sind sehr viel weniger effektive Kaltluftproduzenten, da die Luft im Stammraum aufgrund der fehlenden topografischen Komponente weniger entweicht [40], [54], [57]. Bei Wäldern in Kamm- oder Hanglage wird die in Bodennähe aus dem Stammraum ausfliessende Kaltluft durch warme Umgebungsluft ersetzt, die von oben in den Bestand einfliesst und aufgrund der Auskühlung des Kronenraums abkühlt. Wegen der höheren Geschwindigkeit und des damit verbundenen schnelleren Nachfliessens relativ warmer Luft aus der Höhe und wegen der Durchmischung im Stammraum ist die bodennah austretende Luft in der Regel jedoch nicht so kalt wie diejenige eines Waldes in ebener Lage [37].

Kaltluftproduktion von topografischer Lage abhängig

2.1.4.5 Einfluss auf Ausbreitung von Kaltluftströmen

Die Landnutzung zwischen Kaltluftentstehungsgebiet und Kaltlufteinwirkungsbereich beeinflusst die Ausbreitung von Kaltluftströmen entsprechend der Rauigkeit. Rauigkeitsarme Strukturen wie Gewässer oder niedriger Bewuchs fördern den effektiven Transport von Luftmassen. Gute Landnutzungsarten für *Kaltluftschneisen* sind Grünflächen, Sportanlagen oder landwirtschaftliche Nutzflächen [30]. Einzelne Bäume können bereits für unerwünschte Verwirbelungen sorgen, welche die Kaltluftströmung negativ beeinflussen. Diese sind jedoch nicht per se markante Hindernisse. Gerade bei tiefen Windgeschwindigkeiten kann der Wind relativ gut um die Blätter und Äste herum zirkulieren. Abhängig ist dies jedoch auch von der Art der Bäume: Ein Spitzahorn (*Acer platanoides*) hat z.B. einen Blättermantel mit annähernd laubfreier innerer Baumkrone, welche der Wind gut passieren kann. Eine Sommerlinde (*Tilia platyphyllos*) mit haarigen Blättern und dichter Kronenstruktur kann eine stärkere Hinderniswirkung auf den Wind ausüben [71]. Wälder stellen ausgeprägtere Hindernisse dar und sind für einen effektiven Kaltlufttransport hinderlich. Je dichter und höher der Wald, desto grösser seine Rauigkeit und desto stärker seine Hinderniswirkung. Wälder können aber auch dazu dienen, Strömungen gezielt umzulenken (Abbildung 11).

Landnutzung zwischen Entstehungsgebiet und Einwirkungsbereich

Da Kaltluftströme in der Regel auch Frischluftströme sind, sollte vermieden werden, dass in bestehenden wichtigen Kaltluftschneisen emissionsreiche Betriebe (Luftschadstoffe, Geruch) angesiedelt werden. Kaltluftströme, welche sich auf emissionsarmen Strukturen (keine Strassen oder Industriegebiete) ausbreiten können, können lokal auch die Luftqualität entscheidend verbessern [30]. Hierzu gehören in der Regel auch Wälder.

Emissionen in Kaltluftleitbahnen

Bei längerem Überströmen von warmen Siedlungsgebieten oder grösseren Gewässern kann sich die Luft innerhalb des Kaltluftstroms, insbesondere in den bodennahen Schichten, erwärmen. Die Erwärmungsrate ist dabei abhängig von der zurückgelegten Wegstrecke, den thermischen Eigenschaften der zugrundeliegenden Oberfläche und der Turbulenz innerhalb der Windströmung [37]. Letztere ist wiederum abhängig von der Rauigkeit der überströmten Fläche. Auch innerhalb des Stadtgefüges nimmt die Kühlwirkung der herangeführten Kaltluft mit zunehmender Einwirktiefe aufgrund von Mischvorgängen und möglichen Hebungsvorgängen ab [72].

Erwärmen der Kaltluftströmung

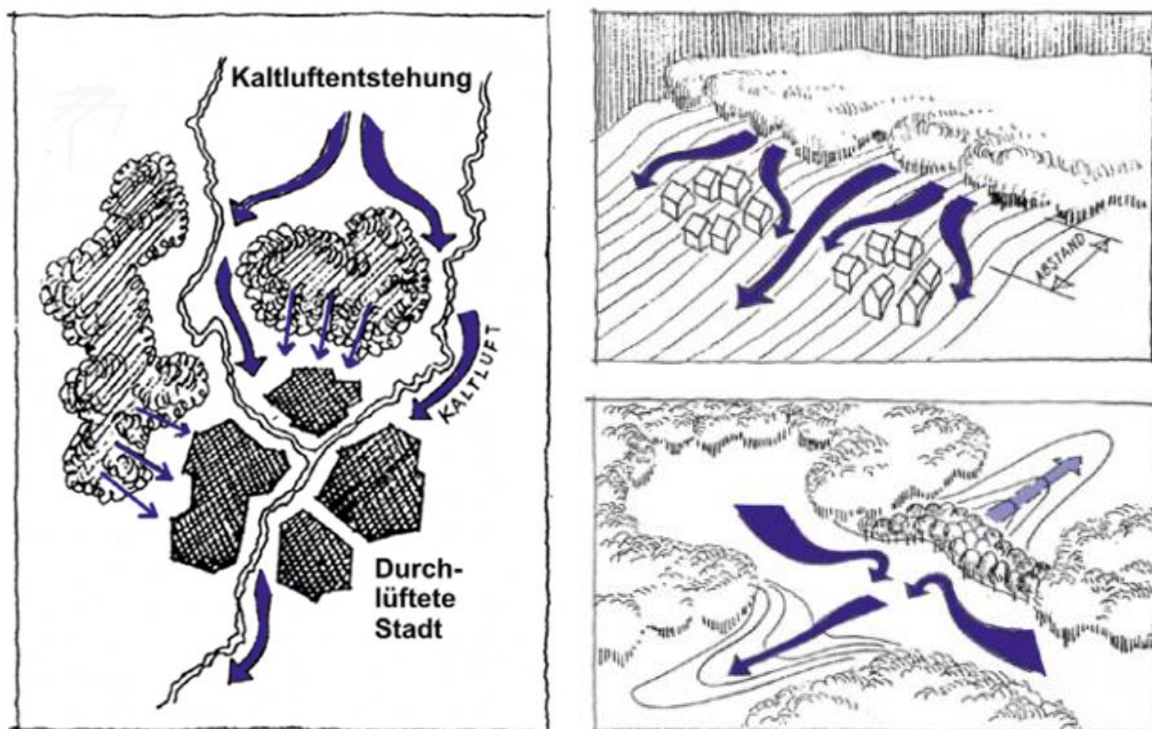


Abbildung 11: Beispiel einer gut durchlüfteten Stadt mit Kaltluftschneisen und Kaltluftabflüssen (links), Massnahme zum Abstand zwischen Wald und Hangbebauung (oben rechts) und Wald als Hindernis zur gezielten Umlenkung (unten rechts) [38].

2.1.4.6 Einwirkbereich der Kaltluftströme

Das Bemessen der Einwirktiefe in den Siedlungsraum kann nicht mit Temperaturmessungen alleine bewerkstelligt werden. Oftmals werden dafür Tracer eingesetzt (z.B. SF₆), um den Ursprung der kühlen Luftströmung nachvollziehen zu können [46], [66]-[71]. Auch Isotopen-Analysen wurden bereits zur Beobachtung von Kaltluftströmen vorgeschlagen, die Methodik ist jedoch noch nicht weit genug ausgereift, um Kaltluftströme effektiv abgrenzen zu können [17]. Eindeutige Zahlen zum Einwirkbereich von Kaltluftströmen in Siedlungen liegen wenige vor. Schwierig ist dabei auch die Abgrenzung von Entstehungs-, Ausbreitungs- und Einwirkgebiet. Ausserdem ist die exakte Quelle der Kaltluft nicht immer eindeutig zuzuweisen. Oftmals erfolgt der effektivste Transport in den Siedlungskörper über Flüsse oder breite Strassen [75], [78]. Ob diese Transportachsen zum Einwirkbereich dazuzählen oder erst ab dem Flussufer resp. dem Trottoir der Hauptverkehrsachse gezählt werden soll, ist nicht definiert. Je nach Definition kann die resultierende Einwirktiefe stark unterschiedlich sein [37], [75], [79].

Messen mit Tracer

Die Einwirktiefe von Kaltluft in bebautes Gebiet ist wesentlich von der Bebauungsausdehnung und -dichte sowie zu einem gewissen Grad von der herangeführten Kaltluftmenge abhängig. Kleinere Siedlungen haben nur einen geringen Einfluss auf stark ausgeprägte Kaltluftströmungen, sowohl was das Fließverhalten als auch die Erwärmung anbelangt. Bei grösseren Siedlungsgebieten dagegen wird die Kaltluft sowohl dynamisch als auch thermisch grossflächig beeinflusst [37], [76]. Dieser Prozess geschieht fliessend und mit zunehmender Einwirktiefe und dem Erwärmen an der warmen Bebauung sowie dem Mischen mit der Bestandsluft, der sogenannten «Alterung der Kaltluft», geht die ursprüngliche Charakteristik der Kaltluft zunehmend verloren [21]. Ab einer gewissen Distanz zur Quelle und bei höher werdender Dichte einer Stadt (z.B. Richtung Stadtzentrum) kann die Kaltluft auch eine Anhebung erfahren und sich über den Dächern weiter verbreiten, ohne sich noch markant in den Strassenraum zu mischen. Der Einwirkbereich wäre somit nicht mehr von dem Nachschub, sondern von der Landnutzung innerhalb der Stadt abhängig [76].

Abhängigkeit Einwirktiefe

Weber und Kuttler (2003, 2004) haben mittels Tracer eine Einwirktiefe von 900 m bis 1.6 km in städtisches Gebiet gefunden [72], [75]. Die unterschiedlichen Einwirkbereiche wurden dabei in zwei Nächten in verschiedene Richtungen bestimmt. Das Einwirken der Kaltluftströmung erfolgte über einen Güterbahnhof [72], [75]. Gross (1996) hat ebenfalls einen Einwirkbereich von 1.5 km gefunden [57], [80]. Auch bei anderen Untersuchungen liegt der Einwirkbereich bei 500 m bis 1 km [76]. Der Entwurf zur überarbeiteten VDI-Norm beschreibt ebenfalls eine typische Einwirktiefe von einigen Dekametern bis mehreren Hektometern [21].

Grössenordnung

2.1.4.7 Kühlwirkung der nächtlichen Kaltluft

Menschen empfinden die thermischen Umgebungsbedingungen als umso kühler, je mehr die Lufttemperatur abnimmt und die Windgeschwindigkeit ansteigt. Diese qualitative Wahrnehmung lässt sich über Modellrechnungen und thermische Indizes quantifizieren (z.B. PET, s. auch Kapitel 2.1.1.3). Bei gleichbleibender Lufttemperatur und auch sonst gleichbleibenden Bedingungen sinkt die PET um 1 °C, wenn

- die Lufttemperatur um 0.9 °C abnimmt oder
- bei schwachen Windgeschwindigkeiten von unter 1.0 m s⁻¹ die Windgeschwindigkeit um 0.9 m s⁻¹ bzw. bei höheren Windgeschwindigkeiten um 1.3 m s⁻¹ ansteigt.

**Beeinflussung Wärmeempfinden
in der Nacht**

Veranschaulicht man sich diese Zahlen anhand eines Beispiels, wird die Bedeutung der Lufttemperatur in der Nacht für das Human-Bioklima deutlich. Die *Untertemperatur* der Kaltluftströmung weist eine Differenz zur Temperatur der Umgebungsluft von ca. 2-4 °C auf (Kapitel 2.1.4.3). Um die gleiche gefühlte Wirkung wie eine Abkühlung der Lufttemperatur von 2 °C zu erzeugen, müsste die Windgeschwindigkeit um mindestens 2 m s⁻¹ zunehmen. Ein mittlerer Kaltluftstrom weist jedoch meist eine Windgeschwindigkeit von ca. 1 m s⁻¹ auf (Kapitel 2.1.3.3). Daraus folgt, dass bei nächtlichen Kaltluftströmen die Lufttemperatur der entscheidende meteorologische Parameter bei der human-bioklimatischen Auswirkung von Kaltluft ist (solange diese im Stadtgefüge noch nicht zu stark erwärmt ist) [37].

Beispielrechnung

Primäres Ziel der Kaltluftversorgung im Siedlungsgebiet ist jedoch das Abkühlen aufgewärmter Wohngebäude zur Verbesserung der Schlafqualität im Sommer und die Verbesserung des Innenraumklimas im Allgemeinen [21]. Vergleiche mit der PET und der Tagsituation sind, auch in Anbetracht der unterschiedlichen Exposition und Wahrnehmung, nur bedingt sinnvoll. Zudem sind bezüglich der Auswirkung auf Individuen auch Faktoren wie Gebäudealter oder Zugang zur Frischluft von Relevanz. Der Bewegung der Luftmassen zur Durchlüftung der Wohngebäude kommt daher im Siedlungsgebiet eine ähnlich grosse Bedeutung zu. Beide Faktoren (Temperatur und Wind) tragen daher zum thermischen Wohlbefinden bei [37].

Abkühlung Wohngebäude

2.2 Diskussion Kühlwirkungsmechanismen gemäss Literaturstudie

2.2.1 Mechanismen am Tag

Der entscheidende Kühlwirkungsmechanismus am Tag ist in der Regel die Wirkung des Waldes als Entlastungsraum. Die tagsüber niedrigeren Temperaturen innerhalb des Waldes sowie die starke Beschattung bieten Naherholung für die Bevölkerung. Gerade bei dichten, lichtundurchlässigen Kronendächern ist das Waldklima am angenehmsten und der Hitzestress am stärksten reduziert (Kapitel 2.1.2.2). Um die Kühlwirkung zu beurteilen, müssen die Dichte des Kronendachs und die Erreichbarkeit beziehungsweise die Entfernung des Waldes betrachtet werden.

Wichtige Naherholungsfunktion

Grossräumige Windzirkulationen, welche die kühle Luft aus dem Waldbestand in den Siedlungsraum befördern, können nicht erwartet werden (Kapitel 2.1.3.2 und 2.1.3.3). Hauptgrund dafür ist, dass im Gegensatz zur Nachtsituation am Tag kein Abkühlen des Kronenraums relativ zum Stammraum stattfindet und dadurch keine kühle Luft in den Stammraum absinkt. Abkühlung im physikalischen Sinne findet statt, wenn die Energiebilanz einer Oberfläche negativ ist (Kapitel 2.1.1.1). Aufgrund des grossen solaren Eintrags tagsüber ist dies im Bereich der Baumkrone nicht der Fall. Tendenziell wäre eher ein thermisches Aufsteigen der Luft über den Wäldern zu erwarten. Zudem sind im Kanton Aargau topografisch beeinflusste Windsysteme wie Berg-Tal-Winde dominierend, welche die thermischen Zirkulationssysteme überprägen.

Keine grossräumigen Zirkulationssysteme

Kleinräumig könnten im Bereich des Waldrandes schwache Ausgleichsströmungen entstehen. Diese sind jedoch kaum erforscht oder beschrieben und hätten auch nur einen geringen, wenig weitreichenden Einfluss auf das Siedlungsgebiet. An steilen bewaldeten Nordhängen könnte auch am Tag ein mässiger Kaltluftabfluss stattfinden, sofern diese verschattet sind. Auch frühmorgens kann aus einem schattigen Osthang noch länger Kaltluft abfliessen. Im Gegensatz zu den markanten Kaltluftabflüssen in der Nacht dürfte deren Einflussbereich jedoch gering sein, da in besonnten Gebieten wiederum bodennahe Erwärmung und konvektive Prozesse überhandnehmen. Südexponierte Waldränder sind hingegen tagsüber durch stärkere Einstrahlung thermisch sehr unkomfortabel (Kapitel 2.1.2.3).

Vereinzelt kleinräumige Strömungen möglich

Durch übergeordnete Winde, welche die kühlere Waldluft in Richtung Stadtgebiet befördern, könnte ein grösserer Einfluss des Waldes auf das Siedlungsgebiet am Tag erreicht werden. Solche Phänomene sind jedoch kaum beschrieben (Kapitel 2.1.3.2).

Erzwungene Waldströmungen

In der Literatur gibt es Einigkeit, dass es am Tag - gerade in topografisch geprägten Gebieten - keine übergeordneten Windströmungen von Wäldern in den Siedlungsraum gibt. Unsicherheiten bestehen noch bezüglich kleinräumiger Strömungen im Waldrandbereich. Generell kann jedoch davon ausgegangen werden, dass wenn ein Phänomen kaum beschrieben und untersucht ist, es auch wenig stark ausgeprägt ist. Erzwungene Strömungen aus dem Wald durch übergeordnete Windsysteme sind derweil kaum erforscht und sehr ungewiss.

Unsicherheiten Strömung Waldrandbereich

Es besteht ein indirekter Kühlungseffekt in der Beteiligung des Waldes bei der Wolkenbildung (Kapitel 2.1.2.4). Da die Wolkenbildung jedoch von vielerlei atmosphärischen Bedingungen abhängig ist, kann keine klare Tendenz zur Wolkenbedeckung bei kleineren Waldstücken abgeleitet werden. Die Forschung vermutet jedoch, dass Wälder gerade an den Orten, wo Ausgangsstoffe wie Salz oder Staub für Kondensationskeime fehlen, die biogenen Stoffe der Wälder einen wichtigen Beitrag leisten können.

Indirekte Kühlung durch Wolken

Die entscheidende Wirkung des Waldes am Tag ist seine Funktion als Entlastungsraum. Einen positiven Einfluss auf die nähere Umgebung ausserhalb des Waldes kann maximal durch übergeordnete Winde erzwungen werden. Eine systematische Strömung aus dem Wald in das angrenzende Siedlungsgebiet, vergleichbar zu den Kaltluftströmen in der Nacht, kann nicht erwartet werden. Höchstens im Bereich von bewaldeten Schattenhängen könnte auch am Tag Kaltluftabfluss stattfinden.

Fazit

2.2.2 Mechanismen in der Nacht

Die nächtliche Kaltluftproduktion ist ein viel beschriebenes und deutlich ausgeprägtes Phänomen. Unklar ist jedoch die Rolle des Waldes diesbezüglich. Grundsätzlich produzieren alle unbebauten Flächen unter klaren und wind-schwachen Bedingungen Kaltluft, welche entlang dem Gefälle abfließt. Die Kühlrate, die entstehenden Windgeschwindigkeiten sowie die Kaltluftproduktionsrate sind jedoch von vielen Faktoren abhängig (Kapitel 2.1.4.1).

Rolle des Waldes unklar

Ein wichtiger Faktor für die Auskühlung ist die Landnutzung. Generell wird davon ausgegangen, dass unbewaldete Freiflächen kühlere Luft produzieren als Wälder. Zudem führt der grössere Reibungswiderstand der Wälder auch dazu, dass die Luft in der Regel aus dem Wald mit geringeren Geschwindigkeiten abfließen kann im Vergleich zu einer Freifläche (Kapitel 2.1.4.2). Bezüglich der Kaltluftproduktionsrate, also dem produzierten Volumen an Kaltluft pro Quadratmeter, ist sich die Literatur uneinig. Die Kaltluftproduktionsraten von Wäldern schwanken dabei von deutlich grösser bis leicht geringer als von Freiflächen. Realistische Werte liegen dabei zwischen $5 \text{ m}^3 \text{ m}^{-1} \text{ s}^{-1}$ für eher flache Wälder bis $40 \text{ m}^3 \text{ m}^{-1} \text{ s}^{-1}$ für steile Wälder (Kapitel 2.1.4.3).

Freifläche kühlt stärker aus, Wald produziert tendenziell grösseres Volumen

Zum Teil wird auch davon ausgegangen, dass die Hangneigung eine grössere Bedeutung hat als die Landnutzung, und dass die Kaltluftproduktionsrate somit generell schwankt, aber vor allem durch den Neigungswinkel der Produktionsfläche gesteuert wird. Auf den Wald bezogen ist klar, dass insbesondere Wälder in Hanglage eine deutlich wichtigere Rolle für die Kaltluftproduktion spielen als Wälder in der Ebene. Hierbei scheint zu gelten: Je steiler die Hanglage ist, desto effektiver ist die Kaltluftproduktion (Kapitel 2.1.4.4).

Hangneigung unter Umständen entscheidender Faktor

Für die Entstehung von Kaltluftabflüssen sollten möglichst windstille Bedingungen vorherrschen, damit sich die bodennah auskühlenden Luftschichten nicht zu stark mit den darüberliegenden wärmeren Luftschichten vermischen (Kapitel 2.1.4.1). Aufgrund der abschirmenden Wirkung des Kronenraums von Wäldern kann davon ausgegangen werden, dass in einem Waldbestand verglichen mit dem Freiland auch bei höheren Windgeschwindigkeiten noch Kaltluftabfluss stattfindet. Dadurch erhöhen Wälder die Frequenz von Kaltluftabflussereignissen.

Mehr Kaltluftabfluss-Ereignisse in Wäldern

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass Wälder tendenziell weniger kühle Kaltluft mit geringeren Windgeschwindigkeiten produzieren als freie Flächen (Abbildung 12). Es ist jedoch möglich, dass das produzierte Kaltluftvolumen grösser ist und die Frequenz von Kaltluftereignissen bei bewaldeten Hügeln zunimmt. Kühlere Hangwinde hätten wohl vor allem für die direkt angrenzenden Siedlungsgebiete Vorteile. Voluminösere Kaltluftsysteme finden hingegen eher zu einem weitreichenden Kaltluftstrom zusammen und hätten somit eine grössere Reichweite.

Fazit

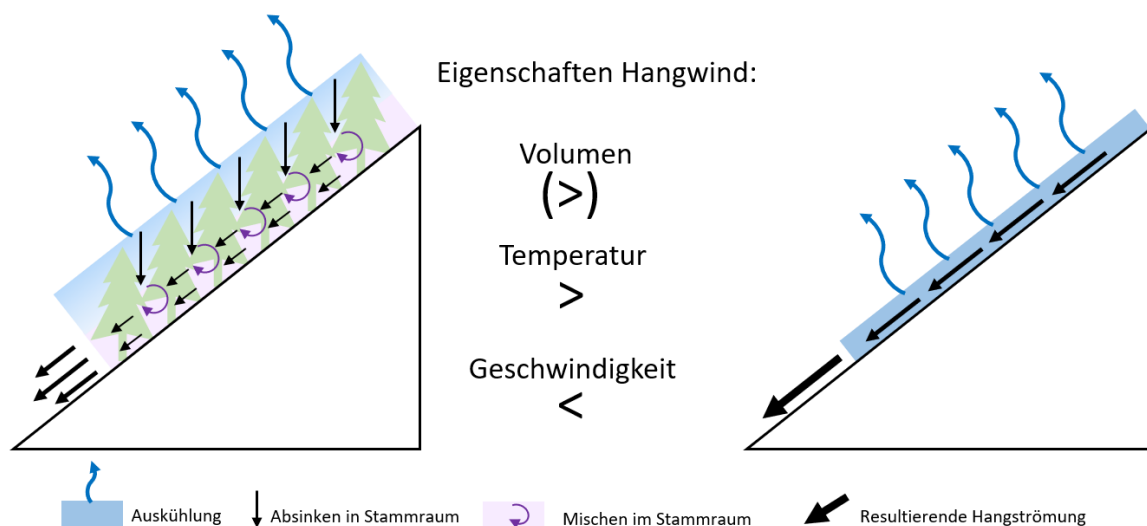


Abbildung 12: Schematische Darstellung zu Kaltluftabflüssen in bewaldetem Gelände (links) und im Freiland (rechts).

2.2.3 Bewertung der Mechanismen

In der Nacht ist das Wärmeempfinden mehrheitlich von der Lufttemperatur und vom vorherrschenden Wind abhängig. Am Tag kommt mit der Sonneneinstrahlung eine weitere und entscheidende Komponente hinzu, welche das thermische Empfinden beeinflusst. Ein Anstieg der Lufttemperatur oder eine Reduktion der Windgeschwindigkeit bewirkt einen linearen Anstieg des thermischen Empfindens am Tag. Wenn die solare Strahlung in die Hitzestress-Bilanz eines Menschen miteinbezogen wird, steigt der Hitzestress sprunghaft an (Kapitel 2.1.2.2).

Unterschiedliche Faktoren des thermischen Wohlbefindens am Tag und in der Nacht

Die Einflussfaktoren am Tag und in der Nacht sind schwierig vergleichbar. Massgebend am Tag ist die Exposition und Mobilität der Menschen. Mit einem Waldspaziergang kann dem Hitzestress z.B. ausgewichen werden. Dadurch findet sehr wertvolle thermische Erholung statt. Nachts ist die Bevölkerung der thermischen Situation viel stärker ausgeliefert, da sie in der Regel nicht mobil ist. Abhängig vom Standort innerhalb der Stadt und dem Alter der Gebäude resp. der Gebäudetechnik kann die Erholung erheblich eingeschränkt sein. Während mehrtägigen Hitzewellen ist die nächtliche Erholung vom Hitzestress des Tages essenziell. Der Vergleich der Kühlwirkung muss daher relativ betrachtet werden und kann je nach Ort und Verhalten mehr oder weniger von Bedeutung sein. Eine Gewichtung der generellen Wirkung am Tag oder in der Nacht ist nicht zielführend.

Schwierige Vergleichbarkeit

Auf den Wald bezogen kommt der Kühlwirkung am Tag eine grössere Bedeutung zu, da Wälder für die nächtliche Auskühlung nicht essenziell sind und die Funktion des Waldes als Naherholungsfläche am Tag sehr wertvoll für die Bevölkerung ist.

Bewertung Waldfunktion

Neben den meteorologischen Parametern und Indizes müssen bezüglich der Bewertung der Mechanismen auch das Verhalten und die Exposition berücksichtigt werden. Eine Bewertung der Mechanismen ist daher nicht zielführend. Bezüglich Funktionen überwiegt diejenige des Waldes als Naherholungsfläche, da nächtliche Kaltluftströme auch ohne Wald stattfinden.

Fazit

2.2.4 Spezifische Fragestellungen

2.2.4.1 Nutzen von Wäldern für Kaltluftproduktion in der Nacht

Wälder haben bezüglich Kaltluftproduktion in der Nacht den Vorteil, dass sie tendenziell grössere Volumen an Kaltluft erzeugen und die Häufigkeit von Kaltluftabflüssen erhöhen. Ausserdem handelt es sich dabei in der Regel um schadstoffarme Luft. Grundsätzlich ist die durch den Wald produzierte Kaltluft jedoch weniger kühl als diejenige, welche über Freiflächen entsteht (Kapitel 2.1.4).

2.2.4.2 Effekt von Wäldern auf Kaltluftausbreitung in der Nacht

Wälder können die Kaltluftausbreitung sowohl im negativen wie auch im positiven Sinne beeinflussen. Der negative Effekt bezieht sich auf die Hinderniswirkung von Wäldern, welche eine höhere Rauigkeit haben als unbebaute Freiflächen. Dadurch ist der Kaltluftstrom deutlich abgeschwächt und kann weniger weit in Siedlungsbereiche vordringen. Gleichzeitig kann die gezielte Pflanzung von Wald im positiven Sinne zur Umlenkung von Kaltluft der oberen Hangbereiche genutzt werden. Somit kann z.B. die Kaltluft um Schadstoffquellen wie Strassen herumgeleitet werden und bleibt schadstoffarm (Kapitel 2.1.4.5).

2.2.4.3 Nutzen von Wäldern auf die Siedlungsflächen am Tag

Der Nutzen von Wäldern auf die Siedlungsflächen am Tag beschränkt sich maximal auf die Randbereiche. Im Idealfall kann kühle Waldluft bei geeigneter Windrichtung zu den angrenzenden Häuserreihen und Strassenzügen des Siedlungsgebiets verfrachtet werden. Dieser Mechanismus ist jedoch noch kaum erforscht und beschrieben (Kapitel 2.1.3.2).

2.2.4.4 Nutzen von Wäldern als Naherholungsflächen am Tag

Wälder sind als Naherholungsflächen am Tag sehr wertvoll für die Bevölkerung. Der empfundene Hitzestress in einem Wald ist in der Regel deutlich geringer als ausserhalb (Kapitel 2.1.2). Diese Komponente ist sehr bedeutend.

2.2.4.5 Weitere Mechanismen des Waldes

Grössere Wälder können die Wolkenproduktion anregen. Die Wolken können wiederum kühlenden Schatten spenden. Die Relevanz dieses Mechanismus dürfte jedoch gering sein und ist Gegenstand der Forschung (Kapitel 2.1.2.4).

Wälder haben einen positiven Effekt auf die Luftqualität. Strömt Frischluft aus einem Waldgebiet heraus, wird in der Regel auch die Luftqualität im beeinflussten Siedlungsraum verbessert (Kapitel 2.1.2.5).

2.2.5 Hinweise für das Waldmanagement

Das Waldmanagement kann einen Einfluss auf die Kühlwirkungsmechanismen des Waldes haben. Dazu gibt es in der Literatur jedoch nur wenig klare Hinweise (Kapitel 2.1.4.4). Aus den gewonnenen Erkenntnissen (Kapitel 2.1.1.2, 2.1.2 und 2.1.4) lassen sich jedoch Einflussfaktoren ableiten (Tabelle 5 inkl. nachfolgender Beschreibung), welche dazu genutzt werden, einen idealen Wald für die Naherholung am Tag und die nächtliche Kaltluftproduktion zu skizzieren. Fundierte Kennzahlen oder Untersuchungen gibt es, insbesondere bezüglich der nächtlichen Kaltluftproduktion, jedoch keine.

Wenig Hinweise zum Einfluss von Art oder Management des Waldes

Der ideale Wald, um sich an einem heissen Sommertag zu erholen, sollte für eine optimale Beschattungswirkung ein dichtes Kronendach aufweisen. Beschattung ist mit Abstand der wichtigste Faktor. Zu starke Auflichtungen und flächige Verjüngungsschläge wirken kontraproduktiv. Lichtungen und Kahlschläge sind zu vermeiden. Verdunstungsstarke Vegetation ist zu bevorzugen, hat jedoch nur einen geringen Effekt auf den bodennahen Bereich. Bezüglich der Artenzusammensetzung gibt es keine eindeutige Präferenz aus meteorologischer Sicht, sofern die oben genannten Faktoren berücksichtigt werden. Generell sind Monokulturen zu vermeiden, weil diese anfälliger für Schädlinge sind und daher das Risiko für Waldschäden steigt. Generell gilt: nur ein gesunder Wald kann am Tag auch die gewünschten Wirkungen entfalten.

Idealer Wald als Naherholungsfläche am Tag

Der ideale Wald sollte zur Kühlung angrenzender Siedlungen möglichst effizient nächtliche Kaltluft produzieren. Die Erkenntnisse lassen darauf schliessen, dass für die nächtliche Kaltluftproduktion ein nicht allzu dichtes und hohes Kronendach von Vorteil ist. Ein grosser Teil der Blätter soll dabei möglichst ungehindert ausstrahlen können. Kleine Blätter sind für diesen Prozess effektiver als grosse Blätter. Bodennah sollten möglichst wenig Hindernisse wie z.B. Unterholz und Sträucher vorhanden sein, damit die Kaltluft gut abfliessen kann. Gleichermassen muss berücksichtigt werden, dass z.B. die Hangneigung einen sehr viel grösseren Einfluss auf die Kaltluftproduktion hat als das Waldmanagement.

Idealer Wald für nächtliche Kaltluftproduktion

Wälder in Flachlagen sind in ihrer Funktion als Naherholungsflächen am Tag wertvoller als in ihrer Funktion als Kaltluftproduzenten. Für die Ausbreitung der Kaltluft in der Ebene sind sie zudem hinderlich. Wälder in sehr steilem Gelände überwiegen in ihrer Funktion als nächtliche Kaltluftproduzenten. Je nach Erreichbarkeit können sie aber auch für beide Funktionen sehr wertvoll sein. Im Kanton Aargau dürfte insgesamt die Funktion als Naherholungsfläche am Tag überwiegen.

Fokus Waldmanagement

Tabelle 5: Einflussfaktoren auf die Kühlwirkungsmechanismen am Tag und in der Nacht. Die Bewertung erfolgt qualitativ auf Grundlage der gewonnen Erkenntnisse.

Legende: + = leicht positiver Einfluss, ++ = positiver Einfluss und Konsens in der Forschung, 0 = kein Einfluss, - = leicht negativer Einfluss, -- = negativer Einfluss und Konsens in der Forschung, () = unklar.

Einflussfaktor		Kühlwirkungsmechanismus Tag	Kühlwirkungsmechanismus Nacht
Waldbeschaffenheit	Offene Waldränder	(+)	+
	Dichter Unterwuchs	0	--
	Höhe Baumbestand	0	+
	Schneisen im Wald	-	(+)
	Lichter Baumbestand, offener Kronenraum	--	+
	Dichter Baumbestand, dichtes Kronendach	++	-
	Fläche/Grösse des Waldes	+	(-)
	Heterogene Baumartenzusammensetzung	(+)	(+)
	Baumarten mit grosser Blattoberfläche	(+)	+
	Trocken- und hitzeresistente Baumarten	++	(+)
	Bodenverdichtung und Versiegelung	-	(-)
Lage des Waldes	Hangneigung der Wälder	+	++
	Nähe Wald zum Siedlungsgebiet	++	(+/-)
	Hindernisfreie Fläche zwischen Wald und Siedlung	-	++
	Exposition des Waldes/Waldrandes Nord/Ost	+	0
	Exposition des Waldes/Waldrandes Süd/West	-	0

2.2.5.1 Einflussfaktoren zur Waldbeschaffenheit

Waldränder sollten möglichst offen sein. Dies ermöglicht leichte Ausgleichsströmungen am Tag, und in der Nacht kann die kalte Luft weniger gebremst aus dem Wald strömen.

Offene Waldränder

Für nächtliche Kaltluftströmungen ist ein offener Stammraum mit wenig Unterwuchs von Vorteil. Dies ermöglicht eine reibungs- und hindernisfreie Ausbreitung der Kaltluft. Ein geringer Unterwuchs verbessert zudem die Windzirkulation im Wald am Tag, was als angenehm empfunden wird.

Dichter Unterwuchs

Wälder mit einem hohen Baumbestand produzieren tendenziell grössere Volumina an Kaltluft in der Nacht. Am Tag spielt die Höhe des Bestandes bezogen auf die Kühlwirkung keine Rolle.

Höhe des Baumbestands

Über den Nutzen von einzelnen Schneisen auf die nächtliche Kaltluftproduktion konnte wenig in Erfahrung gebracht werden. Grundsätzlich sollten sich in solchen Schneisen durch geringere Reibungswiderstände höhere Geschwindigkeiten ausbilden. Da sich in Schneisen meist rasch ein dichter Unterwuchs ausbildet, könnte diese Wirkung temporär sein. Zudem müssen die Schneisen breit ausfallen, um eine nachhaltige Wirkung entfalten zu können. Am Tag sind die Schneisen durch den grösseren Lichteinfall ungünstig. Das Waldklima kann sich so weniger ausprägen.

Schneisen im Wald

Je mehr Lichteinfall ein lichter Baumbestand zulässt, desto geringer ist die Kühlung durch das sich ausbildende Waldklima am Tag. In der Nacht ist ein offener Wald hingegen von Vorteil, da er mehr auskühlt und dadurch kühlere Luft produzieren kann.

Lichter Baumbestand

Für die Kühlwirkung am Tag ist ein möglichst geschlossenes Kronendach von Vorteil. Bei einem zu dichten Kronendach kann jedoch die nächtliche Kaltluftproduktion eingeschränkt werden, sodass Kaltluftabfluss über dem sehr dichten Kronendach stattfindet.

Dichtes Kronendach

Am Tag bietet ein grösseres Waldstück mehr Aufenthaltsraum mit Naherholungsqualität. Je grösser ein Wald ist, desto mehr Menschen profitieren davon und desto mehr Tätigkeiten sind möglich. In der Nacht haben grosse Waldstücke in der Ebene eher einen nachteiligen Effekt auf die Kaltluftausbreitung. In Hanglage ist die Grösse des Waldstückes bezüglich der Kaltluftproduktion wenig relevant, auch wenn kleinere Waldstücke mehr Platz für Freiflächen lassen, welche tendenziell kühlere und schneller abfliessende Kaltluft produzieren.

Fläche/Grösse des Waldes

Es gibt keine generellen Erkenntnisse über Vor- oder Nachteile der Baumartenzusammensetzung für die Kaltluftproduktion. Generell gelten die gemachten Beobachtungen bezüglich der Dichte des Kronenraums oder der Hinderniswirkung im Stammraum. Hohe Bäume mit offenem Stammraum und dichtem Kronendach haben sowohl am Tag wie auch in der Nacht positive Eigenschaften für die Kühlwirkungsmechanismen. Eine heterogene Baumartenzusammensetzung dürfte für die Resilienz des Waldes insgesamt von Vorteil sein und dadurch auch die Kühlwirkungsmechanismen unterstützen.

Baumartenzusammensetzung

Arten mit grossen Blattflächen haben am Tag dank der reichlichen Beschattung eine positive Auswirkung auf das Waldklima. Auch für die nächtliche Kaltluftproduktion kann eine grosse Oberfläche (hohe Leaf Area Density, mehr Oberfläche für Wärmeverlust) einen Vorteil für die Kaltluftproduktion bringen. Viele kleine Blätter sind für diesen Prozess effektiver als wenige grosse Blätter. Gleiches gilt bei geringer Strahlungsbilanz für die Tagsituation (während heissen Tagen weniger relevant).

Blattfläche

Da die Kühlwirkungsmechanismen des Waldes während Hitzewellen und langanhaltenden Trockenphasen am dringendsten benötigt werden, ist die Resilienz der Baumarten gegen Trockenheit und Hitze von grosser Bedeutung. Arten, welche an Trockenheit und Hitze angepasst sind, können die Kühlwirkung auch unter extremen Bedingungen noch entfalten.

Angepasste Arten

Bei der Waldbewirtschaftung kann eine zu starke Verdichtung des Bodens negative Eigenschaften auf die Bäume und somit auch auf deren Kühlwirkungsmechanismen haben. Möglichst naturnahe und versickerungsfähige Oberflächen sind zu bevorzugen. Je offener der Wald, desto wichtiger ist zudem ein offener Waldboden für die Kaltluftproduktion (Kapitel 2.1.4.2).

Bodenverdichtung

2.2.5.2 Einflussfaktoren zur Lage des Waldes

Für die nächtliche Kaltluftproduktion sind Wälder in Hanglage, insbesondere in steilem Gelände, wertvoller als Wälder in der Ebene. Ausserdem hindern Wälder in der Ebene die Ausbreitung der Kaltluftströme eher, als dass sie diese fördern. Am Tag kann es bei ausreichend Beschattung des Waldes, abhängig von der Exposition, schon am frühen Nachmittag zu einem Kaltluftabfluss kommen. In der Ebene ist dies nicht denkbar.

Hangneigung der Wälder

Am Tag ist für die Nutzung des Waldes als Naherholungsraum die Entfernung entscheidend. Bei über zehn Minuten Anreise nimmt die Nutzung durch die Bevölkerung rapide ab (Kapitel 2.1.2.5). Ein bewaldeter Hang in Siedlungsnähe kann unter Umständen die Häufigkeit von Kaltluftabflussereignissen erhöhen, die Intensität nimmt jedoch tendenziell ab im Vergleich zu einem unbewaldeten Hang (s. nächster Abschnitt).

Nähe Wald zum Siedlungsgebiet

Für die Ausbreitung von Kaltluftströmungen zwischen Wald und Siedlungsgebiet sind möglichst hindernisfreie Strukturen und damit reibungsfreie Flächen von Vorteil. Ausserdem sind Kaltluftschneisen über sehr stark auskühlenden Flächen, wie z.B. Moore, dank der zusätzlichen Abkühlung besonders wertvoll. Fehlen Beschattungselemente vor dem Wald, ist der Zugang zu den Naherholungsflächen am Tag aufgrund von drohendem Hitzestress unangenehm.

Hindernisfreie Fläche zwischen Wald und Siedlung

Einen Einfluss auf die Beurteilung der Kühlwirkung der Wälder hat auch deren Exposition. Wälder an nord- oder ost-gerichteten steilen Hängen haben eine stärkere Kühlwirkung am Tag und können auch nachmittags bereits Kaltluft erzeugen. Zudem bietet in diesen Lagen auch der Waldrand ein angenehmeres beschattetes Aufenthaltsklima. In der Nacht stellt dies keinen Einfluss dar.

Exposition des Waldes/Waldrandes Nord/Ost

Für südlich bis westlich ausgerichtete Hänge mit Wäldern ist vor allem der Waldrand am Tag thermisch unkomfortabel (Kapitel 2.1.2.3). Für die Nacht ist kein Unterschied zu erwarten.

Exposition des Waldrandes Süd/West

3 Simulationsstudie

3.1 Methodik

3.1.1 Fallbeispiele

Zwei Fallbeispiele wurden für die Untersuchung mit Simulationen ausgewählt. Grundlegend für die Auswahl war hierbei die Nähe der Waldstücke zu Siedlungsgebieten sowie die Bedeutung für die lokale Bevölkerung. Gleichzeitig unterscheiden sich die beiden Waldstücke deutlich voneinander in ihrer Topografie und Zusammensetzung verschiedener Baumhöhen.

Auswahl von zwei Waldstücken

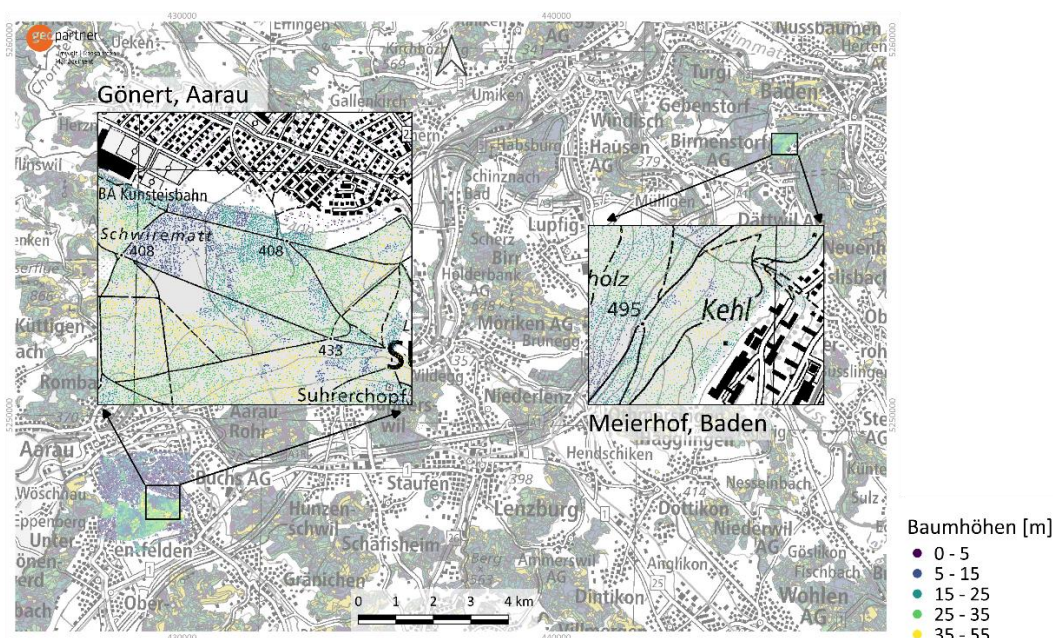


Abbildung 13: Übersicht mit der Lage der Fallbeispiele sowie der Verteilung der Baumhöhen.

Das Waldstück Gönert (oder Gönhard) liegt mehrheitlich auf dem Gemeindegebiet von Suhr, wird aber vor allem von der Aarauer Stadtbevölkerung als Naherholungsgebiet genutzt (Abbildung 13, links). Das Waldstück grenzt direkt südlich an das Stadtgebiet von Aarau und steigt Richtung Süden um 60-70 m an.

Waldgebiet Gönert, Aarau

Das Gebiet Meierhof in Baden wurde als zweites Fallbeispiel bestimmt (Abbildung 13, rechts). Dieses ist insbesondere von Relevanz, da sich Baden als «Stadt im Wald» mit markanter Topografie sehr gut für die Untersuchungen eignet, und zudem das Waldstück Kehl nordwestlich des gleichnamigen Altersheims bereits für Praxisversuche zur Beeinflussung der Kaltluftströmung ausgewählt wurde. Das Gelände steigt um knapp 100 m Richtung Nordwesten an und weist eine leicht konkave Form auf.

Meierhof, Baden

3.1.2 Szenarien

Aus den einleitend formulierten Fragestellungen (Kapitel 1.1), den Erkenntnissen der Literaturstudie (Kapitel 2.2), den Wünschen der Projektbeteiligten und entsprechend den Möglichkeiten der Modelle (Kapitel 3.1.3) werden unterschiedliche Szenarien bzw. Variantenvergleiche entworfen (Tabelle 6). Es sollen keine Varianten simuliert werden, welche fachlich nicht sinnvoll oder nicht umsetzbar resp. nicht wünschenswert sind (z.B. reine Monokulturen oder vollständige Abholzung des Waldes).

Szenarienbildung

Tabelle 6: Szenarien, an denen sich die Modellsimulationen orientieren.

S0	Ist-Zustand
Verschiedene Waldbestände	
S1	Jungwald oder Verjüngungsfläche (gewollt, <0.5 ha)
S2	Freifläche (frisch geräumter Bestand) oder Jungwuchs/Dickung (z.B. natürliche Waldschäden, ca. 3 ha)
S3	Dauerwald oder stufiger Bestand (Entnahme einzelner Bäume, geringere Dichte)
S4	alter Bestand (grössere Bäume, alter ca. 70-90 Jahre)
Schneisen/Verjüngungsfläche	
S5	Schneisen im Wald (mit unterschiedlichem Grad an Bewuchs)
Zugänge zum Wald/Mechanismen ausserhalb des Waldes	
S6	Zugang zum Wald
S7	Einflussbereich Kühlwirkung Wald
S8	Kühlwirkung auf Bachläufe

3.1.3 Modelle

Die human-bioklimatische Situation bzw. die Erwärmung der bodennahen Luftschichten am Tag haben andere physikalische Ursachen als die Produktion von Kaltluft in der Nacht (Kapitel 2). Die Prozesse werden daher mit unterschiedlichen, spezifischen Modellen berechnet (Kapitel 3.1.3).

Unterschiedliche Prozesse

3.1.3.1 ENVI-met

Für die Simulation des Waldklimas am Tag wird das dreidimensionale Rastermodell ENVI-met verwendet (Anhang A.5.1). ENVI-met erlaubt die Berücksichtigung von Einzelbäumen sowie deren Auswirkungen auf das Mikroklima. Die Bäume werden als dreidimensionale Rasterobjekte entsprechend ihrer Eigenschaften (Blattdichte, Form etc.) und der Modellauflösung berücksichtigt. Sie stammen aus Geodaten mit den Baumarten, Bestandskartierungen, Baumhöhen und Einzelbäumen (Datenlieferung Kanton Aargau).

Modell ENVI-met

Die Oberflächenbeschaffenheit entstammt den Daten der Amtlichen Vermessung. Zwischen dem Wald und der Siedlung wird Landwirtschaftsland mit hohem Bewuchs, entsprechend z.B. einem Weizenfeld oder Wiese mit hohem Gras, angenommen. Die Gebäudehöhen für das angrenzende Stadtquartier werden aus dem Oberflächenmodell der Swisstopo abgeleitet (Modellansichten in Anhang A.7).

Oberflächen und Vegetation

Im Modell wird für beide Fallbeispiele ein schöner Sommertag mit Temperaturen bis 30 °C simuliert. In Aarau wird der Wind im Modell so eingestellt, dass dieser schwach (1 m s^{-1}) aus Richtung Wald zur Siedlung strömt. Damit soll unter anderem die Frage nach einer möglichen Windzirkulation vom Wald ins Siedlungsgebiet untersucht werden. Für die Simulation in Baden wird davon ausgegangen, dass der Wind entsprechend den typischen Bedingungen in hügeligem Gelände am Tag den Hang hoch weht (Kapitel 2.1.3.3).

Meteorologie

3.1.3.2 KLAM_21

Für die Simulation von Kaltluftentstehung und Kaltluftabfluss wird das Modell KLAM_21 verwendet (Anhang A.5.2). Durch den Fokus auf Fragestellungen der Standort-, Stadt- und Regionalplanung ist es für die vorliegende Analyse geeignet [81].

Modell KLAM_21

In KLAM_21 wird üblicherweise mit einer gröberen Auflösung, dafür einer grösseren Modellumgebung gerechnet. Im vorliegenden Fall wurde im Kerngebiet eine Auflösung von 4 m festgelegt.

Modellauflösung KLAM_21

Die relevanten Eingangsdaten für KLAM_21 sind Landnutzung und Geländehöhe. Damit werden die unterschiedlichen Raten der Kaltluftproduktion je nach Eigenschaften der Fläche sowie deren aerodynamischer Widerstand berücksichtigt. Jede Landnutzungs-kategorie hat dabei definierte Flächenparameter wie z.B. Versiegelungsgrad, Baum-dichte, Baumhöhe, Rauigkeit oder Blattflächenindex. Einzelbäume werden nicht simuliert. Die Topografie steuert zudem den Kaltluftabfluss und die Kaltluftausbreitung. Auf Grundlage dessen können die Eigenschaften von Kaltluftströmen berechnet werden.

Landnutzung und Geländehöhen

3.1.4 Vorgehen

Wie in Kapitel 3.1.3 erwähnt, werden die mikroklimatische Situation am Tag und die nächtliche Kaltluftproduktion mit zwei verschiedenen Modellen simuliert. Dazu werden die vorhandenen Daten für die Modelle aufbereitet und entsprechend den Szenarien (Kapitel 3.1.2) angepasst. Die Auswertung erfolgt in Form zweidimensionaler Karten auf 2 m Höhe, entlang von Profillinien als «Waldspaziergang» (Lufttemperatur und PET) und als räumlich gemittelte Zeitreihen (Lufttemperatur und PET) über vordefinierte Waldflächen mit repräsentativen Waldbeständen (s. Kapitel 3.1.5).

Allgemein

3.1.4.1 Simulation Tagsituation

Für die Simulation der mikroklimatischen Situation am Tag wird ein grosser, heterogener Ausschnitt aus dem Waldgebiet Gönert gewählt. Innerhalb dieses Ausschnitts ergeben sich unterschiedliche Waldbestände, welche die Szenarien 1-4 abdecken. Mit der gegebenen Baumverteilung und verschiedenen Baumhöhen, Baumdichten, Baumarten etc. (vgl. Abbildung 13) können die Forschungsfragen anhand realer Zustände untersucht werden. Im Modell werden die Einzelbäume entsprechend den Geodaten gesetzt (Ausnahme Fläche A, s. Kapitel 3.1.5). Der Einfluss von kleinen Verjüngungsflächen wird zusätzlich anhand der Simulation von Waldschneisen im Gebiet Meierhof in Baden beurteilt. Weitere Details sind Kapitel 3.1.5 zu entnehmen.

Mikroklima in unterschiedlichen Waldbeständen (S1-S4)

Die Auswirkungen der Umgebungsgestaltung auf den Zugang zum Wald (S6) und der Einflussbereich der kühlen Waldluft (S7) werden mit spezifischen Simulationen des Übergangsbereichs von der Siedlung in den Wald als Variantenstudie untersucht und beschrieben.

Mechanismen ausserhalb des Waldes (S6 und S7)

3.1.4.2 Simulation Nachtsituation

Das Kaltluftabflussmodell KLAM_21 rechnet nicht mit Einzelbäumen, sondern mit klassifizierten Flächen (z.B. Fläche Wald) und deren spezifischen Eigenschaften. Für die Kaltluftabflussberechnungen wird daher jeweils die Eigenschaft der Landnutzungs-kategorie Wald im Gesamten angepasst. So wird z.B. für einen alten Wald (Nutzungsverzicht, S4) mit einer mittleren Bestandshöhe von 30 m anstelle von 20 m gerechnet oder für den weniger dichten Wald (Dauerwald, S3) die Baumdichte um 30% reduziert.

Kaltluftabflusssimulation für unterschiedliche Waldbestände (S3 und S4)

Für die Kaltluftproduktion und den Kaltluftabfluss in der Nacht werden in Szenario S5 neben der Wirkung der Schneisen direkt nach dem Eingriff auch unterschiedliche Entwicklungszyklen der freigewordenen Schneisen und deren Einfluss auf die nächtlichen Kaltluftströme bewertet. Im Modell wird dabei zunächst die Rauigkeit erhöht, um eine leichte Strauchschicht mit Gebüsch und kleinen Bäumen zu simulieren (Schneisen mit geringem Bewuchs, Strauchschicht). In einem zweiten Schritt wird neben der weiteren Erhöhung der Rauigkeit die Baumdichte auf 20% und die mittlere Baumhöhe auf 5 m gesetzt, um einen dichteren Bewuchs mit einer kleinen Baumschicht zu simulieren.

Kaltluftabflusses Schneisen mit unterschiedlichem Bewuchs (S5)

3.1.5 Charakterisierung der Waldbestände

Innerhalb des Aarauer Waldgebietes Gönert wurden zusammen mit der Abteilung Wald des Kantons Aargau vier repräsentative Flächen definiert, welche für die Untersuchung der Waldbestände geeignet sind (Abbildung 14). Die Charakterisierung dieser Flächen ist Tabelle 7 zu entnehmen. Die Fläche A, welche in Realität einer Verjüngungsfläche (Jungwuchs/Dickung, S2 in Tabelle 6) entspricht, wird für die Simulation bereinigt und ohne Bewuchs als Freifläche (frisch geräumter Bestand) simuliert. In einer weiteren Simulation wird die Fläche inklusive Bewuchs als Jungwuchs/Dickung gerechnet und spezifisch auf den Effekt des bodennahen Bewuchs hin untersucht.

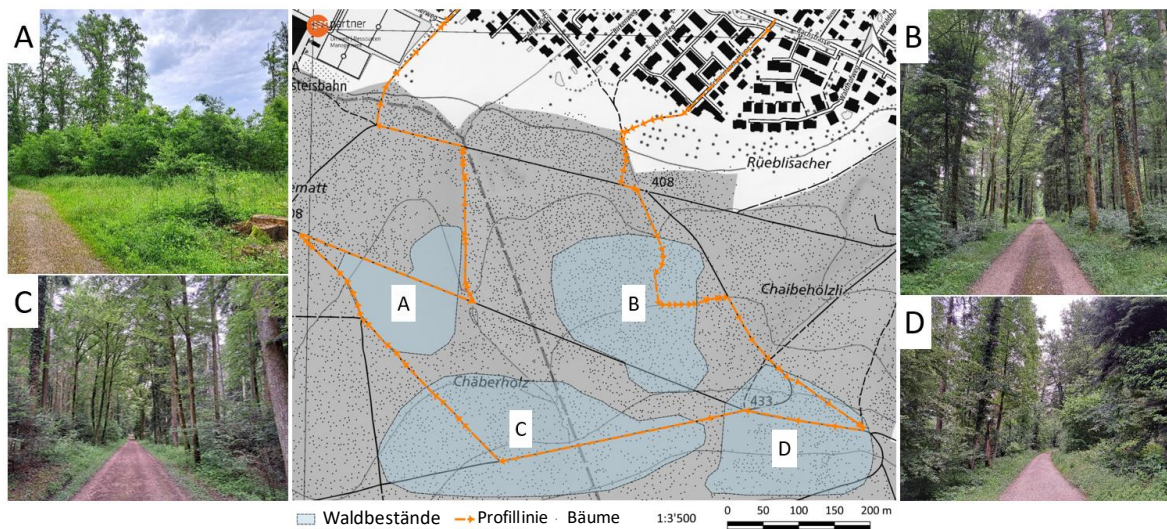
Charakterisierung der Flächen

Die Flächenanalysen ermöglichen es, unterschiedliche Waldbestände miteinander zu vergleichen. Für die Auswertung werden die relevanten Parameter Lufttemperatur und PET innerhalb der Flächen gemittelt und im Tagesgang analysiert.

Repräsentative Flächen

Zur Untersuchung des thermischen Komforts während einem möglichen Waldspaziergang wird eine Profillinie definiert, entlang welcher die relevanten Parameter ausgewertet werden (orange Linie in Abbildung 14, Profillinie Meierhof, Baden in Anhang A.6). Das Profil führt durch die unterschiedlichen Bestandstypen und folgt mehrheitlich dem realen Wegenetz.

Waldspaziergänge

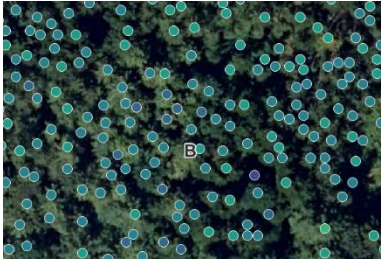


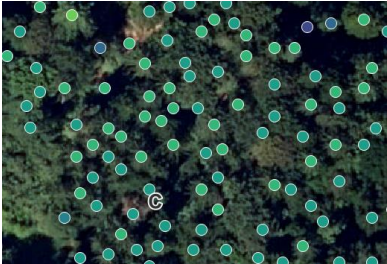
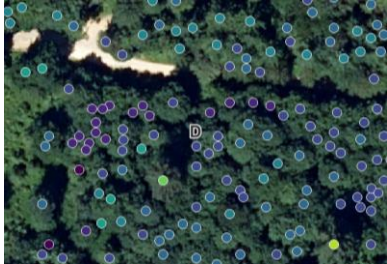
A: Verjüngungsfläche (Jungwuchs/Dickung)*
C: alter Bestand

B: Bestand in Optimalphase
D: stufiger Bestand

Abbildung 14: Einteilung der Flächen verschiedener Waldbestände (A bis D) und Profillinie des «Waldspaziergangs» (orange). Fläche A wurde als Freifläche mit frisch geräumtem Bestand (1. Lauf) und als Jungwuchs/Dickung (spezifische Untersuchung) simuliert (*).

Tabelle 7: Charakterisierung der Waldbestände (oben: Verjüngungsfläche und Bestand in Optimalphase, unten: alter und stufiger Bestand). Vergleich zu Szenarien in Tabelle 6.

Fläche	A	B
Kenngrosse	Verjüngungsfläche (Jungwuchs/Dickung)**	Bestand in Optimalphase (Baumholz 1-2)
Szenario	S2	Referenzzustand
Baumhöhen [m]		
5 - 10 10 - 15 15 - 20 20 - 25 25 - 30 30 - 35 35 - 40 40 - 45 45 - 50 50 - 55		
Flächengrösse [ha]	2.0	3.6
Mittlere Baumhöhe [m]	< 8	28
Spanne Baumhöhen [m]	[1-35]	[10-37]
Mittleres Bestandsalter [a]*	ca. 8	43
Altersspanne [a]	[1-12]	[24-44]
Bestandsdichte	1	1
Holzvolumen [m3/ha]*	10-30	425

Fläche	C	D
Kenngrosse	alter Bestand (Baumholz 3)	stufiger Bestand
Szenario	S4	S3 und S1
Baumhöhen [m]		
5 - 10 10 - 15 15 - 20 20 - 25 25 - 30 30 - 35 35 - 40 40 - 45 45 - 50 50 - 55		
Flächengrösse [ha]	5.7	3.1
Mittlere Baumhöhe [m]	33	21
Spanne Baumhöhen [m]	[8-45]	[8-49]
Mittleres Bestandsalter [a]*	76	40
Altersspanne [a]	[24-84]	[8-84]
Bestandsdichte	0.8	0.4-0.6
Holzvolumen [m3/ha]*	540	300

* flächengewichtet berechnet

** simuliert als Freifläche mit frisch geräumtem Bestand (1. Lauf) und als Jungwuchs/Dickung (spezifische Untersuchung)

3.2 Resultate

3.2.1 Thermisches Wohlbefinden in den Waldbeständen

3.2.1.1 Lufttemperatur am Tag

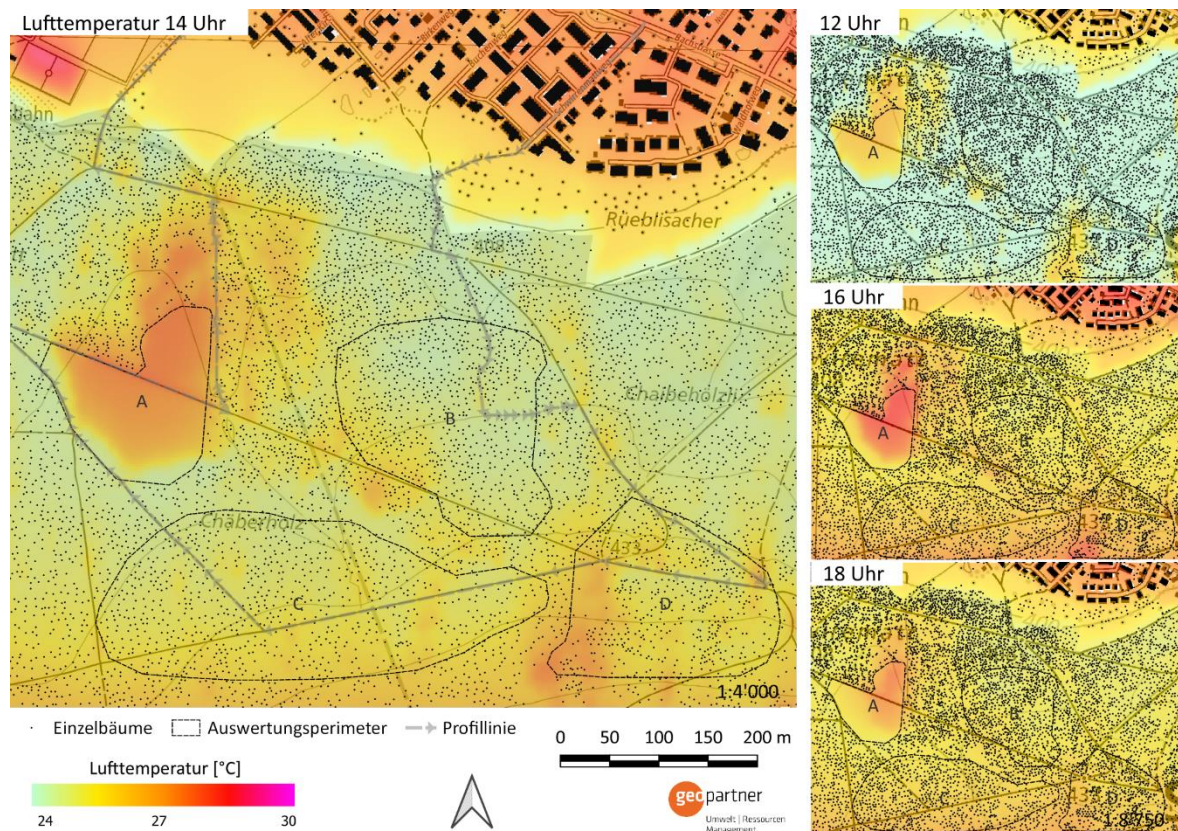


Abbildung 15: Lufttemperatur in 2 m über Grund zu unterschiedlichen Zeitpunkten an einem Sommertag im Aarauer Waldgebiet Gönert.

Die Simulation für den Aarauer Stadtwald Gönert ergibt Räume mit thermisch unterschiedlicher Charakteristik, abhängig von der jeweiligen Baumzusammensetzung und dadurch auch abhängig vom jeweiligen Bestandstyp.

Die Kartenübersicht in Abbildung 15 zeigt die simulierte Lufttemperatur an einem Sommertag in 2 m über Grund zu unterschiedlichen Zeitpunkten. Die Tageshöchsttemperatur wird um ca. 16 Uhr erreicht, was typisch für einen Sommertag ist.

Unterschiedliche Räume

Lufttemperatur an einem Sommertag

In kurzer Distanz vom Wald Richtung Siedlungsfläche nimmt die Lufttemperatur deutlich zu. Die Erwärmung der Luft wird von den lokalen Gegebenheiten mit starker Sonneneinstrahlung und fehlender Beschattung gesteuert. Der umgebende Wald vermag nur in den Randbereichen einen leicht kühlenden Einfluss zu entfalten. Dieser ist frühmorgens, wenn sich das umgebende Landwirtschaftsland noch nicht so stark aufgewärmt hat, stärker ausgeprägt. Das Landwirtschaftsland mit hohem Bewuchs zwischen Wald und Siedlung bewirkt - in Kombination mit der abgekühlten Luft aus dem Wald - auch auf der offenen Landwirtschaftsfläche tiefere Temperaturen. Im Siedlungsgebiet ist derweil kein signifikanter Einfluss der temperatursenkenden Wirkung des Waldes zu beobachten.

Kühlwirkung des Waldes auf Umgebung

Die Erwärmung der bodennahen Luftschichten innerhalb des Waldes ist von der Dichte des Kronendachs abhängig. Für die modellierten Bäume treten z.B. ab einer gewissen Stammzahl keine Lufttemperaturwerte $>26^{\circ}\text{C}$ mehr auf (s. Anhang A.8). Wenn das Kronendach geschlossen ist, können sich auch bei geringerer Stammzahl sehr angenehme Temperaturen einstellen. Bei grösseren Freiflächen mit geräumtem Bestand, wie innerhalb der Fläche A (Abbildung 15), ist die Lufttemperatur demgegenüber deutlich erhöht im Vergleich zu den übrigen Flächen innerhalb des Waldes.

Starke Erwärmung über Freifläche mit geräumtem Bestand

Auch die als stufiger Bestand klassifizierte Fläche D, welche unterschiedliche Baumhöhen, -arten und -dichten aufweist, zeigt an gewissen Stellen deutlich höhere Temperaturen (Abbildung 15). Im Verlauf des Tages homogenisiert sich die Temperaturverteilung, was für die meisten Flächen gilt.

Unterschiede im stufigen Bestand

Die Auswertung der Mittel- und Maximalwerte der ausgewählten Waldbestände (Abbildung 16) stützen die Erkenntnisse aus der Kartendarstellung. Der stufige Bestand (D) erreicht dabei ähnlich hohe Maximalwerte wie die Freifläche mit geräumtem Bestand (A), im Mittel ist die Temperatur innerhalb des stufigen Bestands jedoch deutlich geringer. Auffällig ist zudem, dass die Maximalwerte beim alten Bestand (B) und dem Bestand in der Optimalphase (C) bis zum frühen Abend unter dem Mittelwert der Freifläche mit geräumtem Bestand (A) liegen. Dies zeigt den Unterschied zwischen einem intakten Waldklima und dem Mikroklima einer unbewachsenen Freifläche deutlich. Die Temperaturkurven des stufigen Bestands (D) sowie des alten Bestands (B) unterscheiden sich, insbesondere am späteren Nachmittag, nur geringfügig.

Maximalwerte bei gewissen Flächen unter den Mittelwerten der Verjüngungsfläche

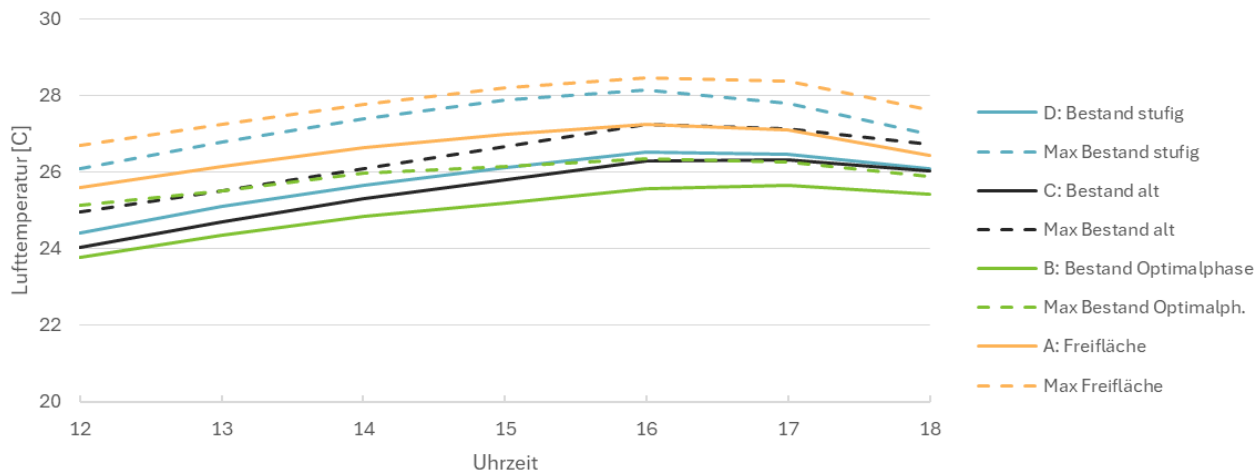


Abbildung 16: Lufttemperatur in 2 m über Grund im Verlauf eines Nachmittags als Mittelwerte (durchgezogen) und Maxima (gestrichelt) innerhalb der definierten Flächen (s. Abbildung 15) an einem Sommertag im Aarauer Waldgebiet Gönert.

Abbildung 17 zeigt die Profillinie durch die simulierte Temperaturverteilung um 14 Uhr entsprechend der Karte in Abbildung 15. Es wird ersichtlich, welche Temperaturveränderung eine Person erfährt, wenn sie vom Siedlungsgebiet zu einem Waldspaziergang aufbricht. Zunächst wird der stufenartige Temperaturrückgang von der Strasse im Siedlungsgebiet über das dicht bewachsene Landwirtschaftsland zum Waldrand deutlich. Im Wald ist die Lufttemperatur an diesem Sommertag durchwegs 2-4 °C tiefer als im Siedlungsgebiet. Bei der Durchquerung der Freifläche mit geräumtem Bestand (A) steigt das Thermometer auf ähnlich hohe Werte wie im Siedlungsgebiet.

Simulierte Temperaturen während Waldspaziergang

Der Grund dafür ist, dass sich der blanke und unbeschattete Waldboden der Freifläche mit geräumtem Bestand stark und rasch aufwärmt. Abhängig von den jeweiligen thermischen Eigenschaften kann dies sogar schneller geschehen als auf einer versiegelten Fläche. Ausschlaggebend dafür ist auch die Bodenfeuchte, welche im Modell aufgrund der starken Sonneneinstrahlung rasch abnimmt.

Thermische Eigenschaften Boden, geräumtem Bestand

Im Bereich niedriger und weniger dichter Vegetation (nach Durchquerung der Fläche A) schwankt die Temperatur deutlich. Beim Verlassen des Waldes ist ein sukzessiver Temperaturanstieg zu beobachten.

Schwankung im Bereich junger Vegetation

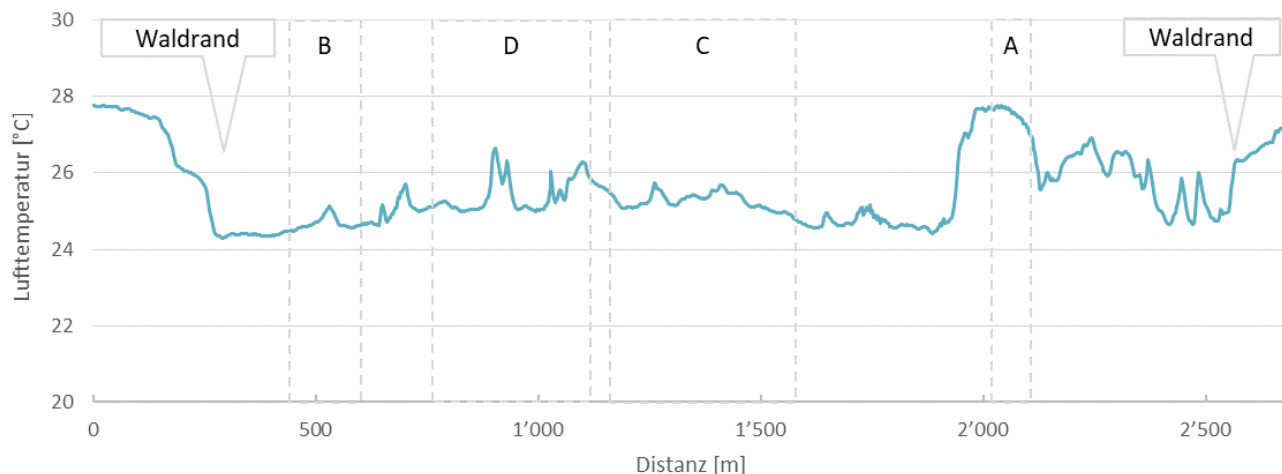


Abbildung 17: Lufttemperatur in 2 m über Grund um 14 Uhr als Profillinie entlang von Waldwegen (s. Abbildung 15) an einem Sommertag im Aarauer Waldgebiet Gönert.

3.2.1.2 Hitzestress am Tag

Die Hitzestress-Verteilung als PET in Abbildung 18 zeigt ähnliche Tendenzen wie die Lufttemperatur-Verteilung, mit einer Akzentuierung der Unterschiede zwischen beschatteten und unbeschatteten Flächen. Auch innerhalb des Waldes treten deutliche Unterschiede des thermischen Empfindens auf. Insbesondere die Freifläche mit geräumtem Bestand (A) weist mit geringem Abstand zum dichten Baumbestand bereits hohe PET-Werte von $>41^{\circ}\text{C}$ auf, was als extremer Hitzestress klassifiziert wird. Innerhalb des Waldes herrscht an diesem Sommertag mehrheitlich geringer Hitzestress ($\text{PET} < 29^{\circ}\text{C}$, s. Abbildung 19).

Ähnliche Tendenzen wie Lufttemperatur, akzentuierte Unterschiede

Starker Hitzestress ($\text{PET} > 35^{\circ}\text{C}$) tritt für die modellierten Bäume ab einer gewissen Stammzahl nur noch vereinzelt auf (s. Anhang A.8). Entscheidend für den thermischen Komfort am Tag sind jedoch der Kronenschlussgrad und die dadurch bewirkte Beschattung am Boden. Daher können sich auch bei geringerer Stammzahl sehr angenehme Bereiche mit geringem Hitzestress ergeben, solange der Kronenschlussgrad hoch ist. Zudem kann aufgrund des schrägen Schattenwurfs angrenzender Bäume eine vegetationslose Fläche ebenfalls geringen Hitzestress aufweisen.

Kaum starker Hitzestress ab gewisser Stammzahl

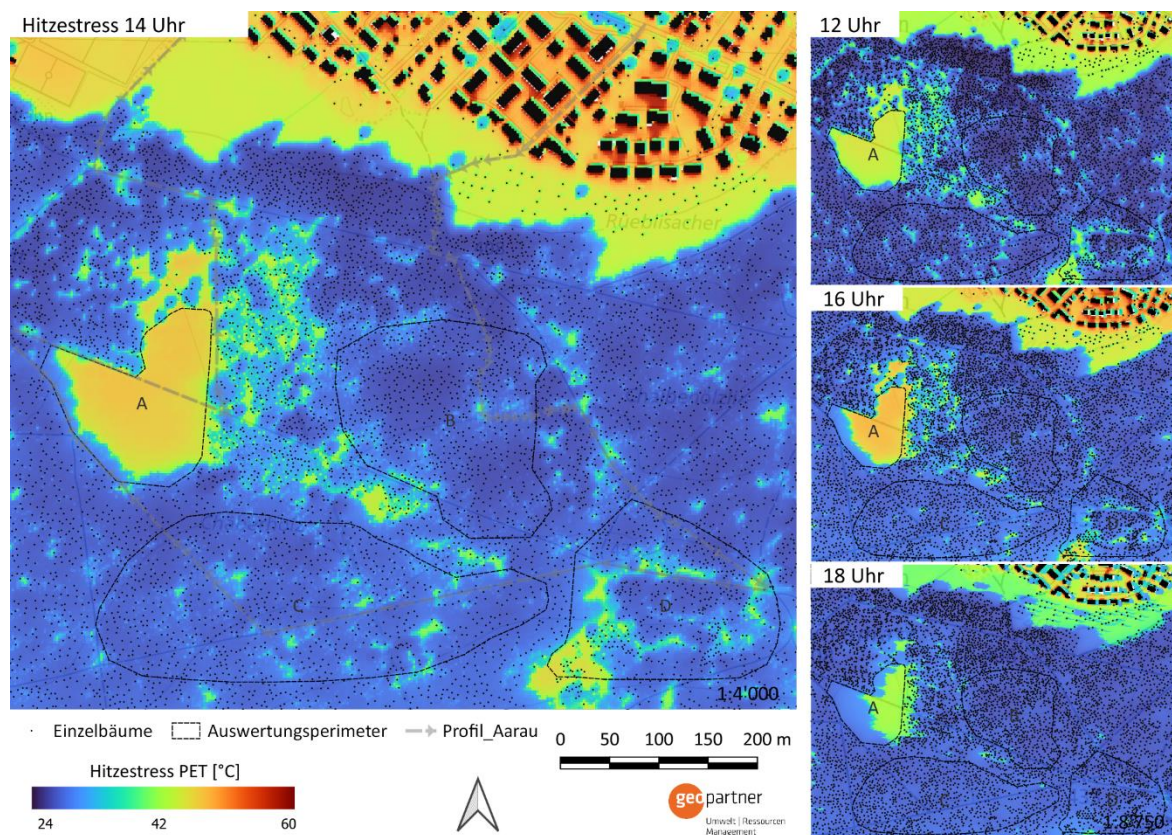


Abbildung 18: Hitzestress als PET in 2 m über Grund zu unterschiedlichen Zeitpunkten an einem Sommertag im Aarauer Waldgebiet Gönert.

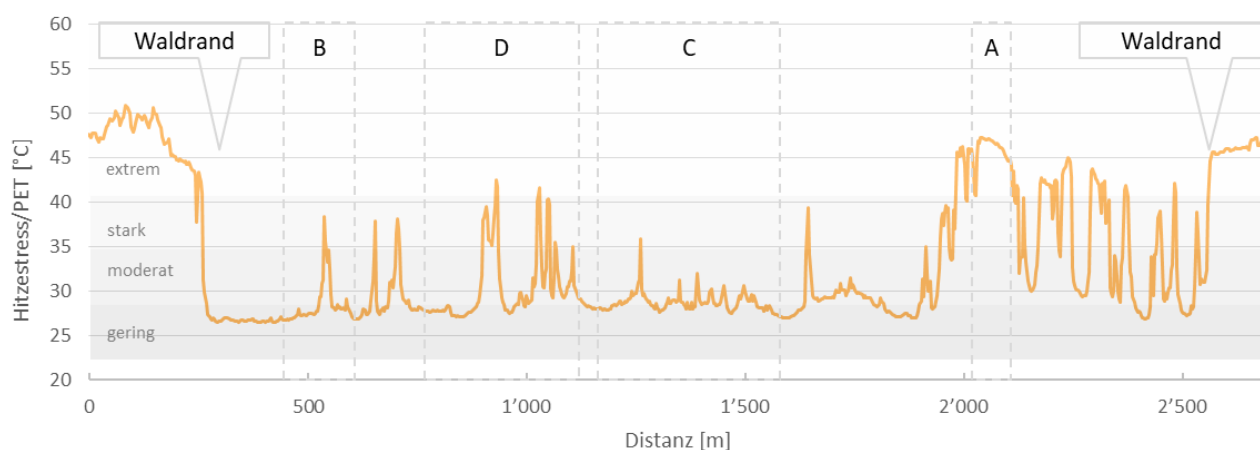


Abbildung 19: Hitzestress als PET in 2 m über Grund um 14 Uhr als Profillinie entlang von Waldwegen (s. Abbildung 18) an einem Sommertag im Aarauer Waldgebiet Gönert.

Abbildung 20 zeigt ebenfalls, dass die thermische Belastung innerhalb der Freifläche mit geräumtem Bestand (A) deutlich höher ist als innerhalb der übrigen Flächen. Insbesondere im alten Bestand (C) und im Bestand in Optimalphase (B) ist der Hitzestress im Mittel gering. Mit zunehmender Beschattung bei tieferem Sonnenstand gegen Abend sinkt die PET innerhalb der Freifläche mit geräumtem Bestand (A) deutlich. In den dichten Waldgebieten bleibt das thermische Empfinden demgegenüber während dem ganzen Nachmittag auf einem ähnlichen, etwas warmen bis warmen, Niveau (Hitzestress gering bis moderat).

Deutlich höherer Hitzestress innerhalb Verjüngungsfläche

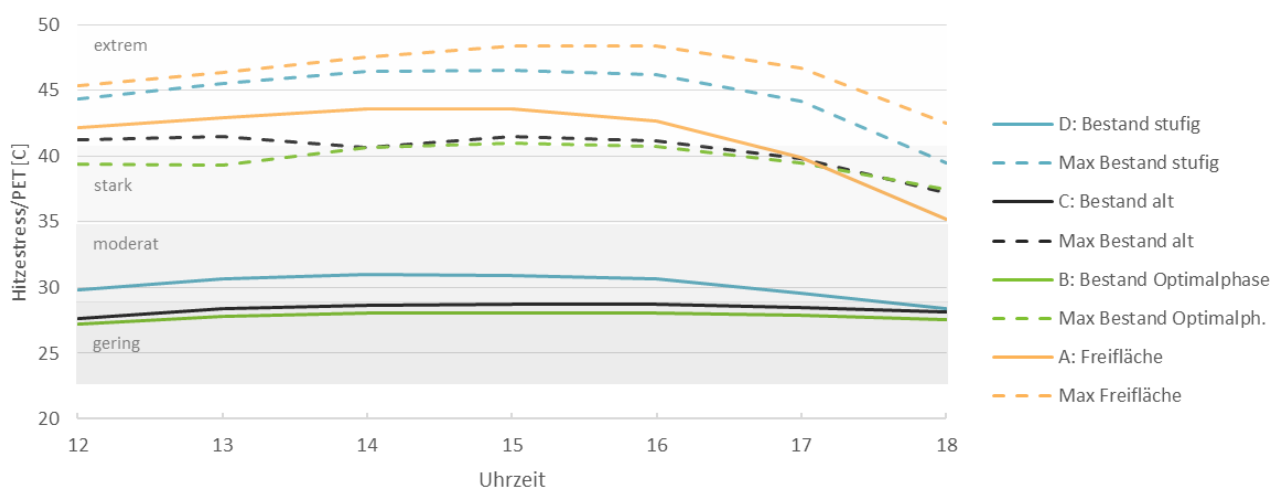


Abbildung 20: Hitzestress als PET in 2 m über Grund im Verlauf eines Nachmittags als Mittelwerte (durchgezogen) und Maxima (gestrichelt) innerhalb der definierten Flächen (s. Abbildung 18) an einem Sommertag im Aarauer Waldgebiet Gönert.

3.2.1.3 Fläche A inklusive Bewuchs als Jungwuchs/Dickung

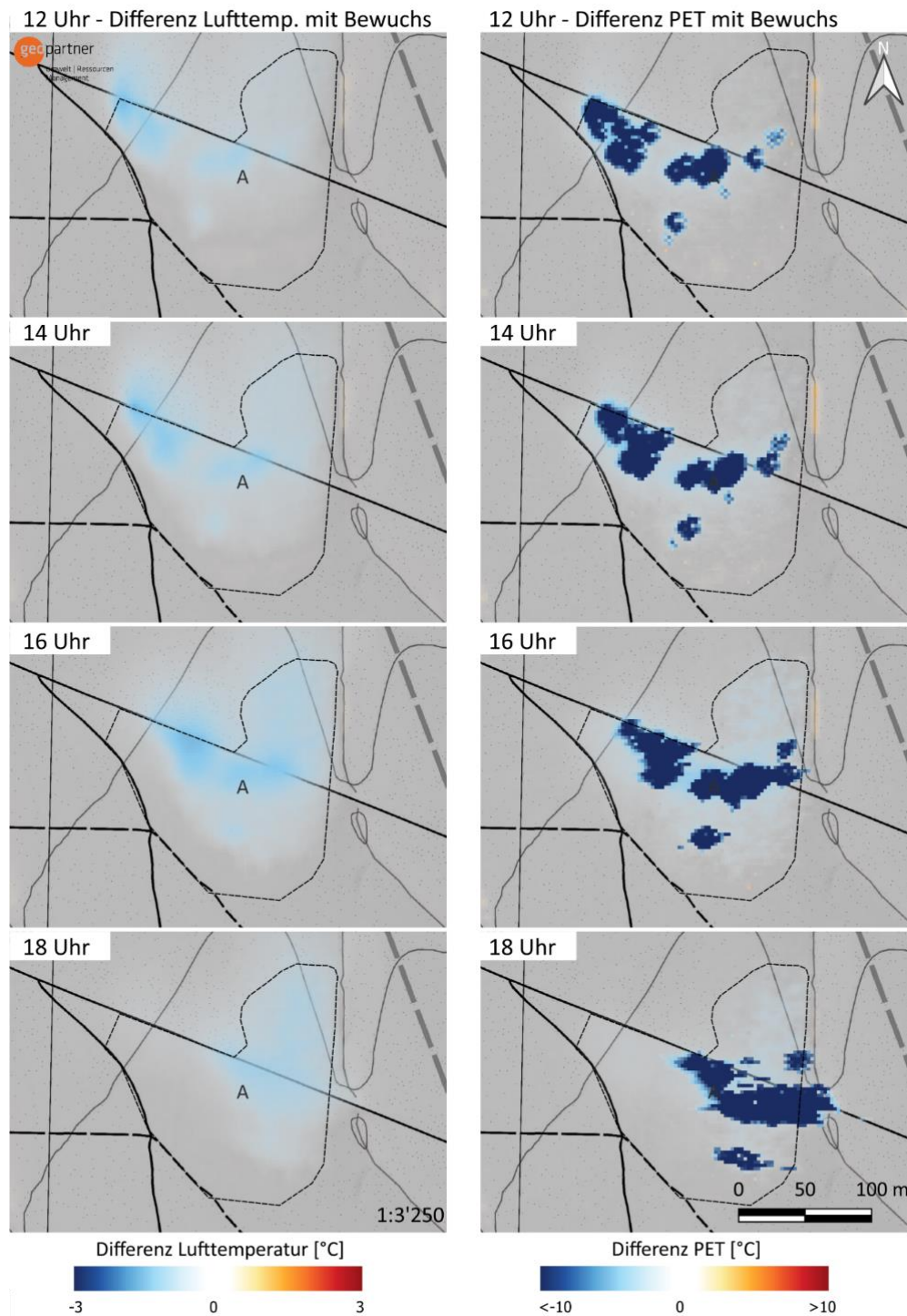


Abbildung 21: Differenz der Lufttemperatur (links) und der PET (Hitzestress, rechts) in 2 m über Grund für die Fläche A inklusive Bewuchs als Jungwuchs/Dickung im Vergleich zur Fläche mit frisch geräumtem Bestand zu unterschiedlichen Zeitpunkten an einem Sommertag. Blau bedeutet kühler mit Bewuchs.

Der Bewuchs einer Verjüngungsfläche, beispielhaft untersucht anhand der Fläche A (ca. 2 ha), hat einen grossen Einfluss auf die Erwärmung der bodennahen Luftschichten. Die Lufttemperatur sinkt im Zustand als Jungwuchs/Dickung inkl. kleinen Hecken und einzelnen Bäumen um bis zu 1.7 °C im Vergleich zur Simulation als Freifläche mit frisch geräumtem Bestand.

Bewuchs mit grossem Einfluss auf Lufttemperatur

Da neben der bodennahen Vegetation auch grossgewachsene Bäume, welche beim ersten Lauf entfernt wurden, mitberücksichtigt werden, sinkt punktuell auch die PET markant. Dieser Effekt ist deutlicher spürbar als die Auswirkungen durch das Hinzufügen von bodennaher Vegetation.

PET nimmt dank Baumschatten deutlich ab

Dies zeigt, dass der Jungwuchs eine grosse Bedeutung für das bodennahe Waldklima hat und einzelne stehengelassene Bäume für thermische Entlastung am Waldboden sorgen können.

Nutzen Jungwuchs

3.2.2 Nächtlicher Kaltluftabfluss in den Waldbeständen

3.2.2.1 Mittlere Bestandshöhe

Die flächendeckende Anhebung der mittleren Bestandshöhe von 20 auf 30 m hat im Modell primär Auswirkungen auf die Kaltluftströme im Wald selbst. Die angrenzenden Siedlungsgebiete und Verjüngungsflächen sind davon kaum betroffen. Die Windgeschwindigkeit nimmt dabei minimal zu (ca. 0.1 m s⁻¹), da der höhere Stammraum der Strömung einen besseren Abfluss ermöglicht (Abbildung 22, oben). Entsprechend nimmt der Volumenstrom innerhalb des Walds leicht zu und die Kaltlufthöhe leicht ab (Abbildung 22, Mitte und unten).

Primär Auswirkungen auf Kaltluftströme im Wald

Das Gelände prägt das Kaltluftgeschehen massgeblich und kann Kaltluftströme verstärken. Je stärker das Gelände gegliedert ist, desto mehr zeigen sich die Veränderungen innerhalb dieser Geländeeinschnitte. Dies akzentuiert die beobachteten Unterschiede. In weniger gegliedertem Gelände ist die Wirkung innerhalb des Waldes grossflächig verteilt und daher auch weniger stark ausgeprägt. Vereinzelt sind sogar Rückgänge beim Kaltluftvolumenstrom beobachtbar, da die Kaltluft andernorts rascher aus dem Wald entweichen kann und sich die Strömung leicht verändert (Abbildung 22, unten).

Veränderungen in Geländeeinschnitten sichtbar

Die beschriebenen Tendenzen sind sowohl im Aarauer Waldgebiet Gönert (Abbildung 22) als auch im Badener Gebiet Meierhof (Abbildung 23) zu beobachten. Einen markanten Einfluss auf das Kaltluftgeschehen im Siedlungsgebiet aufgrund der Anhebung der mittleren Bestandshöhe konnte an beiden Orten jedoch nicht gefunden werden.

Kein Einfluss auf Siedlungsgebiet

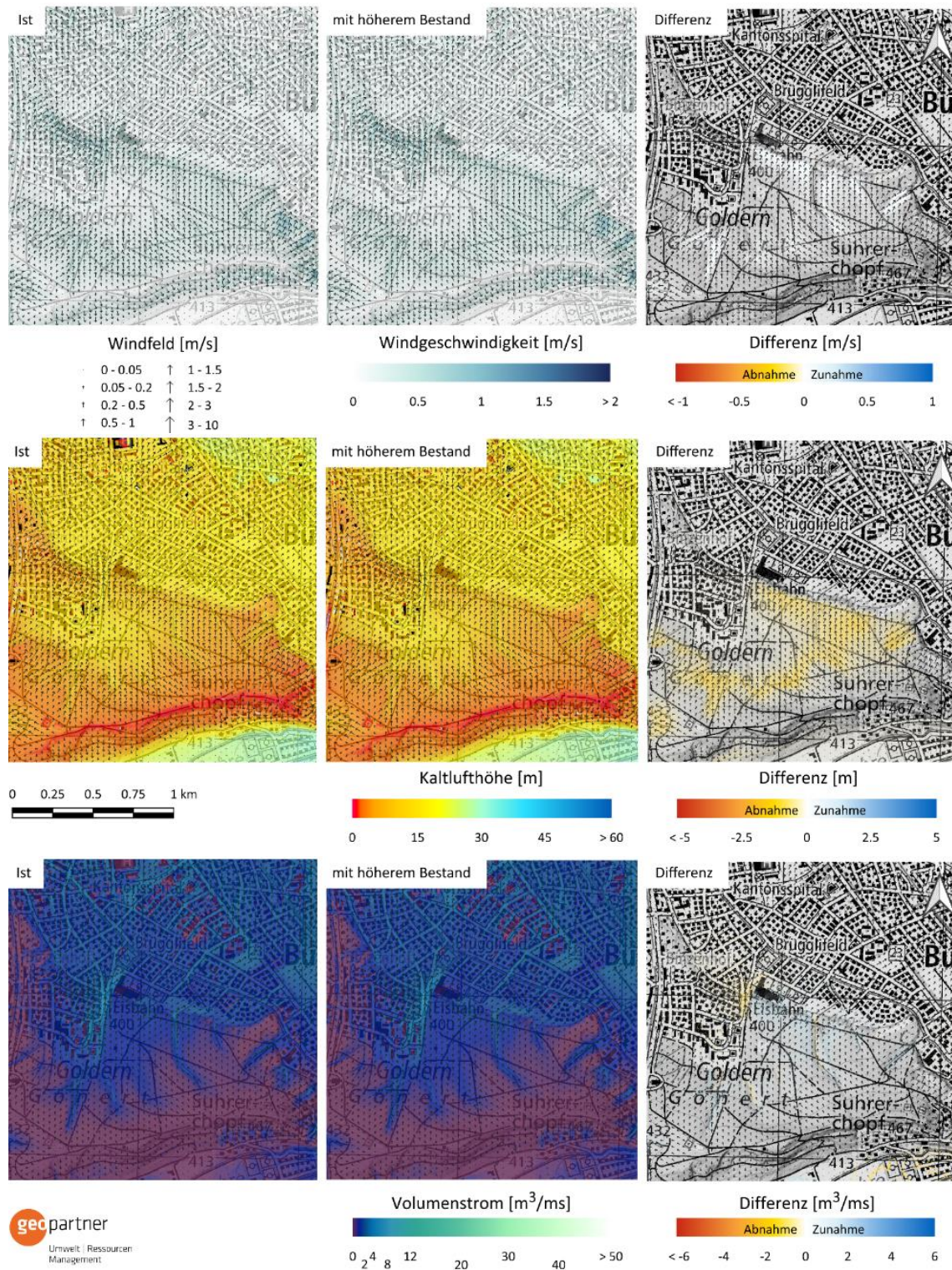


Abbildung 22: Veränderung der Kaltluftströmung aufgrund der Anhebung der mittleren Bestandshöhe im Aarauer Waldgebiet Gönert. Gezeigt sind die Windgeschwindigkeit (oben), die Kaltlufthöhe (Mitte) und der Kaltluftvolumenstrom (unten).

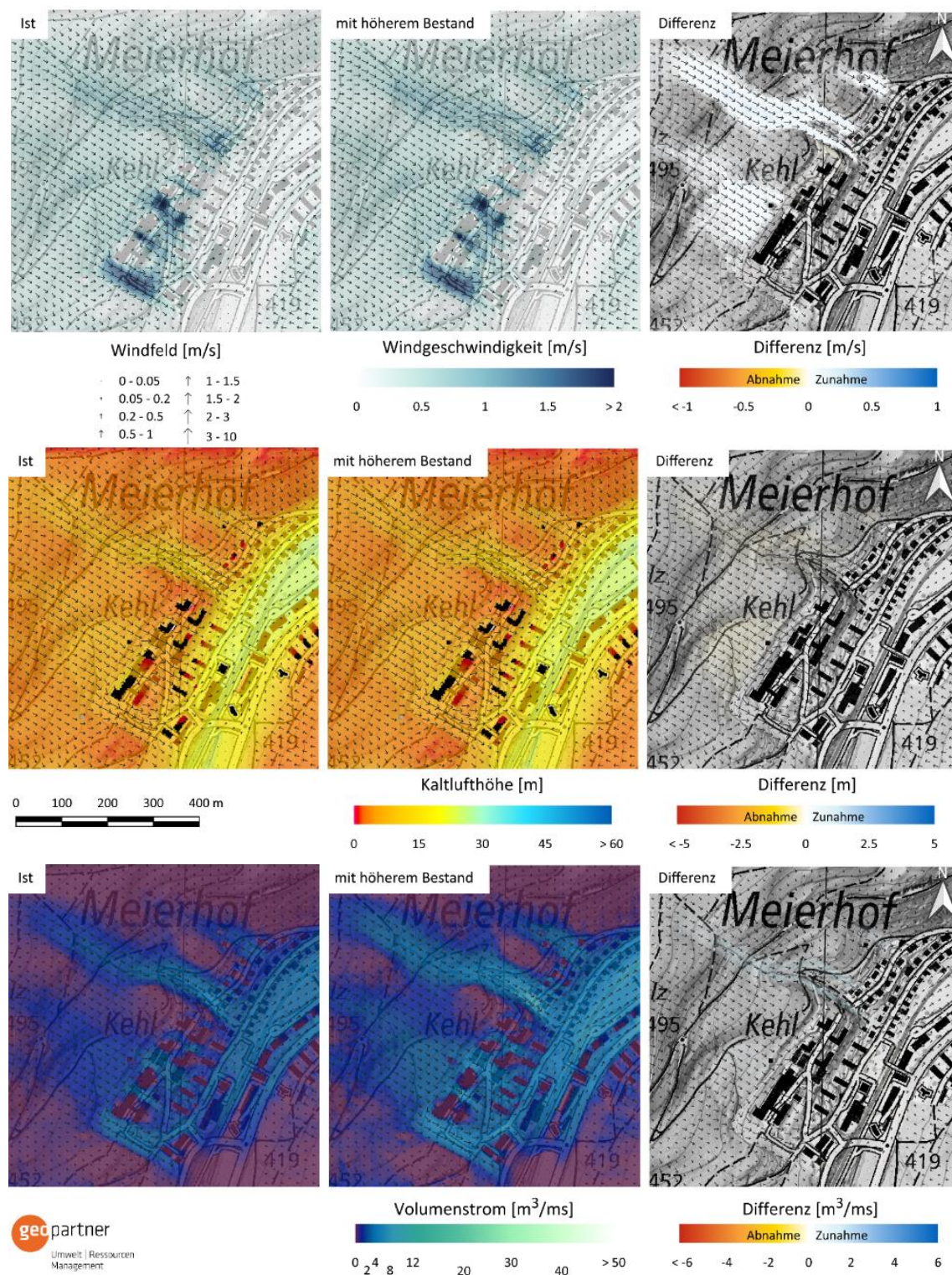


Abbildung 23: Veränderung der Kaltluftströmung aufgrund der Anhebung der mittleren Bestandshöhe in Baden Meierhof. Gezeigt sind die Windgeschwindigkeit (oben), die Kaltfluthöhe (Mitte) und der Kaltluftvolumenstrom (unten).

3.2.2.2 Lichterer Bestand

Ähnlich wie bei der Anhebung der mittleren Bestandshöhe wirkt sich die flächenhafte Reduktion der Baumdichte um 30% in erster Linie positiv auf die Kaltluftströmung innerhalb des Walds aus. Bei stark gegliedertem Gelände ist die Wirkung innerhalb von Geländeeinschnitten am deutlichsten ausgeprägt (vgl. Abbildung 25).

Wirkung innerhalb von Geländeeinschnitten am deutlichsten ausgeprägt

Bei flächenhaftem Abfluss, wie z.B. im Aarauer Waldgebiet Gönert (Abbildung 24), verteilen sich die Einflüsse eher im Gelände. Dabei kann vereinzelt beobachtet werden, dass das raschere Abfliessen der Kaltluft durch die geringere Baumdichte dazu führt, dass gewisse Kaltluftströme leicht umgelenkt werden. Das Quartier westlich der Eisbahn weist entsprechend leicht geringere Kaltluftvolumenströme auf (Abbildung 24, unten).

Flächenhafter Abfluss

Die Verringerung der Baumdichte scheint somit insgesamt einen leicht positiven Effekt auf die Kaltluftströme zu haben. Gemäss den Simulationsergebnissen ergeben sich jedoch nur im Bereich von Geländeeinkerbungen mit gebündelten Strömen und einer Aufsummierung der Effekte relevante Veränderungen. Die Veränderungen in den übrigen Bereichen sind sehr gering.

Lokal leicht positive Effekte

Wiederum gilt auch für diese waldbauliche Massnahmen, dass sich die Einflüsse maximal auf den Siedlungsrand beschränken und das grossräumige Kaltluftgeschehen der Umgebung nicht nennenswert beeinflussen.

Kein Einfluss auf Siedlungsgebiet

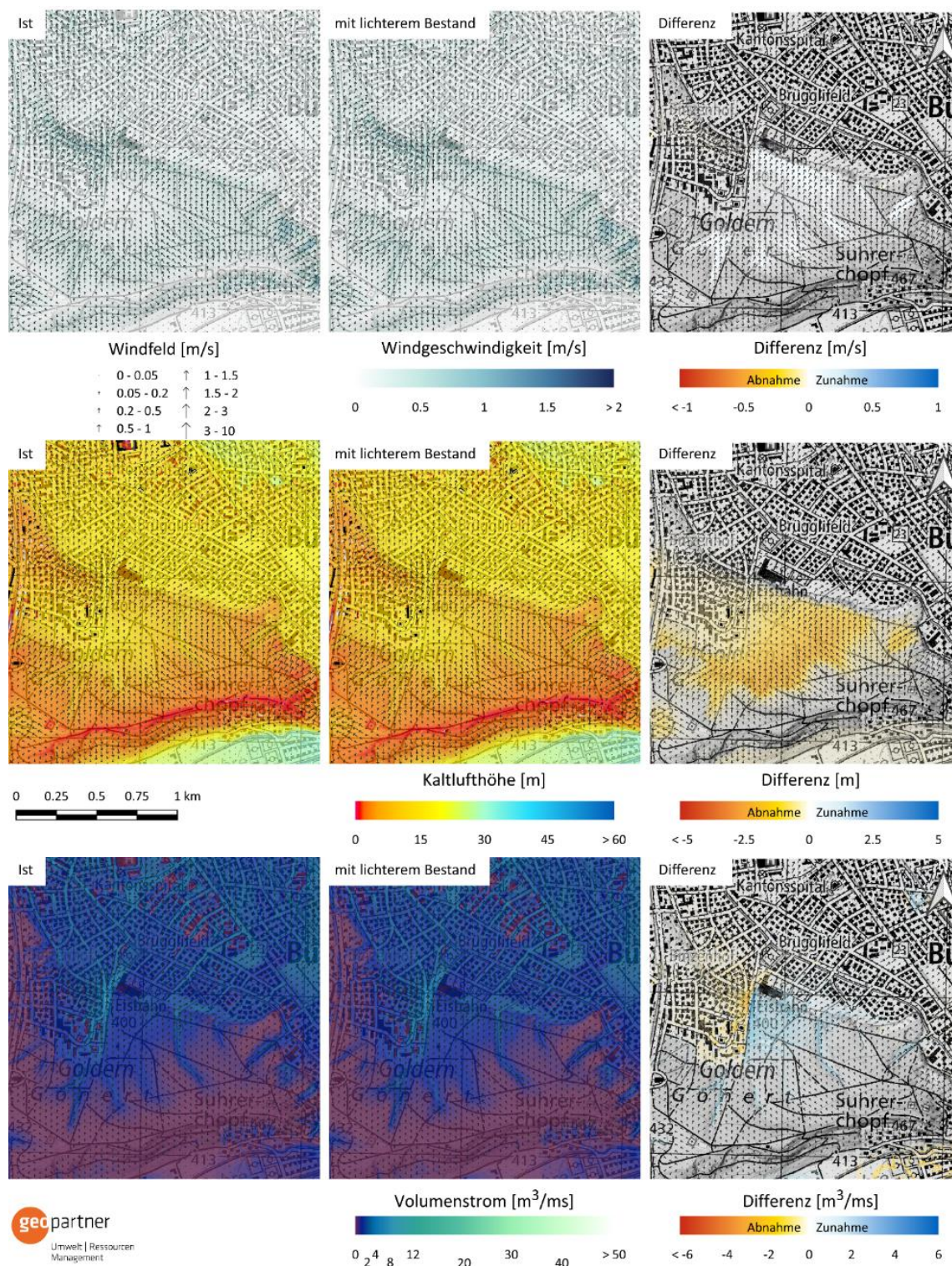


Abbildung 24: Veränderung der Kaltluftströmung aufgrund der Verringerung der mittleren Baumdichte im Aarauer Waldgebiet Gönert. Gezeigt sind die Windgeschwindigkeit (oben), die Kaltluflhöhe (Mitte) und der Kaltluftvolumenstrom (unten).

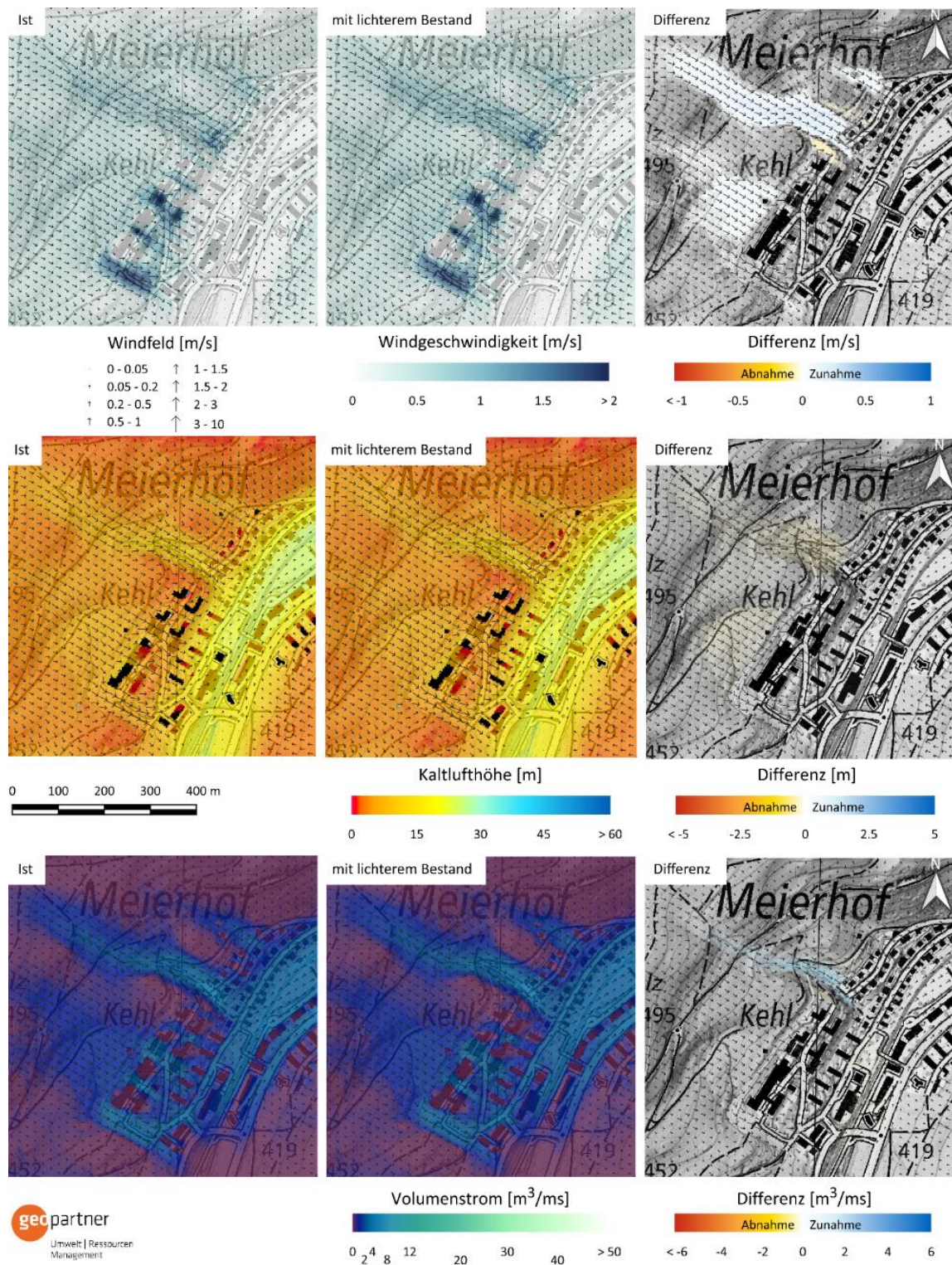


Abbildung 25: Veränderung der Kaltluftströmung aufgrund der Verringerung der mittleren Baumdichte in Baden Meierhof. Gezeigt sind die Windgeschwindigkeit (oben), die Kaltlufthöhe (Mitte) und der Kaltluftvolumenstrom (unten).

3.2.3 Thermisches Wohlbefinden in Schneisen/Verjüngungsflächen

3.2.3.1 Lufttemperatur am Tag

Die Wirkung grösserer Verjüngungsflächen auf die Lufttemperatur und den Hitzestress am Tag wurde in Kapitel 3.2.1 beschrieben. Am Beispiel von Schneisen im Wald im Gebiet Meierhof in Baden soll weiter untersucht werden, wie sich kleine Verjüngungsflächen mit frisch geräumtem Bestand auf den human-bioklimatischen Komfort am Tag auswirken.

Einfluss von Schneisen im Wald auf das Human-Bioklima

Die Lufttemperaturverteilung am Tag in Abbildung 26 zeigt deutlich, dass sich im Vergleich zum geschlossenen Baumbestand vor allem mittags bei hohem Sonnenstand deutlich höhere Lufttemperaturen innerhalb der Schneisen ergeben. Insbesondere dort, wo die offenen Schneisen an Fahrwege grenzen, nimmt die Lufttemperatur deutlich zu. Je nach Strömungsbedingungen hat dies auch einen Einfluss auf die Lufttemperatur der angrenzenden Waldstücke. Im Verlauf des Nachmittags nehmen die Unterschiede zwischen dem Wald mit und ohne Schneisen stetig ab. Sie bleiben jedoch auch bei tiefem Sonnenstand und starker Verschattung der Schneisen bestehen. Am deutlichsten ist dies bei den breiteren Schneisen feststellbar.

Deutliche Temperaturzunahme in Schneisen

Aufgrund der gewählten Anströmungsrichtung (hangaufwärts, Richtung Wald) ist unterhalb der Schneisen entlang dem Waldrand durch den reduzierten Baumbestand nur ein geringfügiger Einfluss auf die Lufttemperatur feststellbar (ca. 0.4 °C, s. Abbildung 27). Oberhalb der Schneisen, im angeströmten Bereich entlang dem Waldweg Keelweg, nimmt die Lufttemperatur mit bis zu 2.3 °C deutlich zu.

Einfluss Umgebung abhängig von Windrichtung

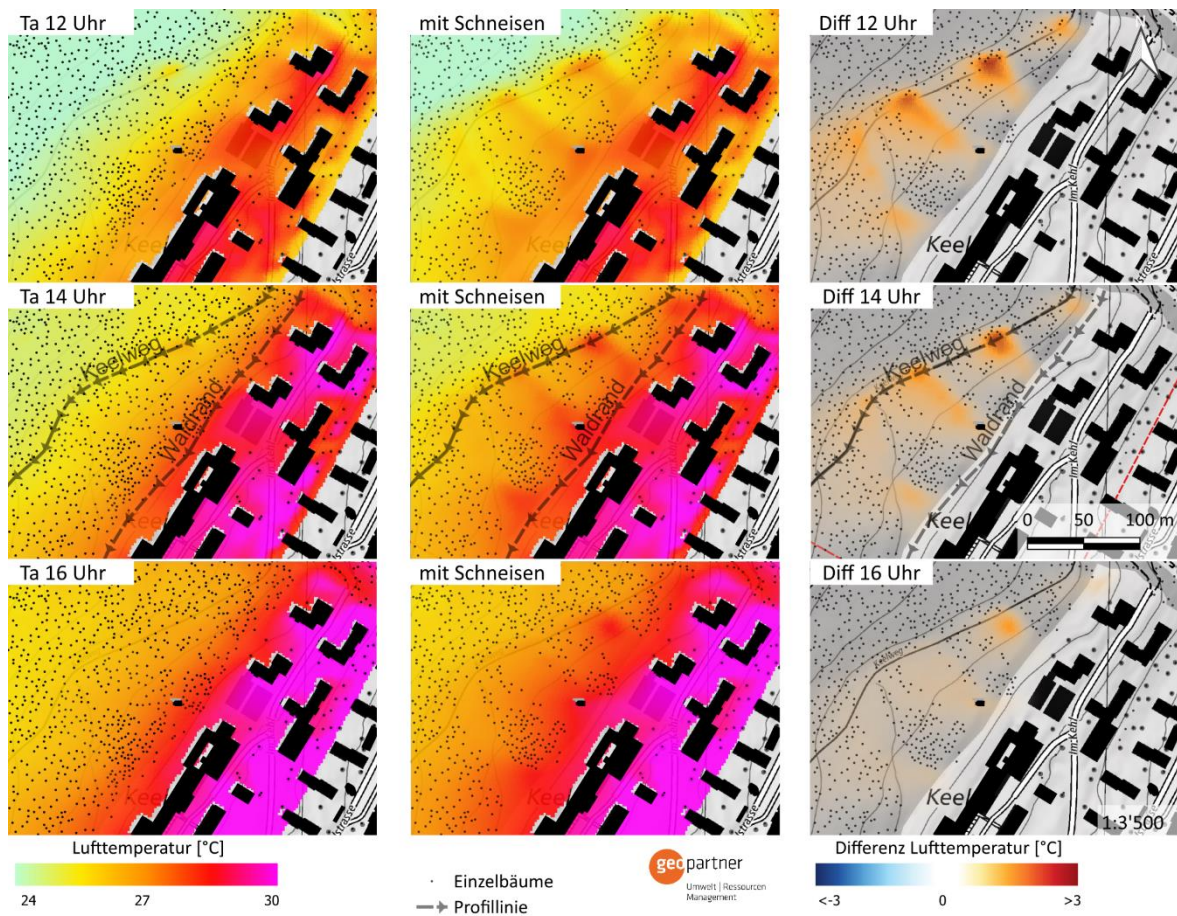


Abbildung 26: Lufttemperatur in 2 m über Grund zu unterschiedlichen Zeitpunkten an einem Sommertag in einem Waldstück mit vollständigem Baumbestand (links), vier Schneisen (Mitte) und die Differenz der beiden Zustände (rechts). Differenzen >0°C bedeuten eine Erwärmung gegenüber dem Ist-Zustand.

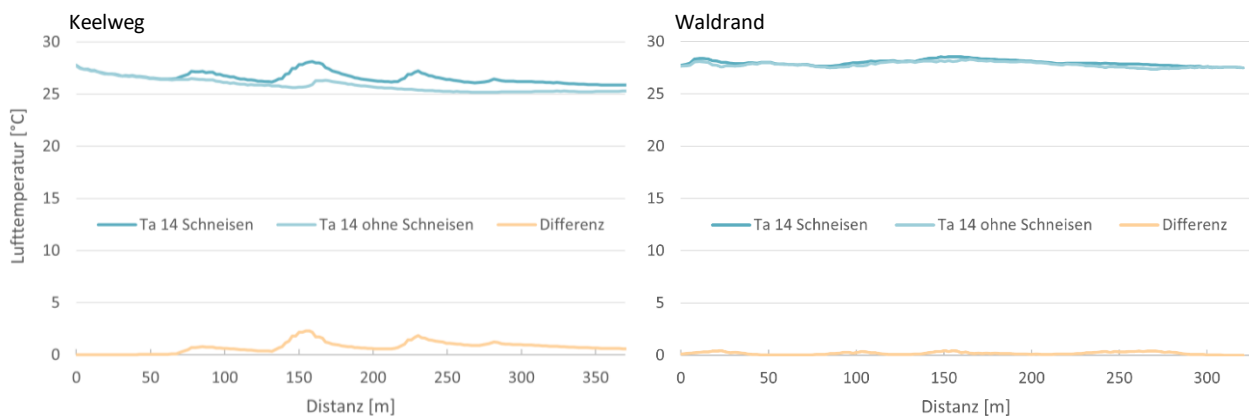


Abbildung 27: Lufttemperatur in 2 m über Grund mit und ohne Schneisen sowie die Differenz der Zustände um 14 Uhr als Profillinie entlang dem Keelweg (links, oberhalb der Schneisen) und entlang dem Waldrand (rechts, unterhalb der Schneisen; s. Abbildung 26, Mitte) an einem Sommertag in Baden, Meierhof.

3.2.3.2 Hitzestress am Tag

Der Hitzestress nimmt innerhalb der Schneisen mit frisch geräumtem Bestand an einem Sommertag deutlich zu (Abbildung 28). Zwar erreicht dieser keine vergleichbar hohen Werte wie auf offenen Freiflächen oder versiegelten Strassen, oberhalb der Schneisen wird dennoch punktuell und unterhalb der Schneisen verbreitet extremer Hitzestress simuliert. Im Verlauf des Nachmittags nimmt der Hitzestress mit einsetzender Beschattung zunehmend ab. Aufgrund der leicht höheren Lufttemperatur ist der Hitzestress zu diesem Zeitpunkt auch im Schatten noch leicht höher.

Deutlich höherer Hitzestress innerhalb Schneisen

Aufgrund der Lage des Waldes nordwestlich eines Altersheimes ist Hitzestress ein besonders sensibles Thema. Abends ist die Umgebung des Altersheimes ohne Schneisen durch den Wald verschattet (Abbildung 28, unten links). Durch das Fehlen der Bäume in den Schneisen und die dadurch fehlende Beschattungswirkung ist die Hitzestress-Zunahme zu diesem Zeitpunkt auch im unmittelbaren Umkreis des Altersheimes spürbar (Abbildung 28, unten).

Beschattung abends beeinflusst

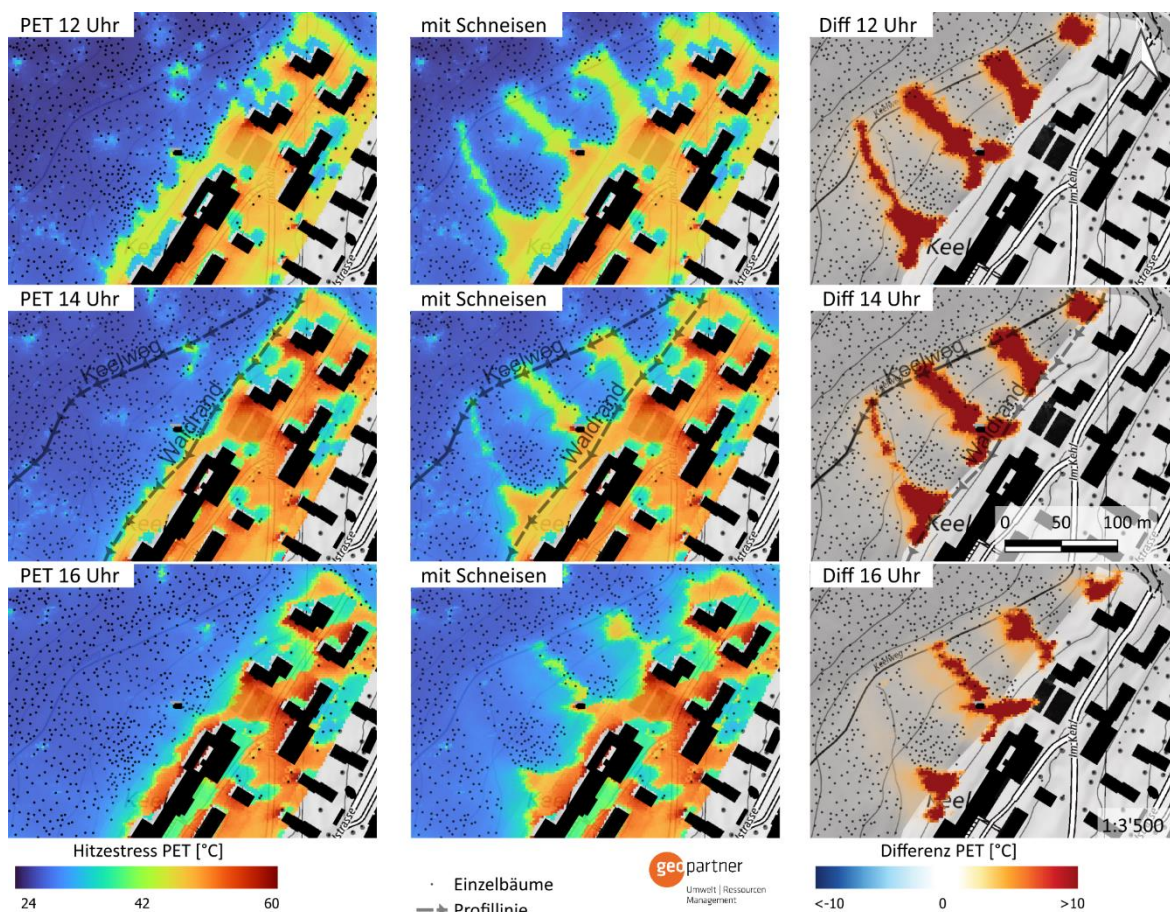


Abbildung 28: Hitzestress als PET in 2 m über Grund zu unterschiedlichen Zeitpunkten an einem Sommertag in einem Waldstück mit vollständigem Baumbestand (links), vier Schneisen (Mitte) und die Differenz der beiden Zustände (rechts). Differenzen >0°C bedeuten eine Zunahme der PET gegenüber dem Ist-Zustand.

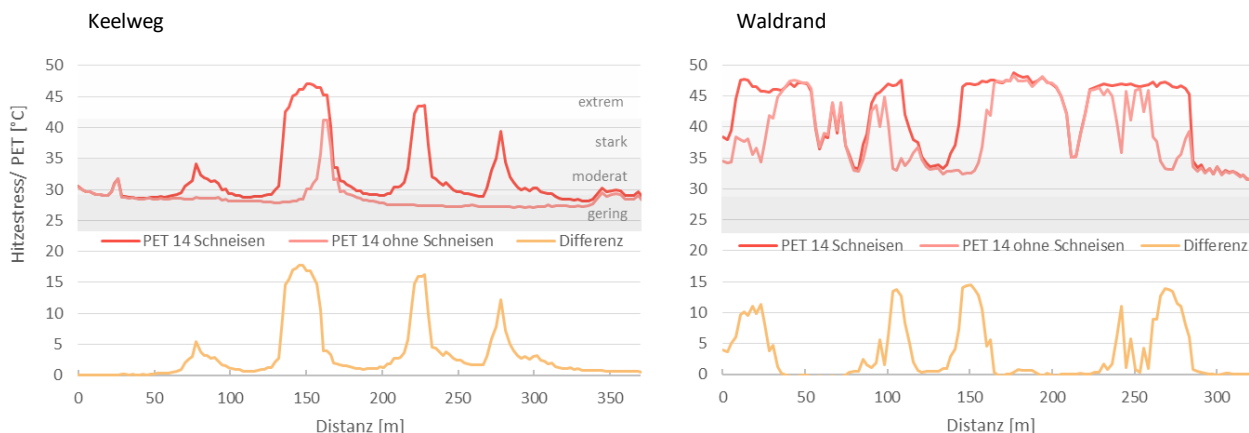


Abbildung 29: Hitzestress als PET in 2 m über Grund mit und ohne Schneisen sowie die Differenz der Zustände (mit Schneisen minus ohne Schneisen) um 14 Uhr als Profillinie entlang dem Keelweg (links, oberhalb der Schneisen) und entlang dem Waldrand (rechts, unterhalb der Schneisen; s. Abbildung 28, Mitte) an einem Sommertag in Baden, Meierhof.

Die Zunahme des Hitzestresses aufgrund der Baumfällungen beträgt um 14 Uhr verbreitet 10-15 °C PET, wobei entlang dem Keelweg sogar eine Zunahme von 18 °C PET erreicht wird (Abbildung 29).

Grössenordnung

3.2.4 Nächtlicher Kaltluftabfluss in Schneisen/Verjüngungsflächen

3.2.4.1 Unbewachsen (Verjüngungsflächen)

Die Kaltluftabflusssimulation mit frisch geräumten Schneisen im Wald zeigt, dass die Windgeschwindigkeit innerhalb der Schneisen und im Bereich des Waldrandes im Vergleich zur Simulation ohne Schneisen spürbar zunimmt (Abbildung 30, oben). Dieser Effekt kann jedoch in einigen Metern Entfernung zum Waldrand bereits nicht mehr nachgewiesen werden.

Einfluss lokal

Durch die tiefere Rauigkeit und die dadurch geringere Hinderniswirkung innerhalb der Schneisen nimmt die Windgeschwindigkeit zu. In den umliegenden Waldgebieten nimmt diese jedoch auch leicht ab. Die Schneisen drainieren somit quasi den umliegenden Wald, da die Luft im geräumten Bereich besser abfließen kann. Die Kaltluflhöhe innerhalb der Schneisen ist zudem geringer, da die Kaltluft schneller abfließt und weniger gestaut wird (Abbildung 30, Mitte).

Tiefere Rauigkeit als Ursache für höhere Windgeschwindigkeiten

Gleiches wie für die Windgeschwindigkeit gilt auch für den Kaltluftvolumenstrom. Dieser nimmt nur innerhalb und am Rand der Schneisen zu. Eine bessere Versorgung der Siedlungsgebiete mit nächtlicher Kaltluft kann dadurch im Modell nicht nachgewiesen werden (Abbildung 30, unten).

Volumenströme analog Windgeschwindigkeit

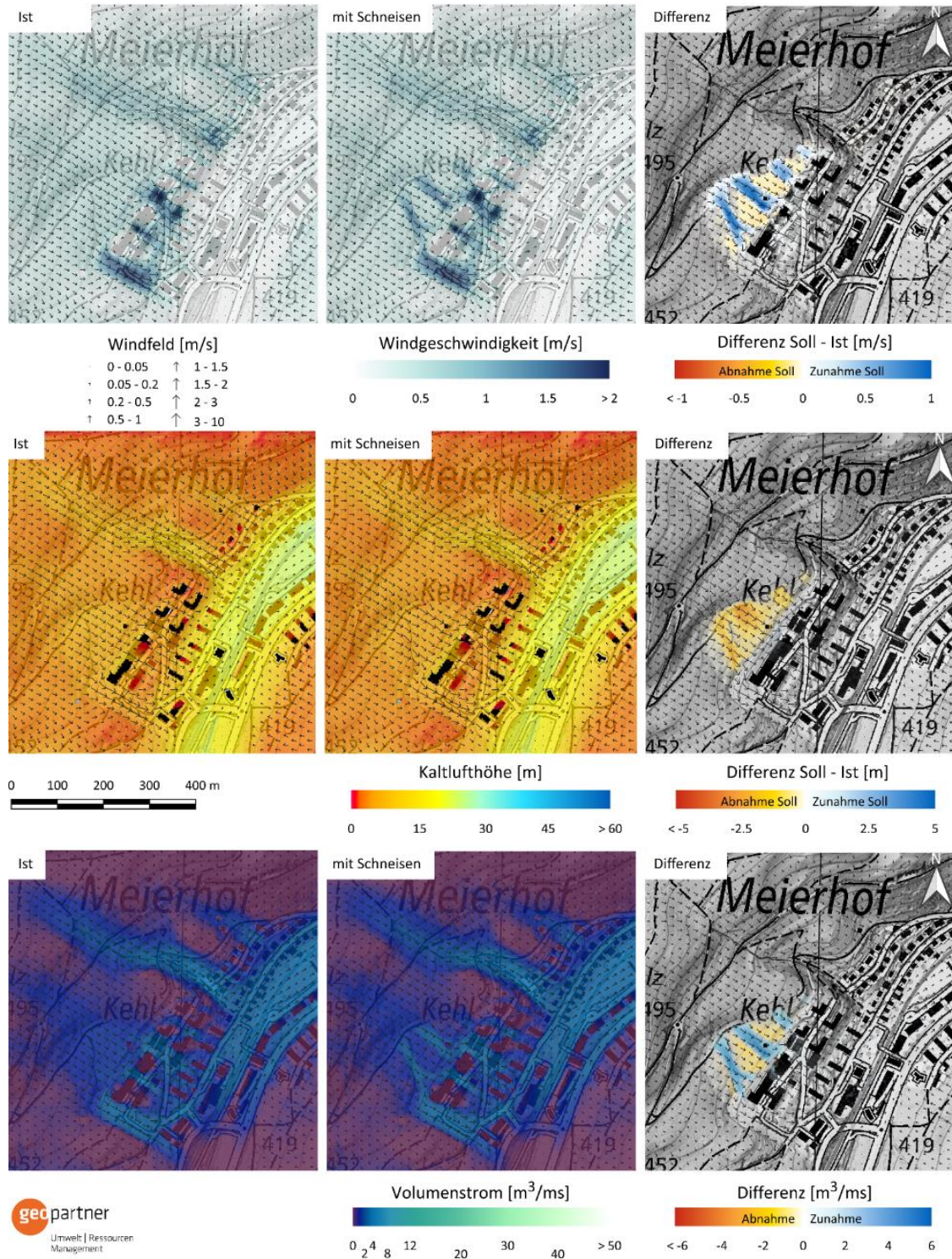


Abbildung 30: Windgeschwindigkeit (oben), Kaltlufthöhe (Mitte) und Kaltluftvolumenstrom (unten) für den Zustand mit geschlossenem Waldbestand (links), mit gezielten Schneisen analog Waldbewirtschaftung Stadt Baden (Mitte) und die Differenz der beiden Zustände (mit Schneisen minus ohne Schneisen; rechts).

3.2.4.2 Schneisen mit geringem Bewuchs (Strauchschicht)

Durch die Simulation eines stärkeren Bewuchses innerhalb der Schneisen mittels Erhöhung der dortigen Rauigkeit werden die in Kapitel 3.2.4.1 beschriebenen Effekte leicht reduziert, sind aber noch immer erkennbar. Bei höherer Rauigkeit kann die Kaltluft weniger rasch abfliessen. Folglich nimmt der Volumenstrom weniger stark zu und die Kaltlufthöhe nimmt weniger stark ab, im Vergleich zur Situation mit frisch geräumtem Bestand.

Leichte Reduktion mit geringem Bewuchs

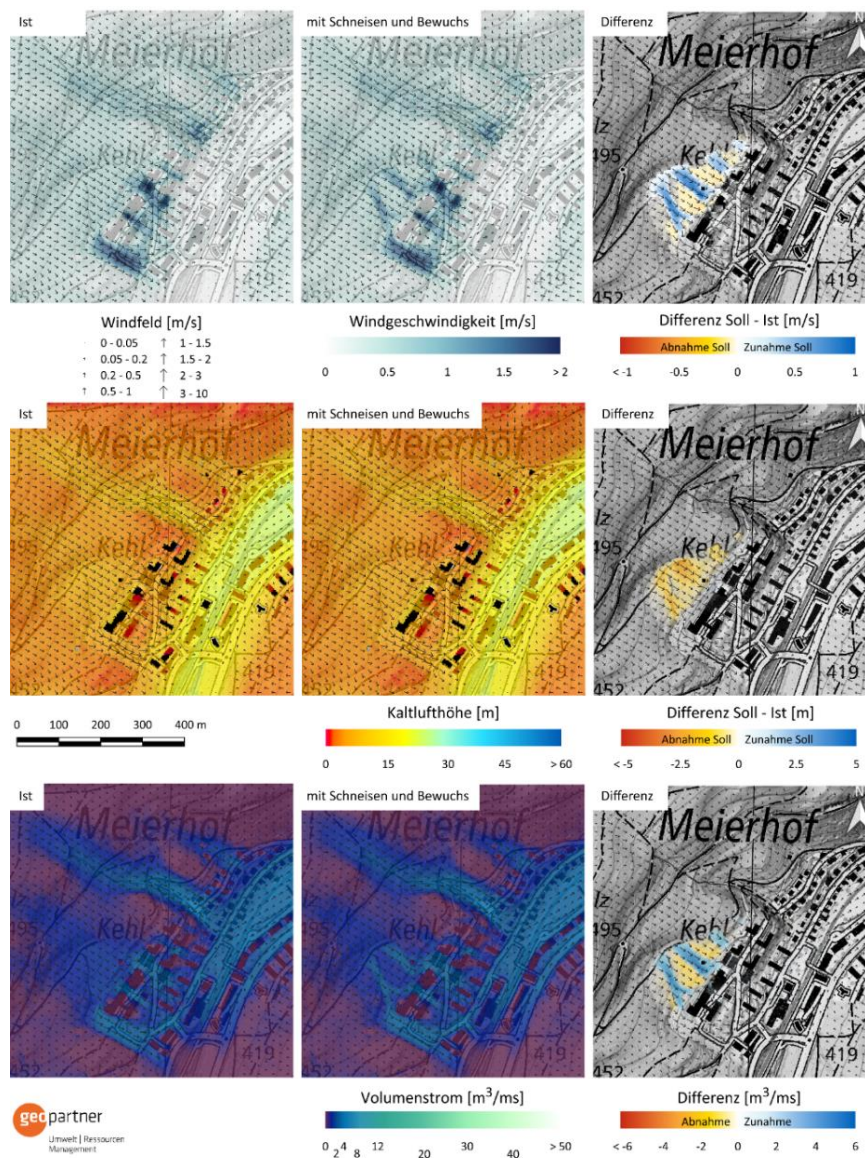
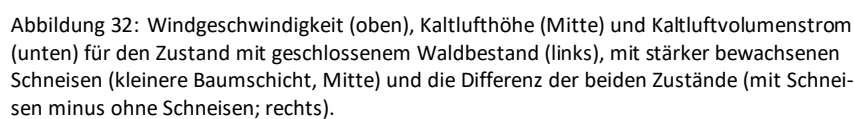


Abbildung 31: Windgeschwindigkeit (oben), Kaltlufthöhe (Mitte) und Kaltluftvolumenstrom (unten) für den Zustand mit geschlossenem Waldbestand (links), mit leicht bewachsenen Schneisen (Krautschicht, Mitte) und die Differenz der beiden Zustände (mit Schneisen minus ohne Schneisen; rechts).

Weitere Erhöhung der Rauigkeit

Weitere Erhöhung der Rauigkeit



3.2.5 Mechanismen ausserhalb des Waldes

3.2.5.1 Fussweg zum Wald

Die relativ dicht gesetzte Baumreihe entlang dem Zugangsweg zwischen dem Aarauer Quartier Brügglifeld und dem Waldgebiet Gönert zeigt vor allem bezogen auf den Hitzestress einen markanten Effekt (Abbildung 33, unten und Abbildung 34, rechts). Dank des dichten Kronendachs sinkt der empfundene Hitzestress aufgrund der fehlenden direkten Sonneneinstrahlung deutlich. Der Hitzestress kann dadurch annähernd auf das gleiche Niveau wie im Wald gesenkt werden.

Sehr markanter Effekt von Baumreihe auf Hitzestress

Auf die Lufttemperatur hat die Baumreihe einen geringen Effekt (Abbildung 33, oben und Abbildung 34, links). Diese nimmt nur leicht ab (bis -0.7°C), da die Baumreihe schmal ist und mit der näheren Umgebung ständig Luft ausgetauscht wird, welche sich z.B. über einem offenen Feld stärker aufheizen kann.

Geringer Einfluss auf Lufttemperatur

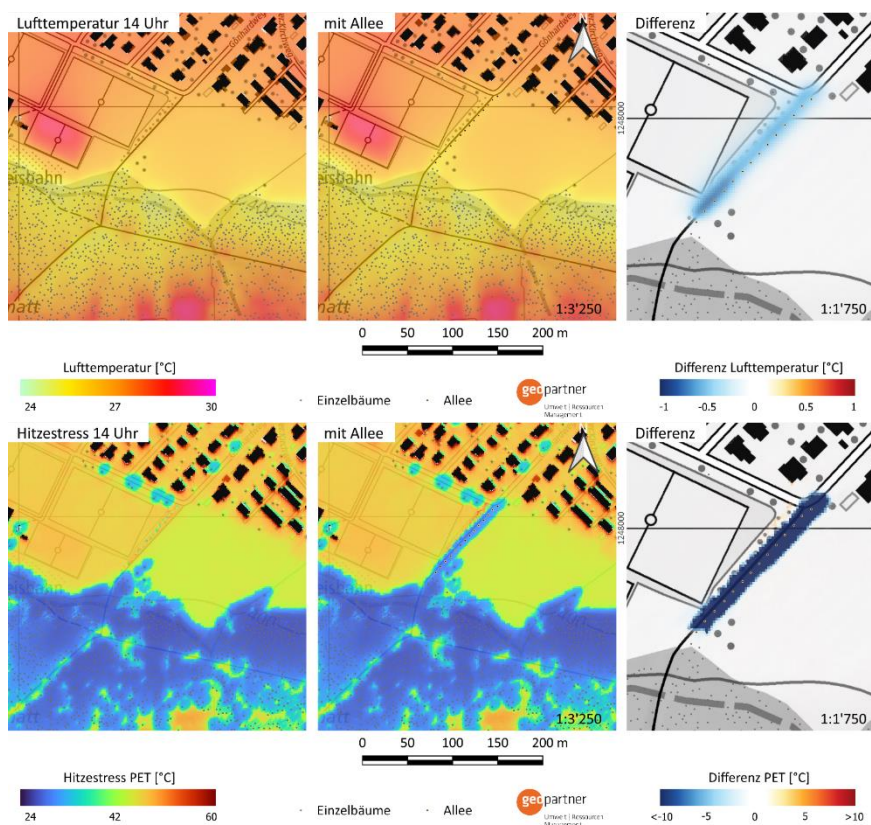


Abbildung 33: Lufttemperatur (oben) und PET (Hitzestress, unten) in 2 m über Grund an einem Sommertag ohne (links) und mit Beschattung des Zugangsweges (Allee) vom Siedlungsgebiet zum Aarauer Waldgebiet Gönert sowie die Differenz der beiden Zustände (mit Beschattung minus Ist; rechts) um 14 Uhr.

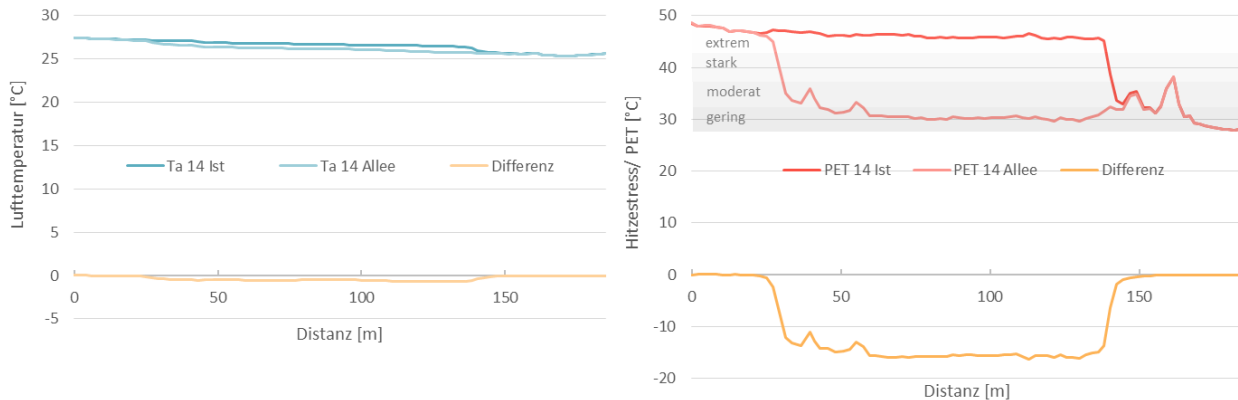


Abbildung 34: Veränderung der Lufttemperatur (Ta, links) und der PET (Hitzestress, rechts) in 2 m über Grund an einem Sommertag durch die Beschattung des Zugangsweges (Allee) vom Siedlungsgebiet zum Aarauer Waldgebiet Gönert sowie die jeweilige Differenz der beiden Zustände (mit Beschattung minus Ist) um 14 Uhr.

3.2.5.2 Einflussbereich Waldklima

Anhand der Simulationsergebnisse lässt sich der Einflussbereich des Waldes auf den Siedlungsraum abschätzen. Die temperatursenkende Wirkung des Waldes beschränkt sich dabei auf das unmittelbare Waldrandgebiet. Ab einer Distanz von ca. 50 m ist kein Einfluss mehr feststellbar (vgl. Abbildung 15 oder Abbildung 33). Dies ist so, obwohl die Windrichtung so gewählt wurde, dass die Luft vom Wald in Richtung Siedlungsgebiet strömt. Um realistische Bedingungen eines Sommertags zu berücksichtigen, wurde die Windgeschwindigkeit auf schwache 1 m s^{-1} gesetzt.

Einfluss auf Waldrandbereiche beschränkt

Die Temperaturabnahme vom Siedlungsgebiet zum Wald ist in Abbildung 35 dargestellt. Die Differenz der Lufttemperatur auf diesem kleinen Ausschnitt beträgt maximal 2 °C zwischen Siedlungsraum und Wald. Über dem Landwirtschaftsland und dem Siedlungsgebiet nimmt die Lufttemperatur linear ab. Sprunghafte Abnahmen treten jeweils im Übergangsbereich einer Flächenveränderung auf. So ist z.B. kurz vor dem Waldrand eine sprunghafte Abnahme von ca. 0.3 °C zu erkennen. Ein deutlicher Einfluss der temperatursenkenden Wirkung des Waldes ins Siedlungsgebiet lässt sich anhand der Profildaten nicht feststellen. Es findet eher ein Vermischen der unterschiedlichen Temperaturwerte von Luft aus dem Wald, Luft über dem Landwirtschaftsland und der Bestandsluft im Siedlungsgebiet statt. Dies führt jeweils in den Übergangsbereichen zu einem schwachen, linearen Anstieg der Lufttemperatur (in Windrichtung).

Lineare Temperaturabnahme

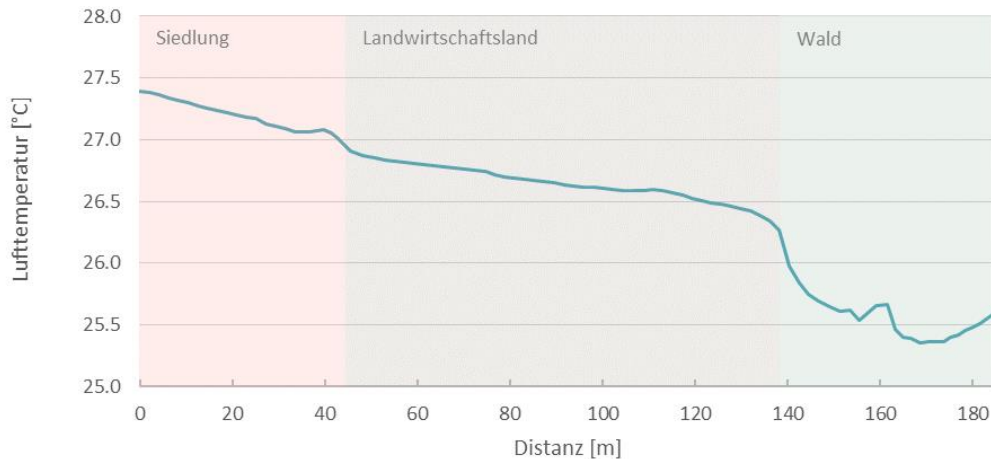


Abbildung 35: Lufttemperatur in 2 m über Grund an einem Sommertag vom Siedlungsgebiet zum Aarauer Waldgebiet Gönert um 14 Uhr.

Um zu beurteilen, wie wertvoll direkt angrenzender Wald für das Siedlungsgebiet sein kann, wurde eine Simulationsstudie durchgeführt, bei der die Freifläche zwischen Gönert und Siedlungsraum mit Wald analog dem vorhandenen Wald im Gönert aufgefüllt wird. Das Beispiel ist rein fiktiv, um die Kühlwirkung des direkt angrenzenden Waldes gegenüber dem Einfluss des angrenzenden Landwirtschaftslandes aufzuzeigen und auch die Grenzen der Kühlwirkung auszuloten. Dafür wurde die Windrichtung im Modell wiederum vom Wald ins Siedlungsgebiet eingestellt.

Test Wald näher an Siedlung

Abbildung 36 mit den Resultaten der Simulation zeigt, dass eine markante Kühlwirkung am Tag innerhalb des Siedlungsgebiets nur in den Waldrandbereichen entlang der vordersten Häuserreihe auftritt. Ein Einfluss auf die Lufttemperatur von $>0.6^{\circ}\text{C}$ kann in 30-40 m Entfernung noch wahrgenommen werden. Werte bis maximal 0.3°C Abkühlung können im Idealfall bis maximal ca. 120-130 m festgestellt werden. Je nach Bebauungstyp nimmt der Einfluss aber deutlich rascher ab. Insbesondere bei dichter Bebauung entlang dem Waldrand ist der Einflussbereich stark eingeschränkt. Die Wirkung schwächt sich im Verlaufe des Nachmittags ab.

Einwirkung maximal 100 m

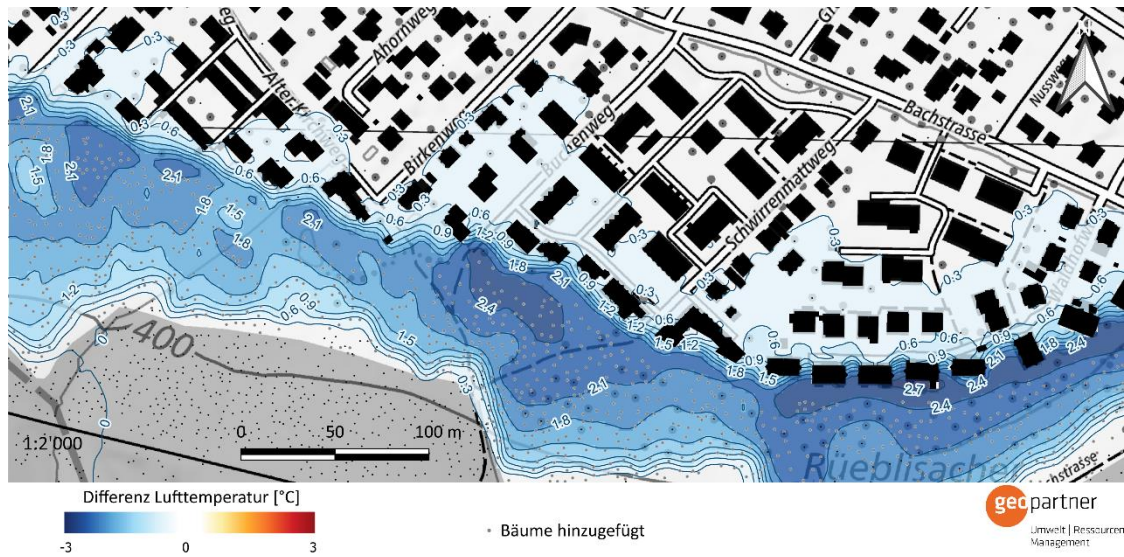


Abbildung 36: Differenz der Lufttemperatur am Mittag im Vergleich zwischen der Simulation im Ist-Zustand und einer Variante mit zusätzlichen Bäumen (Vzb) zwischen Wald und Siedlungsgebiet (graue Punkte; Vzb minus Ist).

3.3 Diskussion der Kühlwirkungsmechanismen gemäss Simulationen

3.3.1 Mechanismen am Tag

Gemäss der Literaturstudie wird dem Wald als Entlastungsraum der entscheidende Kühlwirkungsmechanismus am Tag zugeschrieben (Kapitel 2.2.1). Die Simulationen bestätigen eindeutig die Erkenntnisse, dass die tagsüber niedrigeren Temperaturen innerhalb des Waldes und die starke Beschattung einen grossen Naherholungswert für die Bevölkerung bieten (Kapitel 3.2.1.1 und 3.2.1.2). Ab einem gewissen Überschirmungsgrad ergeben sich gemäss Simulationen innerhalb eines Waldgebiets im Mittel keine markanten Verbesserungen mehr. Je nach Verteilung, Grösse und Kronendurchmesser können auch in einem lichterem Bestand sehr angenehme Klimata entstehen. Kleine Lücken im Bestand haben zwar punktuell Auswirkungen auf das physiologische Empfinden, trotzdem kann das Waldklima noch als solches wahrgenommen werden und unterscheidet sich deutlich vom Freiland oder von Siedlungsflächen. Erst grössere Verjüngungsflächen führen zu sehr starkem und flächendeckendem Hitzestress (Kapitel 3.2.1.2). Wie stark der Hitzestress ausfällt, ist auch davon abhängig, ob die Verjüngungsfläche frisch geräumt wurde, oder ob sie Jungwuchs und einzelne stehengelassene, grossgewachsene Bäume (Überhälter) aufweist, welche punktuell Schattenflächen erzeugen (Kapitel 3.2.1.3).

Wichtige Naherholungsfunktion

Auch bei optimaler Anströmung wurde kein substanzieller Einfluss der kühlen Waldluft auf das Siedlungsgebiet am Tag gefunden (Kapitel 3.2.5.2). Rasch wird die Lufttemperatur von der Oberflächengestaltung der direkten Umgebung beeinflusst. Entscheidend ist daher vor allem die Landnutzung zwischen Wald und Siedlung, welche die Lufttemperatur modifiziert, und so in Randbereichen des Siedlungsraums einen Einfluss hat. Eine systematische Ausgleichströmung aus dem Wald in das angrenzende Siedlungsgebiet, vergleichbar zu den Kaltluftströmen in der Nacht, wird vom Modell nicht berechnet.

Geringer Einflussbereich

Auch dem Waldrand kann eine besondere Bedeutung als Entlastungsraum zugewiesen werden. Insbesondere die beschatteten Gebiete und diejenigen Bereiche, welche von der Waldluft direkt beeinflusst sind, profitieren vom Waldklima. Auch in Waldrandbereichen können so wertvolle Entlastungsräume entstehen. Entscheidend ist jedoch deren Lage, denn südliche und westliche Waldränder sind nachmittags sonnenexponiert und weisen aufgrund der Strahlungsreflexion an den Blattoberflächen des Waldrands eine starke solare Strahlungslast auf (s. auch Kapitel 2.1.2.3). Im Waldrandbereich ist das Vorhandensein von grosskronigen Waldbäumen für die Beschattung und Kühlwirkung entscheidend.

Waldrandbereiche

Die Erkenntnisse aus der Literaturstudie werden durch die Simulationen bestätigt. Die entscheidende Wirkung des Waldes am Tag ist somit seine Funktion als Entlastungsraum. Ein dichteres Kronendach führt bis zu einem gewissen Grad zu einem stetig angenehmeren Waldklima. Bei grösseren Freiflächen mit frisch geräumtem Bestand kann derweil nicht mehr von «Waldklima» gesprochen werden. Ein positiver Einfluss auf die nähere Umgebung ausserhalb des Waldes kann höchstens in den Waldrandgebieten festgestellt werden.

Erkenntnisse aus Literaturstudie mit Simulationen bestätigt

3.3.2 Mechanismen in der Nacht

Auch für die nächtliche Kaltluftproduktion werden die Erkenntnisse aus der Literaturstudie durch die Simulationen mehrheitlich bestätigt. Den markantesten Einfluss hat der Wald als lokales Steuerungselement der Strömung. Der Kaltluftvolumenstrom kann durch Anpassungen am Waldbestand nur geringfügig verändert werden. Die grössere Kaltluftmächtigkeit im Wald kommt durch die stärkere Hindernis- und Stauwirkung zustande und bedeutet keine Steigerung der produzierten Kaltluftmenge. Auf die weitere Umgebung werden im Rahmen der getesteten Massnahmen keine wesentlichen Einflüsse festgestellt (Kapitel 3.2.2 und 3.2.4).

Kein wesentlicher Einfluss auf Kaltluftproduktion

Eine der untersuchten waldbaulichen Massnahmen bezieht sich auf die Wirkung von Waldschneisen auf das Kaltluftgeschehen (Kapitel 3.2.4). Mit den Simulationen kann nachgewiesen werden, dass die Windgeschwindigkeit des Kaltluftstroms innerhalb und am Rand der Schneisen zunimmt. Die Effekte treten jedoch sehr lokal auf, und es kann kein Einfluss auf die weitere Umgebung sowie das nahegelegene Siedlungsgebiet festgestellt werden. Die Schneisen könnten maximal dazu dienen, Kaltluftströme lokal leicht zu lenken, nicht aber diese nachhaltig zu verstärken oder eine Vergrösserung des Einwirkungsbereichs zu induzieren.

Lokale Effekte durch Schneisen

Ähnliches gilt für die Untersuchung unterschiedlicher Waldbewirtschaftungssysteme. Mit punktuellen Verjüngungsschlägen und der daraus resultierenden Reduktion der Baumdichte könnten Kaltluftströme lokal so gesteuert werden, dass gewisse Gebiete leicht besser mit nächtlicher Kaltluft versorgt werden. Effektiver sind solche Massnahmen in Waldgebieten, welche aufgrund der Geländeeigenschaften bereits Kaltluft bündeln. Der Einflussbereich solcher Massnahmen ist jedoch ebenfalls lokal begrenzt und die absoluten Unterschiede sind gering.

Potenzial der Steuerung von Kaltluftströmen

Die Simulationsstudie liefert daher keine neuen Erkenntnisse zur Kaltluftproduktion unterschiedlicher Waldbestände. Auch markante Anpassungen an den Charakteristika der jeweiligen Waldgebiete führen nicht zu substantiellen Veränderungen der Kaltluftströme. Hierfür wären grossflächige Landnutzungsänderungen notwendig. Wie bereits im Rahmen der Literaturstudie vermutet, übersteuert die Topografie auch in der Simulation die Anpassungen an den Waldbeständen. Um weitere Erkenntnisse zur produzierten Kaltluftmenge unterschiedlicher Waldbestände zu gewinnen, wären grossangelegte Messstudien und/oder Weiterentwicklungen an bestehenden Modellen notwendig.

Keine neuen Erkenntnisse durch Simulation, aber Bestätigung der Literaturstudie

3.3.3 Bewertung der Mechanismen

Wie bereits in der Literaturstudie herausgearbeitet, können die unterschiedlichen Prozesse bezüglich der Wälder am Tag und in der Nacht nicht direkt verglichen werden (Kapitel 2.2.3). Gleichermassen können auch keine direkten Vergleiche der Lufttemperatur am Tag und in der Nacht angestellt werden, da das thermische Wohlbefinden zu beiden Tageszeiten von unterschiedlichen Faktoren bestimmt wird und sich die Exposition unterschiedlich ist.

Betrachtet man die Wirkung des Waldes auf die Lufttemperatur am Tag an verschiedenen Orten, treten markante Unterschiede auf. Die Lufttemperatur ist in dichten Waldgebieten bis zu 4 °C tiefer als im Siedlungsgebiet oder auf offenen Freiflächen. Die Differenz von 4 °C ist beachtlich und deutlich wahrnehmbar. In kleinen Lichtungen beträgt die Differenz noch etwa 2 °C. Im Waldrandgebiet beträgt die temperatursenkende Wirkung noch etwa 1 °C.

Grosse, frisch geräumte Verjüngungsflächen können sich unter Umständen in einem ähnlichen Masse erwärmen wie Siedlungsgebiete im Allgemeinen oder offene Freiflächen. Mit Jungwuchs und mit einzelnen stehengelassenen Altbäumen erwärmen sich Verjüngungsflächen deutlich weniger stark als frisch geräumte Flächen.

Bezogen auf den Hitzestress ist die Wirkung des Waldes noch deutlicher. Der Hitzestress nimmt im Wald im Vergleich zum Siedlungsgebiet oder offenen Flächen als Kombination der reduzierten solaren Einstrahlung, geringeren Strahlungsflüssen durch langwellige Strahlung sowie der starken Reduktion der Lufttemperatur um 10-15 °C PET ab. Damit wird der Hitzestress um ein bis zwei Klassen gesenkt. Das bedeutet, dass z.B. bei einem starken Hitzestress von >35 °C PET im Siedlungsgebiet die human-bioklimatischen Bedingungen innerhalb des Waldes als leicht warm mit geringem Hitzestress wahrgenommen werden.

Der Einfluss von Wäldern respektive waldbaulichen Massnahmen auf die Mechanismen in der Nacht ist unwesentlich und kaum wahrnehmbar. Einzig die Schneisen haben in den Randgebieten, aber nicht darüber hinaus, einen wahrnehmbaren Effekt. Demgegenüber können Lufttemperatur und Hitzestress innerhalb von Verjüngungsflächen mit frisch geräumtem Bestand stark zunehmen. Der Nutzen der Massnahmen für die nächtliche Kaltluftproduktion kann dies bei weitem nicht aufwiegen.

Tabelle 8 zeigt die qualitative Bewertung der verschiedenen Prozesse bezogen auf die untersuchten Szenarien. Daraus wird erneut die Funktion des dichten Waldes mit geschlossenem Kronendach für die entlastende, erholsame Wirkung am Tag als wichtigster Kühlwirkungsmechanismus deutlich.

Differenzierte Betrachtung von Prozessen in der Nacht und am Tag

Wirkung des Waldes auf Lufttemperatur am Tag

Einfluss frisch geräumter Bestand

Wirkung des Waldes auf Hitzestress am Tag

Wirkung des Waldes auf nächtliche Kaltluft

Zusammenfassende Bewertung

Tabelle 8: Bewertung der Kühlwirkungsmechanismen des Waldes innerhalb der unterschiedlichen Szenarien, bezogen auf einen Standardwald im jeweiligen Modell.

Szenarien	Kühlwirkungsmechanismus Tag		Kühlwirkungsmechanismus Nacht
Waldbestand	Jungwald/Freifläche	Geringe Kühlwirkung von Jungwald Hitze stress auf Freiflächen erhöht	Lokal spürbar Kaltluftabfluss erhöht
	Bestand in Optimalphase	Sehr gute Kühlwirkung	Kaltluftproduktion entspricht Referenzzustand
	Alter Bestand	Sehr gute Kühlwirkung	Kaltluftproduktion entspricht Referenzzustand
	Stufiger Bestand	Gute Kühlwirkung	Leicht besserer Kaltluftabfluss
Schneisen	Ohne Bewuchs	Hitze stress erhöht	Lokal spürbar leicht erhöhter Kaltluftabfluss
	Schneise mit Strauchschicht	Hitze stress erhöht	Lokal spürbar leicht erhöhter Kaltluftabfluss
	Schneise mit kleinerer Baum schicht	Geringe Kühlwirkung	Kaum Einfluss
Zugang Wald	Fussweg zum Wald mit Allee	Gute Kühlwirkung	Nicht bewertbar

Bewertungsskala:

Gegenteiliger Effekt: Thermisches Wohlbefinden wird schlechter (Erhöhung Hitze stress) gegenüber dem Referenzwald im Modell.

Unwesentlich/gering: Thermisches Wohlbefinden wird nicht beeinflusst/verbessert, Massnahmen verändern die Wirkung um weniger als 5% gegenüber dem Referenzwald im Modell.

Mässig/gut: Thermisches Wohlbefinden wird mässig beeinflusst/verbessert, Massnahmen verändern die Wirkung zwischen 5 und 30% gegenüber dem Referenzwald im Modell.

Wesentlich/sehr gut: Thermisches Wohlbefinden wird wesentlich beeinflusst/verbessert, Massnahmen verändern die Wirkung um mehr als 30% gegenüber dem Referenzwald im Modell.

3.3.4 Spezifische Fragestellungen

3.3.4.1 Nutzen von Wäldern für Kaltluftproduktion in der Nacht

Das Modell bestätigt die Erkenntnisse aus der Literaturstudie. Die Wälder weisen im Vergleich zu Freiflächen eine geringere Kaltluftproduktion sowie eine grössere Hinderniswirkung auf. Die Kaltluft höhe ist in Wäldern grösser, insbesondere bei höherem Bestand. Dies ist primär die Folge der Stauwirkung innerhalb der Wälder und führt dazu, dass die Windgeschwindigkeit und dadurch auch der Volumenstrom im Wald geringer ist als über Freiflächen.

Literaturstudie bestätigt

3.3.4.2 Effekt von Wäldern auf Kaltluftausbreitung in der Nacht

Die Steuerungswirkung der Wälder auf die Kaltluftströmung ist deutlich nachweisbar. Das Steuern von Strömen durch waldbauliche Massnahmen wie Schneisen oder Verjüngungsschläge ist hingegen beschränkt, da die Effekte gering und nur sehr lokal nachweisbar sind.

Steuerungswirkung deutlich

3.3.4.3 Nutzen von Wäldern auf die Siedlungsflächen am Tag

Der Nutzen von Wäldern auf die Siedlungsflächen am Tag beschränkt sich maximal auf die Randbereiche. Eine temperatursenkende Wirkung innerhalb der Siedlungsgebiete durch den Einfluss des Waldes kann nicht festgestellt werden, auch nicht mit erzwungenem Wind aus Richtung Wald. Wenn der Wald direkt an das Siedlungsgebiet angrenzend liegen würde, könnte in den Randbereichen eine Kühlwirkung und somit ein Einfluss auf das Siedlungsgebiet festgestellt werden, im Vergleich zu Landwirtschaftsland als umgebende Landnutzung.

Maximaler Einfluss in Randbereichen

3.3.4.4 Nutzen von Wäldern als Naherholungsflächen am Tag

Die simulierten klimatischen Bedingungen innerhalb der Wälder zeigen deutlich deren Nutzen als grosse Naherholungsflächen am Tag und dadurch den grossen Wert für die Bevölkerung. Der empfundene Hitzestress in allen untersuchten Waldbeständen ist dabei deutlich geringer als ausserhalb (Ausnahme: Freiflächen mit frisch geräumtem Bestand). Diese Komponente ist sehr bedeutend.

Sehr wertvoll

3.3.4.5 Weitere Mechanismen des Waldes

Die Simulationen liefern hierzu keine neuen Erkenntnisse. Es wird aufgezeigt, dass der Zugang zum Wald mit einfachen Baumreihen angenehmer gestaltet wird und der Wald so gefühlt näher an die Siedlung rückt.

Keine neuen Erkenntnisse zu weiteren Mechanismen

3.3.5 Hinweise für das Waldmanagement

Das angenehmste Waldklima weisen Bestände in der Optimalphase und alte Bestände auf. Der stufige Bestand unterscheidet sich zwar von diesen beiden Waldbeständen, das Mikroklima ist trotzdem noch deutlich angenehmer als ausserhalb des Waldes. Kleinere Verjüngungsschläge bewirken eine leichte Verschlechterung des Waldklimas und können punktuell auch zu starkem Hitzestress im Bestand führen, in der Regel bleibt das angenehme Waldklima im Mittel jedoch erhalten. Grössere Verjüngungsflächen (>0.5 ha), insbesondere mit frisch geräumtem Bestand, können sich rasch aufheizen. Die klimatischen Bedingungen innerhalb solcher Flächen unterscheiden sich deutlich von denen innerhalb des Waldbestands. Aus human-bioklimatischer Sicht sollten daher keine grossflächigen Verjüngungsschläge stattfinden. Wenn trotzdem flächenhafte Verjüngungsschläge durchgeführt werden müssen oder Sturmschäden auftreten, sollten einzelne Bäume und die bodennahe Vegetation möglichst erhalten bleiben.

Vor allem grosse Freiflächen mit deutlich schlechterem Klima

Auf die nächtlichen Kaltluftströme hat das Waldmanagement gemäss Simulationen einen geringen Einfluss. Einerseits ist die Kaltluftproduktion innerhalb der Wälder bereits eingeschränkt, andererseits können die relevanten Einflussfaktoren und Prozesse im Modell mit realistischen waldbaulichen Massnahmen nur leicht verändert werden. Mit gezielten Verjüngungsschlägen könnte versucht werden, die Kaltluft in gewissen Gebieten besser abfliessen zu lassen. Auf die Menge an produzierter Kaltluft hat dies jedoch keinen Einfluss, und die Wirkung ist lokal sehr begrenzt.

Kaum Einfluss auf die Kaltluftproduktion

Aufgrund des nach wie vor unzureichenden Wissens zur Kaltluftentstehung innerhalb unterschiedlicher Waldtypen und der Unsicherheiten bezüglich der Abhängigkeit des produzierten Kaltluftvolumens von der Landnutzung (Kapitel 2.1.4) haben auch die bestehenden Modelle nur beschränkte Möglichkeiten, die reellen Gegebenheiten abzubilden. Diesbezüglich besteht weiterhin Forschungsbedarf.

Bestehender Forschungsbedarf

4 Fazit

Gemäss der Literaturstudie wird dem Wald als Entlastungsraum der entscheidende Kühlwirkungsmechanismus am Tag zugeschrieben. Die Simulationsstudie bestätigt dieses Erkenntnis und zeigt durch das berechnete physiologische Empfinden die Grössenordnung der Kühlwirkung auf. Ergänzend zur Literaturrecherche wurde ermittelt, dass ab einem gewissen Überschirmungsgrad, auch bei weiterer Dichte-Zunahme keine fundamentale Verbesserung des Waldklimas mehr festgestellt werden kann. Erst bei grösseren Lücken und geringem Überschirmungsgrad nimmt die Qualität des Waldklimas deutlich ab. Insbesondere grössere Verjüngungsflächen mit frisch geräumtem Bestand weisen einen sehr schlechten thermischen Komfort auf. Verjüngungsflächen mit Jungwuchs und einigen stehengelassenen, hochgewachsenen Bäumen bieten punktuell Entlastung vom Hitzestress.

Wald als Entlastungsraum

Eine grossräumige Windzirkulation, welche am Tag kühle Luft aus dem Waldbestand in den Siedlungsraum befördert, wurde weder im Rahmen der Literaturrecherche noch mit der Simulationsstudie gefunden. Dies deckt sich mit theoretischen meteorologischen Überlegungen. Ein kühlender Einfluss der Waldluft auf die nähere Umgebung durch übergeordnete Winde konnte im Modell nur in den Randbereichen gefunden werden. Auch bei erzwungener Strömung vom Wald in das Siedlungsgebiet wird die Temperatur der Luft rasch von der Sonneneinstrahlung und der Landnutzung ausserhalb des Waldes überprägt, sodass diese kaum mehr die Charakteristika des Waldklimas aufweist.

Keine grossräumigen Windzirkulation am Tag

Die Simulationsstudien konnten zudem bestätigen, dass die unterschiedlichen Waldbestände die vorherrschenden Kaltluftströme, insbesondere aufgrund ihrer Hinderniswirkung, beeinflussen. Anpassungen der Baumdichte oder der Bestandshöhe haben jedoch nur einen geringfügigen Einfluss. Das produzierte Kaltluftvolumen kann mit realistischen waldbaulichen Massnahmen kaum beeinflusst werden.

Geringe Effekte auf nächtliche Kaltluftströme

Verjüngungsschläge in Form von Schneisen führen innerhalb der Schneisen und in deren Randgebiet zu einer wahrnehmbaren Erhöhung der Windgeschwindigkeit und des Kaltluftvolumenstroms. Dies ist durch ein vereinfachtes Abfliessen der Hangabwinde zu erklären und nicht durch ein insgesamt grösseres Kaltluftvolumen. Auf die nächtliche Kaltluftproduktion oder die grossräumige Kaltluftströmung hat diese Massnahme keinen Einfluss. Die Wirkung ist zudem sehr lokal und im weiter entfernten Siedlungsgebiet nicht mehr nachweisbar.

Wirkung von Schneisen

Durch die mikroklimatische Simulation kann zudem gezeigt werden, dass bei breiten Schneisen mit frisch geräumtem Bestand die Lufttemperatur und der Hitzestress am Tag deutlich steigen und dadurch das Waldklima lokal fragmentiert wird.

Bedingungen am Tag in Schneisen problematisch

Die Simulationsstudien bestätigen somit die Erkenntnisse aus der Literatur, dass der Wald primär als Steuerungselement für Kaltluftströme wirkt. Eine Veränderung der Kaltluftproduktionsrate durch eine Anpassung der Charakteristika des Waldes wurde nicht gefunden. Die Topografie und Landnutzung hat einen sehr viel grösseren Einfluss auf die Kaltluftproduktionsrate.

Wald als Steuerungselement

Die Resultate verdeutlichen auch den Zwiespalt, dass förderliche Massnahmen für die nächtliche Auskühlung oder zumindest die Beschleunigung der Kaltluftströmung in der Regel negative Auswirkungen auf das thermische Wohlbefinden am Tag haben und umgekehrt. Das erschwert die Formulierung von allgemeingültigen Massnahmen. Bezüglich der Wirkung als Entlastungsfläche für Siedlungen sind häufig Waldflächen in Tallagen von grosser Bedeutung. Waldflächen in Hanglage sind wertvoller für die nächtliche Kaltluftproduktion als Waldflächen in Tallagen. Dies kann bei der klima- und kaltluftoptimierten Waldbewirtschaftung berücksichtigt werden. Eine Gemeinsamkeit besteht darin, dass Waldflächen rechtlich sehr gut geschützt sind, und dadurch der Wald als Kaltluftproduktionsfläche sowie als Entlastungsfläche gesichert ist.

Massnahmen mit gegenteiligem Nutzen am Tag und in der Nacht

Aufgrund der umfassenden Analyse der vorhandenen Literatur, der identifizierten Grenzen der Simulationsmodelle und des weiterhin bestehenden Forschungsbedarfs wären meteorologisch fundierte Messkampagnen der nächste logische Schritt, um ein besseres Verständnis von Kaltluftströmungen zu erlangen.

Ausblick

Anhang

A.1 Zitierte Grundlagen

- [1] Departement Bau, Verkehr und Umwelt, „Zustand und Entwicklung des Aargauer Waldes. Ergebnisse der 2. Aargauer Waldinventur 2016“. Aarau: Departement Bau, Verkehr und Umwelt, Abteilung Wald, 2018.
- [2] T. Foken, *Angewandte Meteorologie*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2016. doi: 10.1007/978-3-642-25525-0.
- [3] S. E. Belcher, I. N. Harman, und J. J. Finnigan, „The Wind in the Willows: Flows in Forest Canopies in Complex Terrain“, *Annu. Rev. Fluid Mech.*, Bd. 44, Nr. 1, S. 479–504, 2012, doi: 10.1146/annurev-fluid-120710-101036.
- [4] N. J. Froelich und H. P. Schmid, „Flow divergence and density flows above and below a deciduous forest: Part II. Below-canopy thermotopographic flows“, *Agric. For. Meteorol.*, Bd. 138, Nr. 1, S. 29–43, Aug. 2006, doi: 10.1016/j.agrformet.2006.03.013.
- [5] M. H. Unsworth, B. J. Bond, A. C. Mix, T. G. Pypker, und L. Mahrt, „Nocturnal air drainage in forest canopies: A new way of studying physiological responses to the weather?“, 2004.
- [6] J. Finnigan, „Turbulence in Plant Canopies“, *Annu. Rev. Fluid Mech.*, Bd. 32, Nr. 1, S. 519–571, 2000, doi: 10.1146/annurev.fluid.32.1.519.
- [7] H. Häckel, *Meteorologie*, 6. Stuttgart: Ulmer, 2008.
- [8] G. Gross, „Some effects of deforestation on nocturnal drainage flow and local climate — A numerical study“, *Bound.-Layer Meteorol.*, Bd. 38, Nr. 4, S. 315–337, 1987, doi: 10.1007/BF00120851.
- [9] H.-P. Thamm, „Modellierung von Flächendatensätzen der Oberflächentemperatur, Strahlungsbilanz und Kaltluftproduktion in Strahlungsnächten“, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg i. Br., Freiburg i. Br., 2000.
- [10] H. Mayer, „Urban bioclimatology“, *Experientia*, Bd. 49, Nr. 11, S. 957–963, Nov. 1993, doi: 10.1007/BF02125642.
- [11] W. Kuttler, *Klimatologie: Grundriss Allgemeine Geographie*, 1. Aufl. Paderborn: UTB, Stuttgart, 2008.
- [12] P. Höppe, „The physiological equivalent temperature - a universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment“, *Int. J. Biometeorol.*, Bd. 43, Nr. 2, S. 71–75, Okt. 1999, doi: 10.1007/s004840050118.
- [13] H. L. Lee und H. Mayer, „Planerische Maßnahmen zur Reduzierung von lokalem Hitzestress für Menschen“, Nov. 2019, doi: 10.25592/uhhfdm.9432.
- [14] T. R. Oke, *Boundary Layer Climates*, 2. Aufl. London: Routledge, 1987.
- [15] P. Hupfer, W. Kuttler, F.-M. Chmielewski, und H. Pethe, Hrsg., *Witterung und Klima*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 2005. doi: 10.1007/978-3-322-96749-7.
- [16] J. Bauhus u. a., *Die Anpassung von Wäldern und Waldwirtschaft an den Klimawandel: Gutachten des Wissenschaftlichen Beirates für Waldpolitik*. in Berichte über Landwirtschaft, Sonderheft, no. 233. Berlin: Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft, 2021.
- [17] T. G. Pypker u. a., „Cold air drainage in a forested valley: Investigating the feasibility of monitoring ecosystem metabolism“, *Agric. For. Meteorol.*, Bd. 145, Nr. 3–4, S. 149–166, 2007.
- [18] T. G. Pypker u. a., „Using nocturnal cold air drainage flow to monitor ecosystem processes in complex terrain“, *Ecol. Appl.*, Bd. 17, Nr. 3, S. 702–714, Apr. 2007, doi: 10.1890/05-1906.
- [19] E. van Gorsel, „Aspects of flow characteristics and turbulence in complex terrain. Results from the MAP-RIVIERA project“, Universität Basel, Basel, 2003.
- [20] H. Kraus, *Die Atmosphäre der Erde: Eine Einführung in die Meteorologie*. Springer-Verlag, 2007. Zugriffen: 25. Oktober 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://books.google.com/books?hl=de&lr=&id=2RlIB-gAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA3&dq=kraus+die+atmosphäre%3%A4re+der+erde&ots=08Q3ff8ri&sig=dgqxuBBRwh6zI264Zco3h5TVCAQ>
- [21] V. Verein Deutscher Ingenieure, „VDI 3787 Blatt 5 - Umweltmeteorologie; Lokale Kaltluft [Entwurf]“. März 2024.

- [22] C. Feigenwinter, L. Montagnani, und M. Aubinet, „Plot-scale vertical and horizontal transport of CO₂ modified by a persistent slope wind system in and above an alpine forest“, *Agric. For. Meteorol.*, Bd. 150, Nr. 5, S. 665–673, Mai 2010, doi: 10.1016/j.agrformet.2009.05.009.
- [23] H. Kraus, *Grundlagen der Grenzschicht-Meteorologie*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2008. doi: 10.1007/978-3-540-75981-2.
- [24] C. Gohr, J. S. Blumröder, und P. L. Ibisch, „Thermische Wirkungen von Waldökosystemen und Autobahnen unter den Bedingungen des Klimawandels“, Greenpeace, Hamburg, 2020.
- [25] J. Tröstl u. a., „The role of low-volatility organic compounds in initial particle growth in the atmosphere“, *Nature*, Bd. 533, Nr. 7604, Art. Nr. 7604, Mai 2016, doi: 10.1038/nature18271.
- [26] C. E. Scott u. a., „Impact on short-lived climate forcers increases projected warming due to deforestation“, *Nat. Commun.*, Bd. 9, Nr. 1, Art. Nr. 1, Jan. 2018, doi: 10.1038/s41467-017-02412-4.
- [27] A. J. Teuling u. a., „Observational evidence for cloud cover enhancement over western European forests“, *Nat. Commun.*, Bd. 8, Nr. 1, S. 14065, Jan. 2017, doi: 10.1038/ncomms14065.
- [28] A. C. Wunderlich, B. Salak, T. Hegetschweiler, N. Bauer, und M. Hunziker, „Ergebnisse der WaMos3-Umfrage im Kanton Aargau – Vergleich mit der Gesamtschweiz und innerkantonale Vertiefungen. Interner Bericht an die Auftraggeberin.“, Eidg. Forschungsanstalt für Wald Schnee und Landschaft WSL, Birmensdorf, 2021.
- [29] H. Noppel, *Modellbasierte Analyse des Stadtklimas als Grundlage für die Klimaanpassung am Beispiel von Wiesbaden und Mainz: Abschlussbericht zum Arbeitspaket 3 des Projekts KLIMPRAX Wiesbaden/Mainz - Stadtklima in der kommunalen Praxis*. 2017. doi: 10.17169/refubium-25220.
- [30] H. Merbitz, „Untersuchung und Modellierung der raumzeitlichen Variabilität urbaner und regionaler Feinstaubkonzentrationen“, Dissertation, Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen, Aachen, 2013.
- [31] T. Hegetschweiler, B. Salak, A. C. Wunderlich, N. Bauer, und M. Hunziker, „Das Verhältnis der Schweizer Bevölkerung zum Wald“, 2022.
- [32] H. Malberg, *Meteorologie und Klimatologie: Eine Einführung*. Springer-Verlag, 2007.
- [33] T. R. Oke, G. Mills, A. Christen, und J. A. Voogt, *Urban Climates*. Cambridge: Cambridge University Press, 2017. doi: 10.1017/9781139016476.
- [34] A. Helbig, J. Baumüller, und M. J. Kerschgens, Hrsg., *Stadtklima und Luftreinhaltung*. Berlin, Heidelberg: Springer, 1999. doi: 10.1007/978-3-642-58545-6.
- [35] Deutscher Wetterdienst (DWD), Hrsg., *Leitfäden für die Ausbildung im DWD, Band 1. Allgemeine Meteorologie*, 3. vollständig neu bearbeitete Auflage., Bd. 1. Offenbach am Main: Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes, 1987.
- [36] M. Chamecki u. a., „Effects of Vegetation and Topography on the Boundary Layer Structure above the Amazon Forest“, *J. Atmospheric Sci.*, Bd. 77, Nr. 8, S. 2941–2957, Aug. 2020, doi: 10.1175/JAS-D-20-0063.1.
- [37] V. Verein Deutscher Ingenieure, *VDI 3787 Blatt 5 - Umweltmeteorologie; Lokale Kaltluft*. Düsseldorf, 2003. Zugriffen: 5. Oktober 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.vdi.de/richtlinien/details/vdi-3787-blatt-5-umweltmeteorologie-lokale-kaltluft>
- [38] Ministerium für Verkehr und Infrastruktur Baden-Württemberg, Hrsg., „Städtebauliche Klimafibel. Hinweise für die Bauleitplanung“. Völlig überarbeitete Neuauflage, 2012. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.staedtebauliche-klimafibel.de/>
- [39] L. Mahrt und M. Ek, „Spatial variability of turbulent fluxes and roughness lengths in HAPEX-MOBILHY“, *Bound.-Layer Meteorol.*, Bd. 65, S. 381–400, Sep. 1993, doi: 10.1007/BF00707034.
- [40] J. Hessel und P.-H. Voss, „Kaltluftabflusssimulationen mit KLAM_21 für die Stadt Leipzig und Umgebung“. Deutscher Wetterdienst, 2017. Zugriffen: 6. Juli 2023. [Online]. Verfügbar unter: https://static.leipzig.de/fileadmin/mediendatenbank/leipzig-de/Stadt/02.3_Deiz3_Umwelt_Ordnung_Sport/36_Amt_fuer_Umweltschutz/Energie_und_Klima/Stadtklima/Gutachten_KLAM_21_Leipzig_Abgabe_m_Titel.pdf
- [41] E. King, *Untersuchungen über kleinräumige Änderungen des Kaltluftflusses und der Frostgefährdung durch Straßenbauten:(mit 5 Tabellen im Text)*. Deutscher Wetterdienst, 1973.

- [42] H. Quénot und G. Beltrando, „Impact of a new railway line embankment (Mediterranean TGV) on the frequency of spring frosts in a fruit-growing area of the Durance Valley (south of France)“, *Meteorol. Appl.*, Bd. 15, Nr. 3, S. 389–398, Sep. 2008, doi: 10.1002/met.81.
- [43] W.-J. Kost, „Experimentelle Untersuchung zur Ausbreitung von Luftverunreinigungen in einem Talsystem.“, Diplomarbeit, Universität Karlsruhe, Meteorologisches Institut, Karlsruhe, 1982.
- [44] A. Zenger, „Analyse und Bewertung von Kaltluftabflüssen. Nocturnal Drainage Flow Model NDFM“. 1998. Zugriffen: 17. August 2023. [Online]. Verfügbar unter: http://www.axel-zenger.de/hlit/24_KALTLUFT.pdf
- [45] T. D. Davies, J. P. Palutikof, X. Guo, L. Berkofsky, und J. Halliday, „Development and testing of a two-dimensional downslope wind model“, *Bound.-Layer Meteorol.*, Bd. 73, Nr. 3, S. 279–297, März 1995, doi: 10.1007/BF00711260.
- [46] L. Mahrt, „Momentum Balance of Gravity Flows“, *J. Atmospheric Sci.*, Bd. 39, Nr. 12, S. 2701–2711, Dez. 1982, doi: 10.1175/1520-0469(1982)039<2701:MBOGF>2.0.CO;2.
- [47] Kanton Aargau, „Klimakarten Kanton Aargau“. 2022. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.ag.ch/de/themen/klimawandel/klimakarten>
- [48] S. F. J. De Wekker, M. Kossmann, J. C. Knierel, L. Giovannini, E. D. Gutmann, und D. Zardi, „Meteorological Applications Benefiting from an Improved Understanding of Atmospheric Exchange Processes over Mountains“, *Atmosphere*, Bd. 9, Nr. 371, 2018, doi: 10.3390/atmos9100371.
- [49] M. T. Kiefer und S. Zhong, „The role of forest cover and valley geometry in cold-air pool evolution“, *J. Geophys. Res. Atmospheres*, Bd. 120, Nr. 17, S. 8693–8711, 2015, doi: 10.1002/2014JD022998.
- [50] M. Princevac, J. C. R. Hunt, und H. J. S. Fernando, „Quasi-Steady Katabatic Winds on Slopes in Wide Valleys: Hydraulic Theory and Observations“, *J. Atmospheric Sci.*, Bd. 65, Nr. 2, S. 627–643, Feb. 2008, doi: 10.1175/2007JAS2110.1.
- [51] H. Chen und C. Yi, „Optimal control of katabatic flows within canopies“, *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, Bd. 138, Nr. 667, S. 1676–1680, 2012, doi: 10.1002/qj.1904.
- [52] H. Komatsu, N. Hotta, K. Kuraji, M. Suzuki, und T. Oki, „Classification of Vertical Wind Speed Profiles Observed Above a Sloping Forest at Nighttime Using the Bulk Richardson Number“, *Bound.-Layer Meteorol.*, Bd. 115, Nr. 2, S. 205–221, Mai 2005, doi: 10.1007/s10546-004-3408-x.
- [53] T. G. Sachsen und C. Schneider, „Die Wirkung von Vegetation in randstädtischen Luftleitbahnen: Studien zur Kaltluft in der Stadt Aachen“, Publikationsserver der RWTH Aachen University, Aachen, 2013.
- [54] M. Kossmann, „Simulation der Temperaturverhältnisse und der nächtlichen Kaltluft in Aschaffenburg als Grundlage zur Anpassung an den Klimawandel“, Deutscher Wetterdienst, Offenbach am Main, Schlussbericht, 2021.
- [55] M. T. Kiefer und S. Zhong, „The effect of sidewall forest canopies on the formation of cold-air pools: A numerical study“, *J. Geophys. Res. Atmospheres*, Bd. 118, Nr. 12, S. 5965–5978, 2013, doi: 10.1002/jgrd.50509.
- [56] T. Gustavsson, M. Karlsson, J. Bogren, und S. Lindqvist, „Development of Temperature Patterns during Clear Nights“, *J. Appl. Meteorol. Climatol.*, Bd. 37, Nr. 6, S. 559–571, Juni 1998, doi: 10.1175/1520-0450(1998)037<0559:DOTPDC>2.0.CO;2.
- [57] P. Trute und G. Gross, „Leitfaden zur Berücksichtigung klimatischer Ausgleichsfunktionen in der räumlichen Planung am Beispiel der Regionen Mittlerer Oberrhein und Nordschwarzwald“, Regionalverband Nordschwarzwald, Hannover, 2011.
- [58] J. Vogt, „Lokale Kaltluftabflüsse und ihre Relevanz für die räumliche Planung, Mikroskalige empirische Untersuchungen zur räumlichen und zeitlichen Struktur von thermisch induzierten Bergwinden im Mittelgebirge, ihrer Modifikation durch Bebauungen und ihre raumplanerische Bewertung“, PhD Thesis, Habilitationsschrift eingereicht an der Geowissenschaftlichen Fakultät der ..., 1997.
- [59] G. Gross, „Numerical Simulation of the Nocturnal Flow Systems in the Freiburg Area for Different Topographies“, Bd. Contr. Atmos. Phys, Nr. 62, S. 57/72, 1989.
- [60] M. Hartenstein, „Analyse eines Bergwindsystems im Nordschwarzwald (Michelbachtal bei Gaggenau) unter Berücksichtigung seiner stadtklimatisch-lufthygienischen Bedeutung.“, Karlsruhe, 11, 2000.

- [61] T. Hauf und N. Witte, „Case study of a nocturnal wind system“, *Meteorol. Rundsch.*, Bd. 38, Nr. 2, 1985.
- [62] G. Gross, J. Graf, und D. Heimann, „Simulation der regionalen und bodennahen lokalen Kaltluftabflüsse und Massenströme in Thüringen auf der Grundlage der TK25“, ambimet. Gesellschaft für Umweltmeteorologie GbR, München, Projektbericht, 2000.
- [63] A. Lohmeyer und G. Schädler, „Description of the drainage flow model KALM“. 1994. Zugriffen: 17. August 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.lohmeyer.de/de/system/files/content/download/publikationen/KALMenglish.pdf>
- [64] K. Wiesner, „Programme zur Erfassung von Landschaftsdaten, eine Bodenerosionsgleichung und ein Modell der Kaltluftentstehung.“, *Heidelb. Geogr. Arb.*, Bd. 79, 1986.
- [65] A. Lutz, „Produktion und Abfluß von Kaltluft an Hängen unterschiedlicher Vegetation in Strahlungsnächten“, Zulassungsarbeit zum Staatsexamen, Universität Freiburg, Institut für Physische Geographie, Freiburg i. Br., 1986.
- [66] E. Parlow, „Geländeklimatologische Untersuchungen im Bereich der Staufferen Bucht unter besonderer Berücksichtigung lokaler Ausgleichsströmungen“, Bd. Freiburger Geographische Hefte 20, 1983.
- [67] X. Xu, „Numerical Study of Canopy Flows in Complex Terrain“, Graduate Center, City University of New York (CUNY), New York, 2014.
- [68] W. Nübler, „Konfiguration und Genese der Wärmeinsel der Stadt Freiburg“, *Freibg Geogr Hefte*, Bd. 16, Nr. 113, 1979.
- [69] N. J. Froelich, C. S. B. Grimmond, und H. P. Schmid, „Nocturnal cooling below a forest canopy: Model and evaluation“, *Agric. For. Meteorol.*, Bd. 151, Nr. 7, S. 957–968, Juli 2011, doi: 10.1016/j.agrfor-met.2011.02.015.
- [70] R. Geiger, *Das Klima der bodennahen Luftschicht. Ein Lehrbuch der Mikroklimatologie.*, 4. neubearbeitete und Erweiterte Auflage mit 281 Abb., Bd. 96. Braunschweig: Verlag Friedrich Vieweg & Sohn, 1962. Zugriffen: 16. Oktober 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://online-library.wiley.com/doi/abs/10.1002/jpln.19620960108>
- [71] J. Vogt, H. Lauerbach, M. Meurer, und M. Langner, „The influence of urban vegetation on air flow“, in *Proceedings of the Fifth International Conference of Urban Climate*, Citeseer, 2003.
- [72] S. Weber und W. Kuttler, „Cold-air ventilation and the nocturnal boundary layer“, *Meteorol. Z.*, Bd. 13, Nr. 5, 413–420, 2004.
- [73] C. D. Whiteman, „Morning transition tracer experiments in a deep narrow valley“, *J. Appl. Meteorol. Climatol.*, Bd. 28, Nr. 7, S. 626–635, 1989.
- [74] P. H. Gudiksen und D. L. Shearer, „The dispersion of atmospheric tracers in nocturnal drainage flows“, *J. Appl. Meteorol. Climatol.*, Bd. 28, Nr. 7, S. 602–608, 1989.
- [75] S. Weber und W. Kuttler, „Analyse der nächtlichen Kaltluftdynamik und -qualität einer stadtklimarelevanten Luftleitbahn“, *Gefahrstoffe - Reinhalt. Luft*, Bd. 63, Nr. 9, 2003.
- [76] W. Kuttler, „Aspects of applied urban climatology; Aspekte der angewandten Stadtklimatologie“, *Geowissenschaften*, Bd. 14, 1996.
- [77] R. Röckle und C. J. Richter, „Ausbreitung von Gerüchen in Kaltluftabflüssen“, 2001.
- [78] J. Hackenbruch, „Anpassungsrelevante Klimaänderungen für städtische Baustrukturen und Wohnquartiere“, KIT, Karlsruhe, 77, 2018.
- [79] D. Düttemeyer, *Urban-orographische Bodenwindssysteme in der städtischen Peripherie Kölns*. Westarp-Wiss., 2000.
- [80] G. Gross, T. Mosimann, P. Trute, und R. Lessing, „Die Untersuchung kleinräumiger Kaltluftabflüsse mittels empirischer Abschätzung und numerischer Simulation“, *Meteorol. Z.*, S. 76–89, 1996.
- [81] Sievers und Kossmann, „The cold air drainage model KLAM_21 - Model formulation and comparison with observations“, *Weather Clim.*, Bd. 36, S. 2, 2016, doi: 10.2307/26779385.

A.2 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Waldflächen im Kanton Aargau (Geodaten Kanton Aargau).	7
Abbildung 2:	Hangneigungsklassen von Waldflächen im Kanton Aargau (Geodaten Kanton Aargau). Die Einteilung der Klassen erfolgte nach der bodenkundlichen Kartierungsanleitung.	7
Abbildung 3:	Schematische Darstellung der Energiebilanz an der Erdoberfläche (verändert nach [2]). Orange umrandet sind die Komponenten der Strahlungsbilanz. $K_{\downarrow}$ bezeichnet die einfallende kurzwellige Globalstrahlung, $K_{\uparrow}$ die reflektierte kurzwellige Strahlung, $I_{\downarrow}$ ist die langwellige Gegenstrahlung der Atmosphäre und $I_{\uparrow}$ die langwellige Ausstrahlung der Erdoberfläche. Zusätzlich zur Strahlungsbilanz ergeben die turbulenten Ströme fühlbarer Wärme (Q_H) und latenter Wärme (Q_E) und der Bodenwärmestrom (Q_G) die Energiebilanz.	9
Abbildung 4:	Einflussfaktoren auf die thermische Behaglichkeit eines Individuums (nach dwd.de).	12
Abbildung 5:	Tagesgang der Lufttemperatur in und über einem Wald (verändert aus [2]).	14
Abbildung 6:	Temperaturabnahme bei entsprechenden <i>Schichtungsverhältnissen</i> [20].	15
Abbildung 7:	Profil der Windgeschwindigkeit innerhalb eines Waldes und darüber (verändert nach [2]). Über dem Waldbestand zeigt sich das logarithmische Windprofil (zunehmende Windgeschwindigkeit bei zunehmender Höhe). Innerhalb des Waldes ergibt sich im Stammraum ein sekundäres Windmaximum.	16
Abbildung 8:	Mikroklimatische Verhältnisse des Waldrandklimas für einen besonnten Waldrand [23]. Der Waldrand befindet sich bei $x=0$, die x-Achse beschreibt also die Distanz zum Waldrand. Die Höhe wird über die z-Achse beschrieben. Ein Flächenelement F wird an der Stelle x_F betrachtet.	17
Abbildung 9:	Thermisch induzierte Zirkulation (verändert nach [35]). Es gibt keine horizontalen Temperaturunterschiede, sodass die Luftdruckebenen (hellblaue Linien), deren Luftdruck p mit der Höhe um den Luftdruck Δp jeweils abnimmt, parallel zueinander liegen. Es gibt also keine Luftbewegung (1). Die Oberfläche wird nun in der horizontalen unterschiedlich erwärmt. Durch die Ausdehnung von Luft mit höherer Temperatur ergeben sich horizontale Druckunterschiede (2). Aufgrund dieser thermisch ausgelösten Druckunterschiede entwickelt sich zunächst eine Ausgleichsströmung in der Höhe vom hohen Luftdruck (H) zum tieferen Luftdruck (T, 3). Diese bewirkt bodennahe Druckveränderungen, sodass eine der Höhe entgegengesetzte Ausgleichströmung einsetzt. Das bodennahe Zusammenströmen und Entweichen in der Höhe für den erwärmten Bereich (W) und umgekehrt für den kühleren Bereich (K) bewirkt schliesslich vertikale Bewegungen, welche die Zirkulation in einen Kreislauf bringen (4).	21
Abbildung 10:	Schematische Darstellung der Hangwinde und der Berg- und Talwinde nach Defant (verändert nach [35]). Dargestellt sind die Tageszeiten Sonnenaufgang (a), Mittag (b), Abend (c) und Nacht (d).	23
Abbildung 11:	Beispiel einer gut durchlüfteten Stadt mit Kaltluftschneisen und Kaltluftabflüssen (links), Massnahme zum Abstand zwischen Wald und Hangbebauung (oben rechts) und Wald als Hindernis zur gezielten Umlenkung (unten rechts) [38].	32
Abbildung 12:	Schematische Darstellung zu Kaltluftabflüssen in bewaldetem Gelände (links) und im Freiland (rechts).	37
Abbildung 13:	Übersicht mit der Lage der Fallbeispiele sowie der Verteilung der Baumhöhen.	44

Abbildung 14:	Einteilung der Flächen verschiedener Waldbestände (A bis D) und Profillinie des «Waldspaziergangs» (orange). Fläche A wurde als Freifläche mit frisch geräumtem Bestand (1. Lauf) und als Jungwuchs/Dickung (spezifische Untersuchung) simuliert (*).....	48
Abbildung 15:	Lufttemperatur in 2 m über Grund zu unterschiedlichen Zeitpunkten an einem Sommertag im Aarauer Waldgebiet Gönert.....	50
Abbildung 16:	Lufttemperatur in 2 m über Grund im Verlauf eines Nachmittags als Mittelwerte (durchgezogen) und Maxima (gestrichelt) innerhalb der definierten Flächen (s. Abbildung 15) an einem Sommertag im Aarauer Waldgebiet Gönert.	52
Abbildung 17:	Lufttemperatur in 2 m über Grund um 14 Uhr als Profillinie entlang von Waldwegen (s. Abbildung 15) an einem Sommertag im Aarauer Waldgebiet Gönert.....	53
Abbildung 18:	Hitzestress als PET in 2 m über Grund zu unterschiedlichen Zeitpunkten an einem Sommertag im Aarauer Waldgebiet Gönert.....	54
Abbildung 19:	Hitzestress als PET in 2 m über Grund um 14 Uhr als Profillinie entlang von Waldwegen (s. Abbildung 18) an einem Sommertag im Aarauer Waldgebiet Gönert.....	54
Abbildung 20:	Hitzestress als PET in 2 m über Grund im Verlauf eines Nachmittags als Mittelwerte (durchgezogen) und Maxima (gestrichelt) innerhalb der definierten Flächen (s. Abbildung 18) an einem Sommertag im Aarauer Waldgebiet Gönert.	55
Abbildung 21:	Differenz der Lufttemperatur (links) und der PET (Hitzestress, rechts) in 2 m über Grund für die Fläche A inklusive Bewuchs als Jungwuchs/Dickung im Vergleich zur Fläche mit frisch geräumtem Bestand zu unterschiedlichen Zeitpunkten an einem Sommertag. Blau bedeutet kühler mit Bewuchs.....	56
Abbildung 22:	Veränderung der Kaltluftströmung aufgrund der Anhebung der mittleren Bestandshöhe im Aarauer Waldgebiet Gönert. Gezeigt sind die Windgeschwindigkeit (oben), die Kaltluflthöhe (Mitte) und der Kaltluftvolumenstrom (unten).	58
Abbildung 23:	Veränderung der Kaltluftströmung aufgrund der Anhebung der mittleren Bestandshöhe in Baden Meierhof. Gezeigt sind die Windgeschwindigkeit (oben), die Kaltluflthöhe (Mitte) und der Kaltluftvolumenstrom (unten).	59
Abbildung 24:	Veränderung der Kaltluftströmung aufgrund der Verringerung der mittleren Baumdichte im Aarauer Waldgebiet Gönert. Gezeigt sind die Windgeschwindigkeit (oben), die Kaltluflthöhe (Mitte) und der Kaltluftvolumenstrom (unten).	61
Abbildung 25:	Veränderung der Kaltluftströmung aufgrund der Verringerung der mittleren Baumdichte in Baden Meierhof. Gezeigt sind die Windgeschwindigkeit (oben), die Kaltluflthöhe (Mitte) und der Kaltluftvolumenstrom (unten).	62
Abbildung 26:	Lufttemperatur in 2 m über Grund zu unterschiedlichen Zeitpunkten an einem Sommertag in einem Waldstück mit vollständigem Baumbestand (links), vier Schneisen (Mitte) und die Differenz der beiden Zustände (rechts). Differenzen >0°C bedeuten eine Erwärmung gegenüber dem Ist-Zustand.....	64
Abbildung 27:	Lufttemperatur in 2 m über Grund mit und ohne Schneisen sowie die Differenz der Zustände um 14 Uhr als Profillinie entlang dem Keelweg (links, oberhalb der Schneisen) und entlang dem Waldrand (rechts, unterhalb der Schneisen; s. Abbildung 26, Mitte) an einem Sommertag in Baden, Meierhof.....	64

Abbildung 28:	Hitzestress als PET in 2 m über Grund zu unterschiedlichen Zeitpunkten an einem Sommertag in einem Waldstück mit vollständigem Baumbestand (links), vier Schneisen (Mitte) und die Differenz der beiden Zustände (rechts). Differenzen >0°C bedeuten eine Zunahme der PET gegenüber dem Ist-Zustand.	65
Abbildung 29:	Hitzestress als PET in 2 m über Grund mit und ohne Schneisen sowie die Differenz der Zustände (mit Schneisen minus ohne Schneisen) um 14 Uhr als Profillinie entlang dem Keelweg (links, oberhalb der Schneisen) und entlang dem Waldrand (rechts, unterhalb der Schneisen; s. Abbildung 28, Mitte) an einem Sommertag in Baden, Meierhof.	66
Abbildung 30:	Windgeschwindigkeit (oben), Kaltlufthöhe (Mitte) und Kaltluftvolumenstrom (unten) für den Zustand mit geschlossenem Waldbestand (links), mit gezielten Schneisen analog Waldbewirtschaftung Stadt Baden (Mitte) und die Differenz der beiden Zustände (mit Schneisen minus ohne Schneisen; rechts).	67
Abbildung 31:	Windgeschwindigkeit (oben), Kaltlufthöhe (Mitte) und Kaltluftvolumenstrom (unten) für den Zustand mit geschlossenem Waldbestand (links), mit leicht bewachsenen Schneisen (Krautschicht, Mitte) und die Differenz der beiden Zustände (mit Schneisen minus ohne Schneisen; rechts).	68
Abbildung 32:	Windgeschwindigkeit (oben), Kaltlufthöhe (Mitte) und Kaltluftvolumenstrom (unten) für den Zustand mit geschlossenem Waldbestand (links), mit stärker bewachsenen Schneisen (kleinere Baumschicht, Mitte) und die Differenz der beiden Zustände (mit Schneisen minus ohne Schneisen; rechts).	69
Abbildung 33:	Lufttemperatur (oben) und PET (Hitzestress, unten) in 2 m über Grund an einem Sommertag ohne (links) und mit Beschattung des Zugangsweges (Allee) vom Siedlungsgebiet zum Aarauer Waldgebiet Gönert sowie die Differenz der beiden Zustände (mit Beschattung minus Ist; rechts) um 14 Uhr.	70
Abbildung 34:	Veränderung der Lufttemperatur (Ta, links) und der PET (Hitzestress, rechts) in 2 m über Grund an einem Sommertag durch die Beschattung des Zugangsweges (Allee) vom Siedlungsgebiet zum Aarauer Waldgebiet Gönert sowie die jeweilige Differenz der beiden Zustände (mit Beschattung minus Ist) um 14 Uhr.	71
Abbildung 35:	Lufttemperatur in 2 m über Grund an einem Sommertag vom Siedlungsgebiet zum Aarauer Waldgebiet Gönert um 14 Uhr.	72
Abbildung 36:	Differenz der Lufttemperatur am Mittag im Vergleich zwischen der Simulation im Ist-Zustand und einer Variante mit zusätzlichen Bäumen (Vzb) zwischen Wald und Siedlungsgebiet (graue Punkte; Vzb minus Ist).	73

A.3 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Hangausrichtung von Waldflächen mit über 3° Hangneigung im Kanton Aargau (Geodaten Kanton Aargau). Für die Flächen wurde hierfür der Modalwert der Ausrichtung bestimmt (Mehrheitlich vorhandene Ausrichtung). Werte gerundet.	8
Tabelle 2:	Pflanzengesellschaften von Waldflächen im Kanton Aargau (Geodaten Kanton Aargau). Werte gerundet.	8
Tabelle 3:	Allgemeine Wohlfahrtsauswirkungen des Waldes für den Menschen [11].	19

Tabelle 4:	Zusammenfassung der Kaltluftproduktionsraten gemäss Literatur.	29
Tabelle 5:	Einflussfaktoren auf die Kühlwirkungsmechanismen am Tag und in der Nacht. Die Bewertung erfolgt qualitativ auf Grundlage der gewonnen Erkenntnisse. Legende: + = leicht positiver Einfluss, ++ = positiver Einfluss und Konsens in der Forschung, 0 = kein Einfluss, - = leicht negativer Einfluss, -- = negativer Einfluss und Konsens in der Forschung, () = unklar.	41
Tabelle 6:	Szenarien, an denen sich die Modellsimulationen orientieren.	45
Tabelle 7:	Charakterisierung der Waldbestände (oben: Verjüngungsfläche und Bestand in Optimalphase, unten: alter und stufiger Bestand). Vergleich zu Szenarien in Tabelle 6.	49
Tabelle 8:	Bewertung der Kühlwirkungsmechanismen des Waldes innerhalb der unterschiedlichen Szenarien, bezogen auf einen Standardwald im jeweiligen Modell.	77

A.4 Glossar

Albedo	Die Albedo ist das Mass des Rückstrahlvermögens (Reflexionseigenschaft) einer Oberfläche und beschreibt somit deren Reflexionseigenschaften sowie die Helligkeit der Oberfläche. Je heller eine Oberfläche, desto höher deren Albedo. Das bedeutet, dass mehr einkommende kurzwellige Strahlung reflektiert wird und dadurch nicht mehr der <i>Energiebilanz</i> zur Verfügung steht.
Energiebilanz	Die Energiebilanz an der Erdoberfläche bezeichnet die Gesamtheit der zur Oberfläche hin sowie davon weg gerichteten Energieflüsse. Diese Energieflüsse sind die <i>Strahlungsbilanz</i> , der turbulente Strom latenter Wärme, der turbulente Strom fühlbarer Wärme und der Bodenwärmestrom. Die <i>Strahlungsbilanz</i> umfasst alle kurz- und langwelligen <i>Strahlungsflüsse</i> an der Bodenoberfläche (s. <i>Strahlungsbilanz</i>). Der Bodenwärmestrom transportiert Wärme in tiefere Bodenschichten ab und dient als Energiespeicher. Die turbulenten Flüsse transportieren Wärme über die Atmosphäre ab, wobei die latente Wärme die Energie beinhaltet, die zur Verdunstung von Wasser aufgewendet werden muss. Die fühlbare Wärme beschreibt die Energie zur Erhöhung oder Senkung der Lufttemperatur.
Flurwind / Flurwindssystem	Thermisch erzeugte kleinräumige Ausgleichsströmungen, die durch horizontale Temperaturdifferenzen zwischen Stadt und Umland oder innerhalb der Stadt entstehen und zum wärmeren Gebiet hin gerichtet sind.
Konvektion	Vertikale Zirkulationsströmung mit aufsteigender Luft, welche sich in der Höhe abkühlt und seitlich wieder absinkt. Wirksamer Prozess, um Wärme von der unteren Heizfläche in höhere Luftschichten zu transportieren. Die Aufwärtsbewegung wird als <i>Thermik</i> bezeichnet.
Kaltluftabfluss	Findet die nächtliche <i>Kaltluftproduktion</i> im Gelände statt, sinkt die spezifisch schwerere kühlere Luftmasse entlang des Gefälles ins Tal. Man bezeichnet dies als Kaltluftabfluss. Das Phänomen tritt insbesondere an unbewaldeten oder unbebauten Hangflächen auf.
Kaltluftproduktion	Lokale Kaltluft entsteht in Bodennähe, wenn nach Sonnenuntergang bei windschwachen und wolkenlosen Wetterlagen die Erdoberfläche auskühlt. Diese kühlt auch die darüber liegende Luftschicht, welche kühler ist als die Luft in der Umgebung. Abhängig von den Materialeigenschaften (z.B. Beton, Wasser oder Rasen haben unterschiedliche thermische Eigenschaften) und dem Gelände kommt es zu unterschiedlich starken Kaltluftproduktionsraten.

Kaltluftschneisen	Bereiche innerhalb des Siedlungskörpers, welche kleinräumigen Kaltluftfluss ermöglichen. Im Gegensatz zu Kaltluftkorridoren (Mindestbreite von 50 m, Mindestläng von 1 km) dienen diese jedoch nicht als grossräumige Versorger von ganzen Stadtteilen mit Frischluft, sondern sorgen lediglich für lokale Entlastung.																													
Physiologisch Äquivalente Temperatur (PET)	Um das thermische Wohlbefinden zu quantifizieren, wurden verschiedene Hitzeindizes entwickelt. Alle diese Hitzeindizes berücksichtigen verschiedene Faktoren und ermöglichen eine Aussage zur Wärme- bzw. Kältebelastung eines Individuums. Die PET wird auf Grundlage der Strahlungstemperatur (lang und kurzwellige <i>Strahlungsflüsse</i> resp. Solar- und Wärmestrahlung), Lufttemperatur, Luftfeuchte, Wind, Bekleidung und Aktivität des Individuums berechnet. Die Einheit der PET ist °C und beschreibt die Temperatur, welche in einem Innenraum ohne direkte Sonneneinstrahlung und Wind sowie einer Luftfeuchtigkeit von 50% herrschen müsste, um den gleichen Hitzestress zu erzeugen wie aktuell von einer Person im Freien empfunden. Als Person wird ein 35-jähriger Mann mit leichter Bekleidung im Sitzen angenommen. <table><tr><th>PET</th><th>Thermisches Empfinden</th><th>Grad der physiologischen Belastung</th></tr><tr><td rowspan="2">4°C</td><td>Sehr kalt</td><td>Extremer Kältestress</td></tr><tr><td>Kalt</td><td>Starker Kältestress</td></tr><tr><td>8°C</td><td>Kühl</td><td>Moderater Kältestress</td></tr><tr><td rowspan="2">13°C</td><td>Etwas kühl</td><td>Geringer Kältestress</td></tr><tr><td>Komfortabel</td><td>Kein thermisches Unbehagen</td></tr><tr><td>18°C</td><td>Etwas warm</td><td>Geringer Hitzestress</td></tr><tr><td rowspan="2">23 °C</td><td>Warm</td><td>Moderater Hitzestress</td></tr><tr><td>Heiss</td><td>Starker Hitzestress</td></tr><tr><td>29°C</td><td>Sehr heiss</td><td>Extreme Hitzestress</td></tr></table>			PET	Thermisches Empfinden	Grad der physiologischen Belastung	4°C	Sehr kalt	Extremer Kältestress	Kalt	Starker Kältestress	8°C	Kühl	Moderater Kältestress	13°C	Etwas kühl	Geringer Kältestress	Komfortabel	Kein thermisches Unbehagen	18°C	Etwas warm	Geringer Hitzestress	23 °C	Warm	Moderater Hitzestress	Heiss	Starker Hitzestress	29°C	Sehr heiss	Extreme Hitzestress
PET	Thermisches Empfinden	Grad der physiologischen Belastung																												
4°C	Sehr kalt	Extremer Kältestress																												
	Kalt	Starker Kältestress																												
8°C	Kühl	Moderater Kältestress																												
13°C	Etwas kühl	Geringer Kältestress																												
	Komfortabel	Kein thermisches Unbehagen																												
18°C	Etwas warm	Geringer Hitzestress																												
23 °C	Warm	Moderater Hitzestress																												
	Heiss	Starker Hitzestress																												
29°C	Sehr heiss	Extreme Hitzestress																												
Schichtungs-Verhältnisse	Die Atmosphäre ist ...																													
stabil	<i>stabil</i> geschichtet, wenn die aktuelle Temperaturabnahme kleiner ist als die trockenadiabatische Temperaturabnahme (0.65 °C pro 100 m).																													
neutral	<i>neutral</i> geschichtet, wenn aktuelle und trockenadiabatische Abnahme identisch sind.																													
labil	<i>labil/instabil</i> geschichtet, wenn die aktuelle Abnahme grösser ist als die trockenadiabatische Abnahme.																													
Städtische Wärmeinsel	Die städtische Wärmeinsel ist ein typisches Phänomen des Stadtklimas. Durch die starke Versiegelung, dichte Bebauung und fehlende Grünflächen ist die Lufttemperatur einer Stadt, besonders in wolkenlosen, windschwachen Nächten, typischerweise einige Grad höher als in ihrem ruralen Umland. Innerhalb dieser Wärmeinsel ergeben sich aufgrund der heterogenen Flächennutzungsstruktur unterschiedlich stark überwärmte Bereiche. Die städtische Wärmeinsel hat einen Tagesgang mit maximaler Ausprägung in den frühen Abendstunden.																													
Strahlungsflüsse / Strahlungsbilanz	Die Strahlungsbilanz bezeichnet die Gesamtheit aller Strahlungskomponenten, die auf eine Bodenoberfläche wirken. Diese können in ihre lang- und kurzwelligen Komponenten unterteilt werden und sind zur Erdoberfläche hin (Energiegewinn) oder weg (Energieverlust) gerichtet. Den grössten Input in Richtung der Oberfläche liefert die kurzwellige Globalstrahlung (direkte und diffuse Sonneneinstrahlung). Davon wird ein Teil - abhängig von den Reflexionseigenschaften und beschrieben durch die <i>Albedo</i> - direkt an der Erdoberfläche reflektiert. Dieser kurzwellige Anteil der																													

	Strahlungskomponenten ist somit von der Oberfläche weg gerichtet. Ein weiterer Inputterm, welcher zur Erdoberfläche hin gerichtet ist, ist die langwellige atmosphärische Gegenstrahlung, die auch beim Treibhauseffekt beschrieben wird. Demgegenüber verliert die Erdoberfläche stetig Energie durch langwellige Ausstrahlung. Diese ist massgeblich für die nächtliche Auskühlung der Oberfläche verantwortlich.
Thermik	<i>S. Konvektion.</i>
Turbulenz	Die Gesamtheit der Luftverwirbelungen in der Atmosphäre wird als Turbulenz bezeichnet und beschreibt, in unterschiedlich starkem Ausmass, zumeist das Strömungsverhalten der Luft. Die deshalb auch stets vorhandenen Wirbel ermöglichen Vertikalbewegungen und damit verbundenen vertikale Transporte von Wärme und Wasserdampf durch die Atmosphäre.
Untertemperatur	Die Untertemperatur wird auch als die Lufttemperatur des Kaltluftvolumens bezeichnet, die niedriger als die Lufttemperatur der angrenzenden Umgebung ist.

A.5 Details zu den Modellen

A.5.1 Mikroklimamodell ENVI-met

ENVI-met ist ein mikrometeorologisches Modell des Mainzer Professors Michael Bruse (www.envi-met.com). Das Modell simuliert das Mikroklima in einer urbanen Umgebung und berechnet das Zusammenspiel und die Effekte von Atmosphäre, Vegetation, Untergrund, Gebäudearchitektur und Materialien. Das Modell wurde vor über 20 Jahren entwickelt und wurde seither stetig optimiert. Tausende Anwendungen sowie hunderte Publikationen und Städte, welche mit dem Modell arbeiten, zeugen von der Qualität und Robustheit der Modellergebnisse. ENVI-met ist somit das meistvalidierte Mikroklimamodell, welches verfügbar ist.

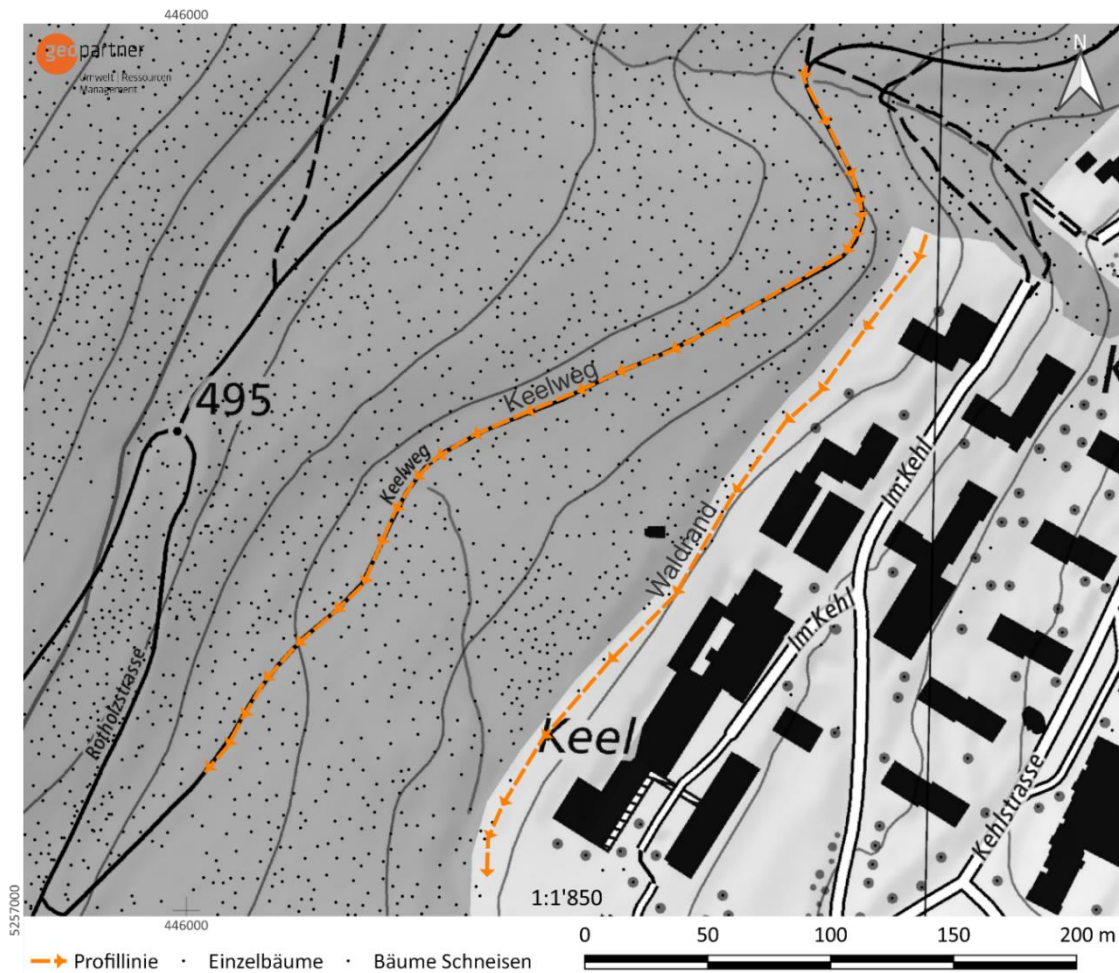
ENVI-met berücksichtigt die Platzierung und Stellung von Gebäuden in einer bestimmten geographischen Umgebung und damit deren Interaktion mit der einkommenden Sonnenstrahlung unter Berücksichtigung der meteorologischen Randbedingungen. Dabei werden auch Gebäudephysik und Wärmeströme im Boden sowie deren Einfluss auf die Lufttemperatur berücksichtigt. Zusätzlich werden unterschiedliche Baum- und Grünflächenarten unterschieden, welche ihrerseits wiederum einen unterschiedlichen Einfluss auf das Mikroklima und die Modelloutputs haben.

Die Orientierung und Dimensionierung der Gebäude beeinflusst ebenfalls das bodennahe Windfeld im Modell. Das Modell löst mit einem Zeitschritt von 2 Sekunden thermodynamische Gleichungen für jede Gitterzelle und nutzt die Inputs der umliegenden Zellen für den jeweils nächsten Rechenschritt, was entsprechend rechenaufwendig ist. Es werden bei dem Modell - anders als bei Gebäudemodellen wie üblicherweise in der Bauphysik verwendet - die für das Mikroklima elementaren Grundgleichungen der Energiebilanz respektiert und aufgelöst, wodurch eine möglichst realitätsgetreue Abbildung des Mikroklimas in allen Sphären erzeugt wird.

A.5.2 Kaltluftabflussmodell KLAM_21

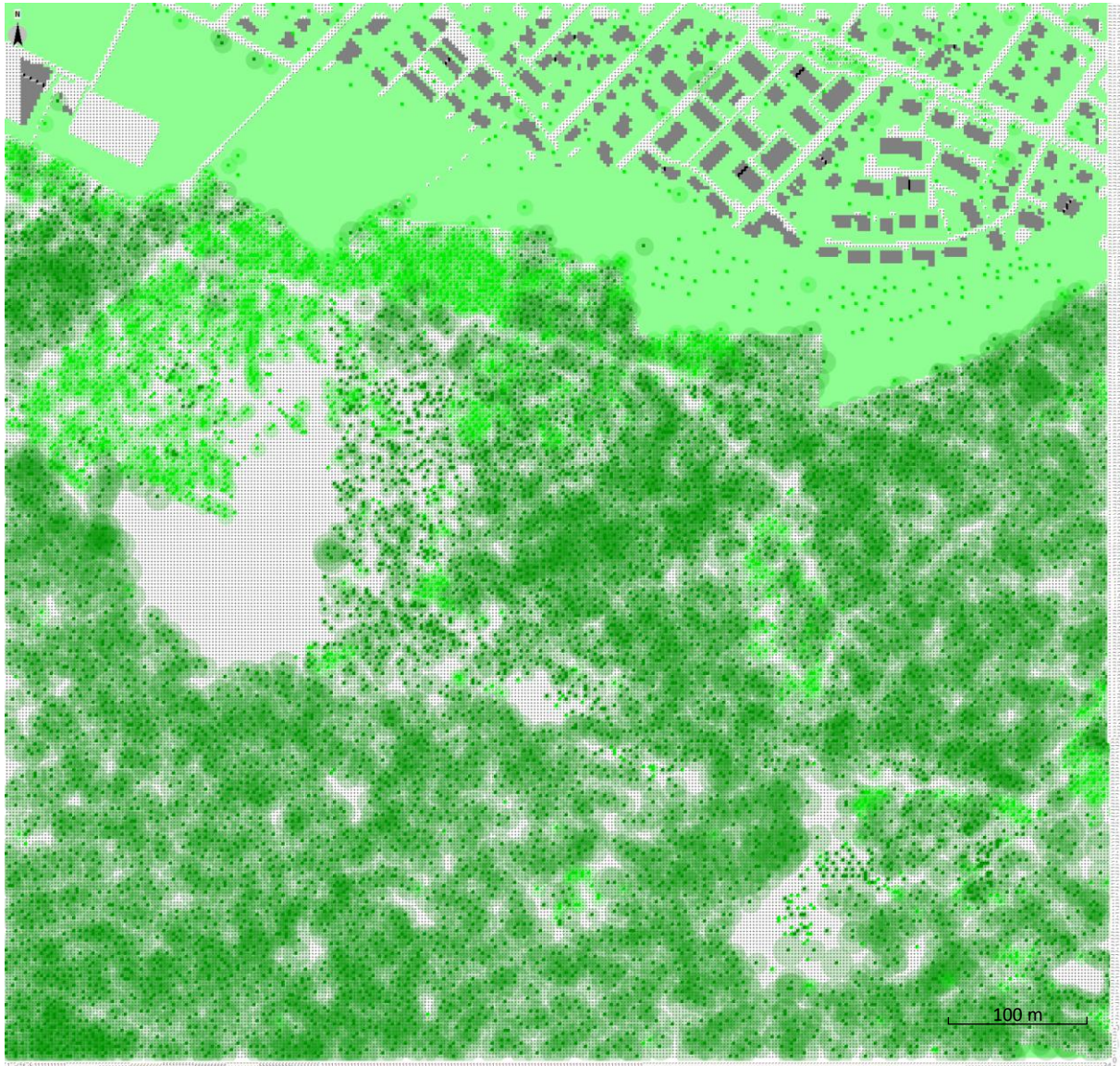
KLAM_21 ist ein vom Deutschen Wetterdienst entwickeltes zweidimensionales, mathematisch-physikalisches Simulationsmodell zur Berechnung von Kaltluftflüssen in orographisch gegliedertem Gelände für Fragen der Standort-, Stadt- und Regionalplanung. Das Modell simuliert die Entwicklung von Kaltluftflüssen und die Ansammlung von Kaltluft in einem rechteckig begrenzten Untersuchungsgebiet. Über diese Fläche wird ein numerisches Gitter gelegt. Jedem Gitterpunkt werden eine Flächennutzung sowie eine Geländehöhe zugeordnet. Jeder Landnutzungsclassen wiederum entspricht eine fest vorgegebene Kälteproduktionsrate und eine "Rauigkeit" als Maß für den aerodynamischen Widerstand. Das Zusammenspiel dieser Einflussgrößen bestimmt das Entstehen, Fließen und die Ansammlung der Kaltluft. Der Start der Simulation liegt kurz vor Sonnenuntergang. Zu beliebig wählbaren Zeitpunkten können danach Resultatkarten erzeugt werden. Der maximale Simulationszeitraum (8 h oder 240 min) entspricht dabei dem Zeitpunkt der maximalen Auskühlung [81].

A.6 Profillinien

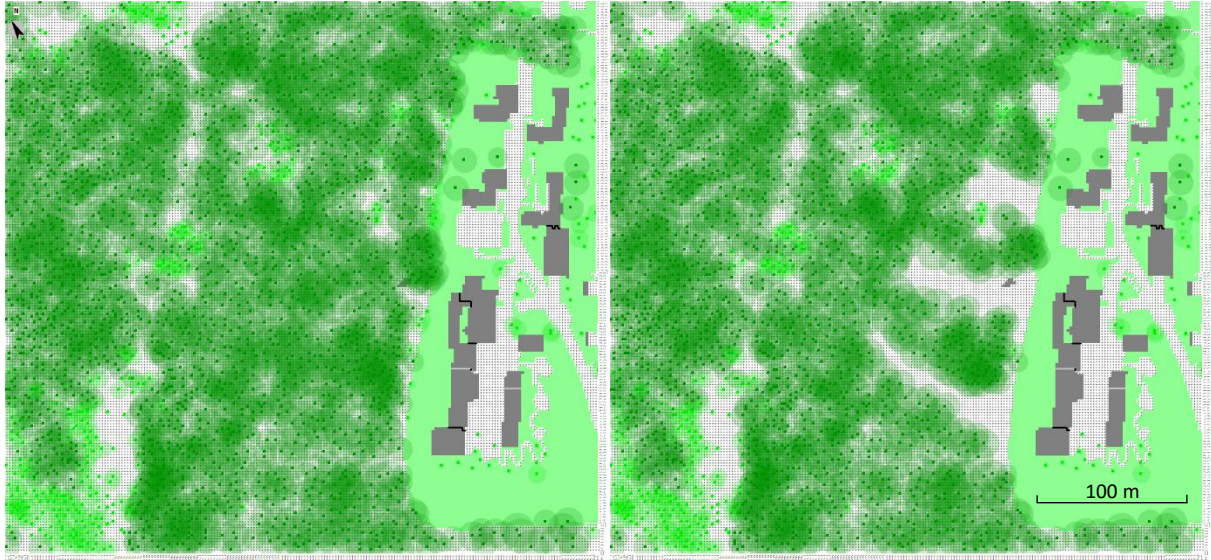


Profilinien der Waldspaziergänge in Baden, Meierhof.

A.7 Modellansichten

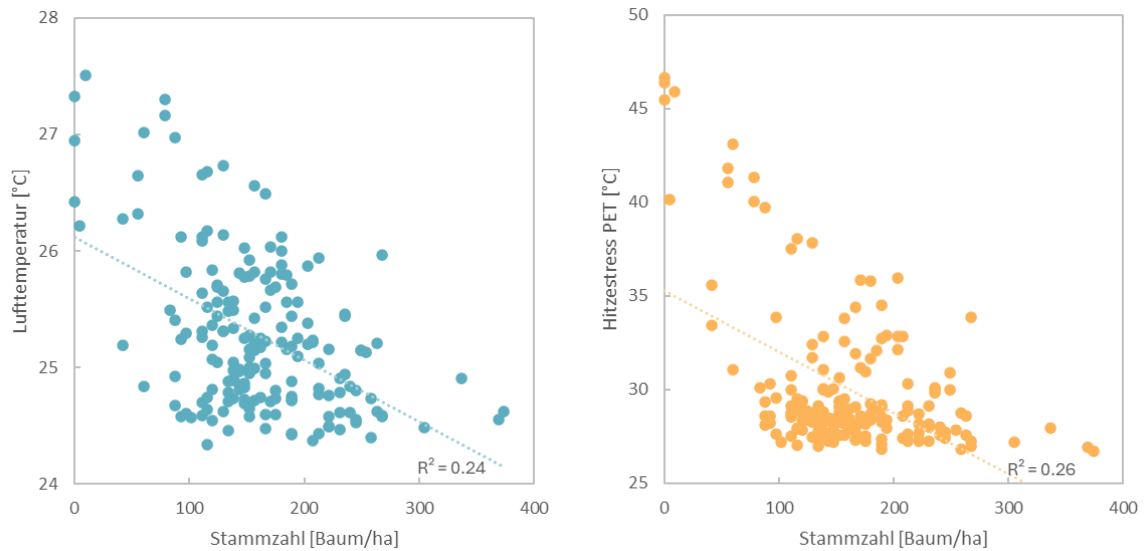


Modellebene Vegetation und Gebäude für das Waldgebiet Gönert bei Aarau (ohne Modellebene Oberfläche) mit den Einzelbäumen und dem entsprechenden Kronenradius (rund dargestellt, im Modell entsprechend in Gitterform).

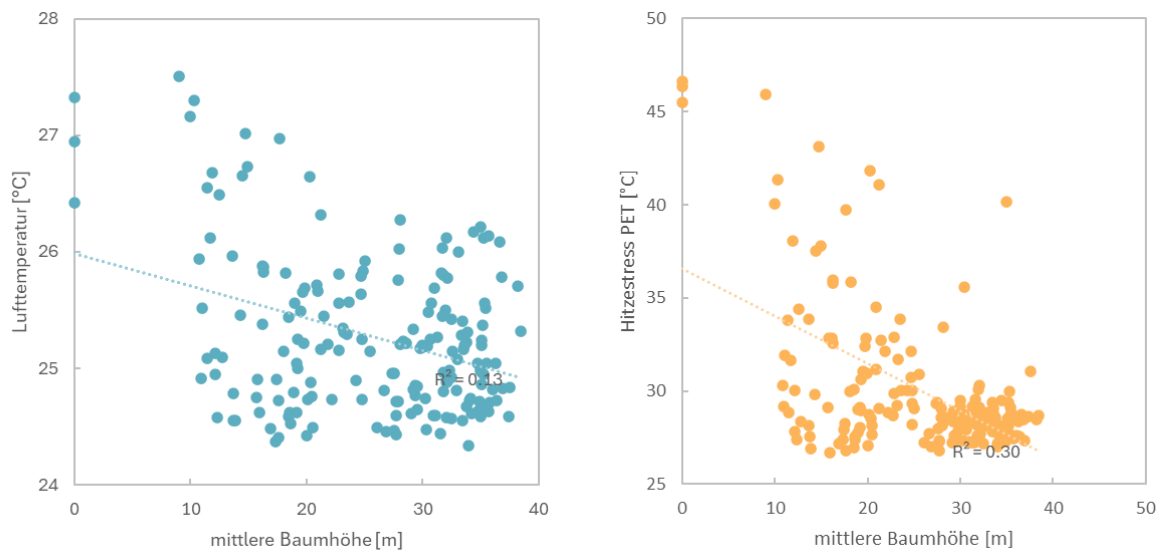


Modellebene Vegetation und Gebäude für das Gebiet Meierhof in Baden (ohne Modellebene Oberfläche) mit den Einzelbäumen und dem entsprechenden Kronenradius (rund dargestellt, im Modell entsprechend in Gitterform). Links ist der aktuelle Zustand gemäss Geodaten des Kantons Aargau und rechts das simulierte Szenario mit gerodeten Waldschneisen dargestellt.

A.8 Abhängigkeiten im räumlichen Mittel



Abhängigkeit der Lufttemperatur (links) und der PET (rechts) von der Stammzahl im räumlichen Mittel (Bienenwabenmuster mit 50 m Abstand, jeweils 0.22 ha).



Abhängigkeit der Lufttemperatur (links) und der PET (rechts) von der Baumhöhe im räumlichen Mittel (Bienenwabenmuster mit 50 m Abstand, jeweils 0.22 ha).