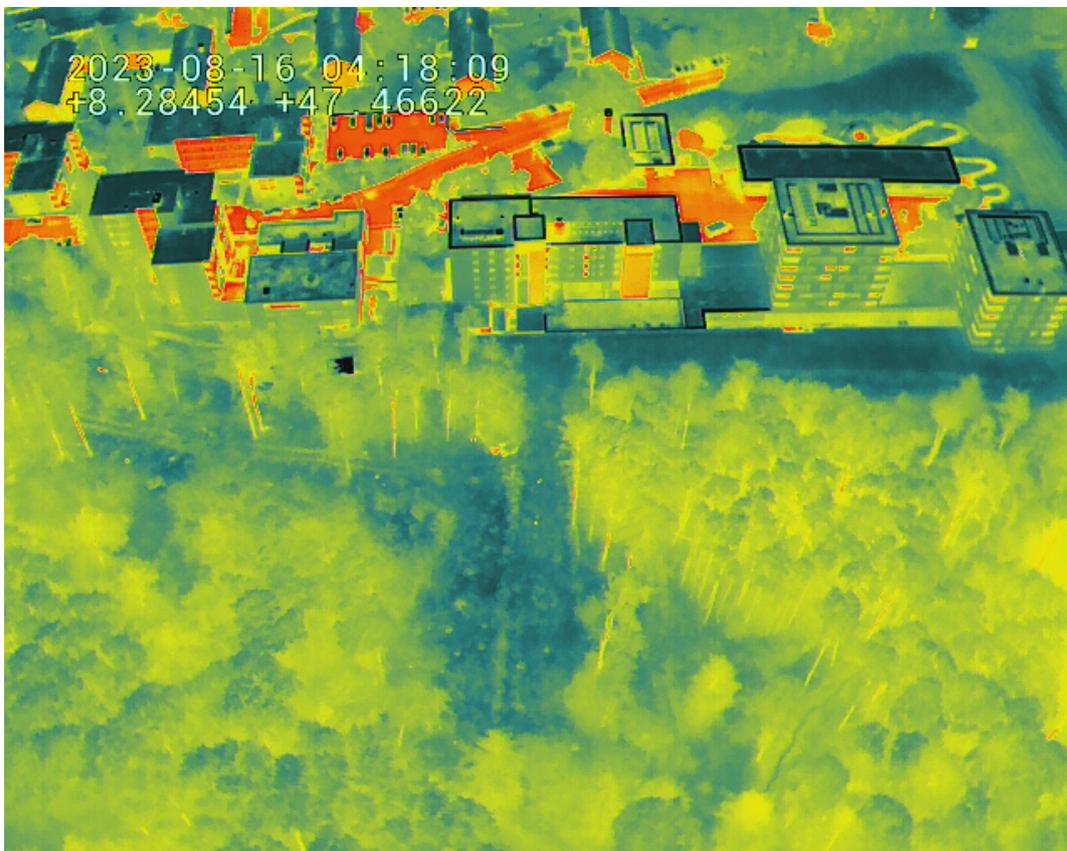


Kaltluftkorridore im Kehlwald in Baden



Impressum

Georg von Graefe, Stadtforstamt Baden
Janosch Jörg, Freelancer Messtechnik, freelance@janjo.ch

Baden, 13. Dezember 2023

Inhaltsverzeichnis

1	Zusammenfassung	4
2	Ausgangslage und Aufgabenstellung	6
2.1	Naturräumliche, organisatorische und Klimagrundlagen	6
2.1.1	Ökosystemleistung Kaltluftströme	6
2.1.2	Klimaanalysekarten des Kantons Aargau	8
2.1.3	Versuchssperimeter Kehl	9
2.1.4	Waldbestand (Bewirtschaftungseinheit) vor dem Holzschlag	9
2.1.5	Ausbildung des Versuchs (Holzschlag)	10
2.1.6	Vernetzung und Kommunikation	11
2.1.7	Einbettung in das Stadtforstamt Baden	12
2.2	Aufgabenstellung & Hypothesenerkundung	13
3	Versuchsanordnung und Messmethodik	13
3.1	Kaltluftkorridore	13
3.2	Wahl der passenden Versuchsanordnung	14
3.2.1	Ansatz 1: Vergleich vor und nach Forsteingriff	14
3.2.2	Ansatz 2: Vergleich innerhalb und ausserhalb der Schneisen	15
3.3	Temperaturmessung	15
3.3.1	Standorte	16
3.4	Sensortypen	17
3.4.1	WTDL1	17
3.4.2	SHT31 SmartGadget	17
3.5	Auswertung	18
3.5.1	Rohdaten	18
3.5.2	Zusätzliche Messungen	19
3.5.3	Terrainuntersuchung	19
3.5.4	Temperaturunterschiede	19
4	Wirkungskontrolle bei Bewohnerinnen Kehl und Waldbesuchern	20
4.1	Begleitende Umfrage im Alterszentrum Kehl	20
4.2	Umfrage beim Kaltluftstuhl (Partizipation)	21
5	Resultate	22
5.1	Ermittlung Tages-Referenztemperatur	22
5.2	Standortspezifische Temperaturen in vordefinierten Zeitbereichen	22
5.3	Gegenüberstellung der Tages-Referenztemperatur und der Abkühlung	23
5.4	Vergleich beider Messkampagnen 2022/23	23
5.4.1	Vergleichbarkeit der Jahre 2022 und 2023	24
5.5	Unterschiede 2023 zwischen verschiedenen Beständen	25
5.6	Schlussfolgerung	26

6	Fazit und Empfehlungen	27
6.1	Fazit	27
6.2	Empfehlung für ein weiteres Vorgehen	27
	Abbildungsverzeichnis	28
	Tabellenverzeichnis	29

1 Zusammenfassung

Kann das Abfliessen von kalter Luft in warmen Sommernächten in siedlungsnahen Hangwäldern beeinflusst werden?

Dieser Frage hat sich der Versuch im Badener Wald oberhalb des Alterszentrums Kehl gewidmet. Im Rahmen einer regulären, geplanten Waldpflege wurden 30-100m lange und 20-30m breite Korridore im Wald angelegt, um die kalte Luft zu kanalisieren. Hinweise zu diesem natürlich ablaufenden Phänomen des nächtlichen Herunterströmens von kalter Luft von den bewaldeten Höhen in tiefer gelegenen Siedlungen finden sich in den Klimaanalysekarten des Kantons sowie in den Erzählungen altgedienter Badener Forstwerte, zum Beispiel im nahegelegenen Eulengraben.

2022 wurden im Wald oberhalb der Siedlung Kehl in Baden vor dem forstlichen Eingriff 22 Sensoren im Wald, in den geplanten Korridoren und dazwischen, sowie in der Siedlung zur Temperaturmessung aufgestellt. Mittels frühmorgendliche Drohnenflüge vor Sonnenaufgang um 04:00 Uhr wurde im Juli 2022 versucht, schon bestehende Kaltluftströme aufzuspüren.

Im Winter 2022/23 wurden die Kaltluftkorridore unter Berücksichtigung der Mikrotopografie wie z.B. Bachläufe oder Rinnen angelegt.

Im sehr warmen und trockenen Sommer 2023 wurden die Bevölkerung der angrenzenden Siedlung informiert, eine Kaltluftbank für Rückmeldungen aus der Bevölkerung (Citizen Science) aufgestellt und die Temperatur mittels Sensoren gemessen. Ausserdem wurde eine Umfrage bei Bewohnenden des Altersheims durchgeführt.

Der Versuch ist als Hypothesenerkundung angelegt. Die Messdauer (nur zwei Vegetationsperioden), die Anzahl der Messpunkte (22), der konkrete Waldbestand als Unikat und die fehlende Messung des Luftstroms lassen keine allgemein gültigen Aussagen zu. Der Versuch gibt aber Hinweise, ob die modellierten Temperaturunterschiede gemessen werden können, ob diese durch waldbaulichen Eingriffen beeinflussbar sind und wie die Akzeptanz in der Bevölkerung eingeschätzt werden kann. Aus Sicht der Waldbesitzerin Ortsbürgergemeinde Baden kann eine zusätzliche Waldleistung aufgezeigt und später gegebenenfalls in Wert gesetzt werden. Die aussergewöhnlich breite Medienberichterstattung sowie die fachliche Neugierde und Begleitung massgebender Wald- und Klimainstitutionen zeigt das hohe gesellschaftliche Interesse an der Kühlleistung des Waldes im aufziehenden Klimawandel. Der Versuch hat eine breite Bevölkerung auf das Thema der kühlenden Nachtluft sensibilisiert. Es konnten auch Gruppen erreicht werden, die skeptisch zur Relevanz des Klimawandels stehen. Weiter konnte der Badener Bevölkerung aufgezeigt werden, dass sich das Stadtforstamt aktiv um das Thema sorgt, Lösungsansätze aufzeigt und innovative Ansätze ausprobiert.

Das Stadtforstamt wird das Projekt kommunikativ weiterführen. So sollen im Sommer 2024 von der Badenfahrt recycelte Flatterbänder in den Kaltluftkorridoren den Luftzug visualisieren. Auch das Kaltluftbänkli soll – etwas aufgefrischt – nochmal einen Sommer der Bevölkerung die Gelegenheit bieten, am eigenen Körper die kühlende nächtliche Waldluft zu spüren. Über weitere Versuche am gleichen oder anderen Ort wird nach Konsultation mit den Projektpartnern, denen wir an dieser Stelle für ihr Engagement herzlich danken, entschieden.

Zur Untersuchung der Wirkung des Eingriffs in den Waldbestand auf die Temperatur am Waldrand bzw. in der Siedlung wurden methodisch zwei Ansätze gewählt:

1. Temperaturvergleich vor (2022) und nach (2023) dem Eingriff im gleichen Waldstück/Kehl. Dazu wurden Tage anhand ihrer Temperatur um 21 Uhr kategorisiert (Referenztemperatur) und eingeordnet. Die Abkühlung zwischen 21 und 4 Uhr beider Messjahre wurde an Referenztagen gegenübergestellt.

2. Temperaturen im gleichen Jahr 2023 im Einflussbereich des Eingriffs wurden im nahegelegenen, unbehandelten vergleichbaren Waldstück gegenübergestellt.

Die Hypothesenerkundung im vorliegendem Versuch Baden/Kehl findet keinen statistisch signifikanten Hinweis, dass sich die Temperaturen unterhalb neu angelegter Korridore von unbehandelten Referenzstandorten unterscheiden – weder zwischen den Jahren 2022 und 2023 (Ansatz 1) noch innerhalb des Jahres 2023 (Ansatz 2).

Die **Schlussfolgerung** aus dem Versuch im Badener Wald oberhalb des Alterszentrums Kehl deutet darauf hin, dass das untersuchte System zu klein ist, um statistisch signifikante Ergebnisse zu generieren. Insbesondere sind die inneren Waldränder der Korridore nicht genügend dicht, um eine Lenkungswirkung zu erzeugen. Die begrenzte Grösse des Systems könnte eine präzise Erfassung von relevanten Parametern behindert haben.

Die Erfassung und Unterscheidung von **Temperaturunterschieden** gestaltete sich als herausfordernd. Die gewählte Methode zur Temperaturmessung, insbesondere im Bezug auf die zeitliche und räumliche Dimension, erwies sich als nicht ausreichend feingliedrig, um signifikante Unterschiede zwischen behandelten und unbehandelten Bereichen zu identifizieren.

Die **Analyse der Luftströmung** wird als der nächste mögliche Schritt betrachtet. Bisherige Bemühungen konzentrierten sich auf die Temperatur, aber umfassendere Erkenntnisse könnten durch die Messung und Analyse der Luftströmung gewonnen werden. Dieser Aspekt wird als entscheidend für das Verständnis der Kaltluftströme und ihrer Beeinflussung durch waldbauliche Massnahmen angesehen.

Die **kommunikativen Massnahmen**, darunter die Anlage von Korridoren im Wald und die **Verwendung von Flatterbändern**, haben zum Ziel, die Produktion von kalter Luft durch den Wald visuell erlebbar zu machen. Dies trägt nicht nur zur Sensibilisierung der Bevölkerung bei, sondern ermöglicht auch eine direkte Veranschaulichung der komplexen Zusammenhänge zwischen der Waldumgebung und der erzeugten Kaltluft. Die Integration von visuellen Elementen wird als eine wirksame Methode zur Verbreitung von Umweltbewusstsein und Verständnis betrachtet.

Weiter möchten wir auf verschiedenen Höhen im Korridor und im angrenzenden Wald während der Sommermonate 2024 Flatterbänder aufstellen, um so optisch der Bevölkerung anschaulich zu zeigen, dass kühle Luft gegen die Siedlung fliesst. Die Flatterbänder vom 'Pier' an der Badenfahrt 23 werden hier wiederverwertet.

Für weitere belastbare Aussagen müssen vertieftere, längere und breitere Versuche angelegt und wissenschaftlich und methodisch begleitet werden, z.B. in Form einer Master- oder Doktorarbeit.

Das Stadtforstamt Baden dankt dem BAFU für die finanzielle Unterstützung und das Vertrauen. Ein grosser Dank möchte das Stadtforstamt auch Willi Glaeser für seine passend designte Kaltluftbank aussprechen. Die Zurverfügungstellung von Temperatursensoren durch die ZHAW hat den Versuch ebenfalls ermöglicht. Weiter war die Kooperation mit dem Alterszentrum Kehl erfreulich.

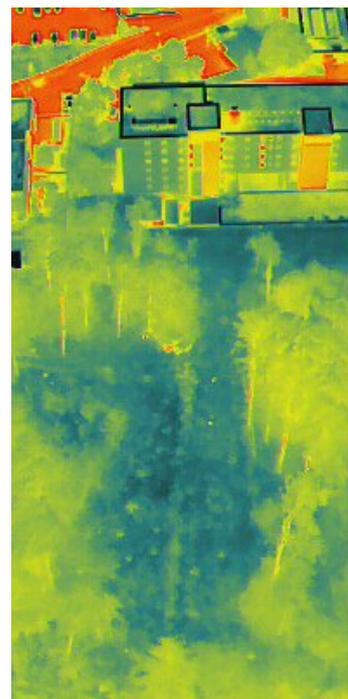


Abbildung 1: Wärmebild einer Thermodrohne mit Kaltluftschneisen (dunklere Grünfärbung = kühler) und Alterszentrum Kehl

2 Ausgangslage und Aufgabenstellung

2.1 Naturräumliche, organisatorische und Klimagrundlagen

2.1.1 Ökosystemleistung Kaltluftströme

Der Badener Wald liegt mehrheitlich auf Kuppenlagen und produziert in warmen Sommernächten Kaltluft. Diese fliesst aus physikalischen Gründen nach unten ab. So kühlt der Wald den darunterliegenden Siedlungsraum. Neben der eigenen Erfahrung wird dieser Effekt auch in den kantonalen Klimakarten ersichtlich, welche auf Computer-Simulationen basieren.

Luftaustausch Wald ↔ Siedlungsflächen

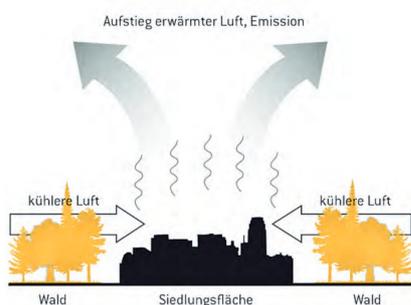


Abbildung 2: Kühle Luft fliesst in die Stadt

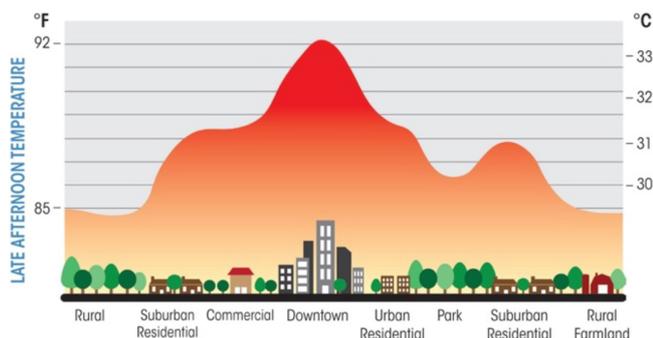


Abbildung 3: Siedlungswirkung auf die Wärmeverteilung

Die Sommernächte werden aufgrund des fortgeschrittenen Klimawandels wärmer. In den vermehrt auftretenden Tropennächten sinkt die Temperatur nicht mehr unter 20 °C (z. B. Luzern: 1960: 4 Tropennächte; 2020: 15 Tropennächte). Dadurch wird der menschliche Schlaf weniger erholend. Betroffen von der Hitze sind alle, aber ältere Menschen leiden mehr und häufiger.

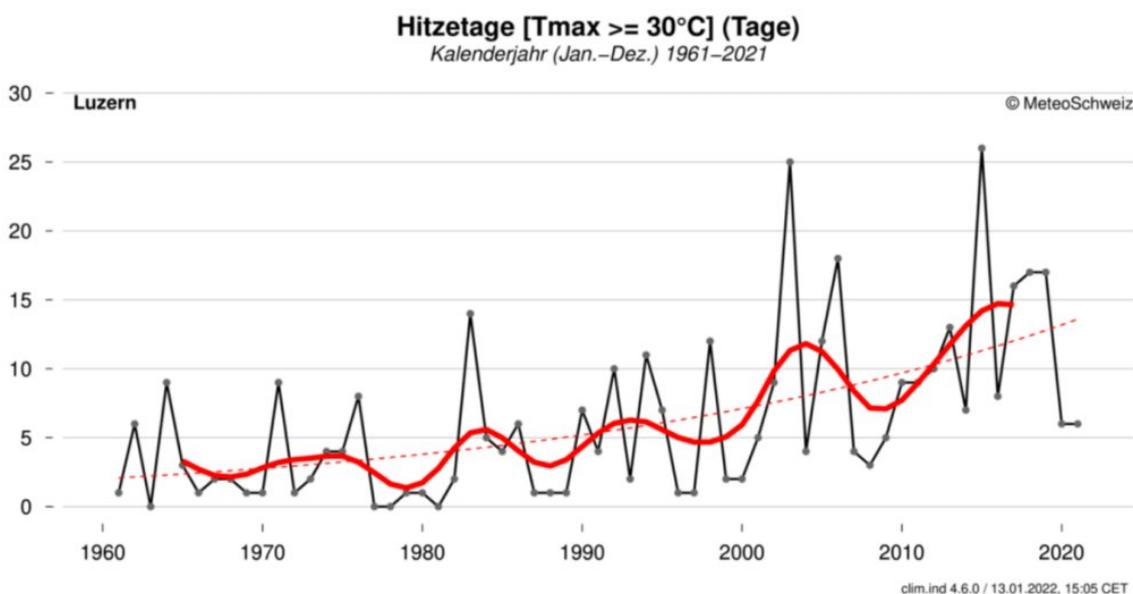


Abbildung 4: Entwicklung der Hitzetage in Luzern von 1961 bis 2020 (Quelle: MeteoSchweiz)

Nächtliche Kaltluftströme, die von den höhergelegenen Waldkuppen in die Siedlungen fließen, können die Schlaf- und Lebensqualität verbessern. Dies ist eine weitere Ökosystemleistung des Waldes zu Gunsten des Menschen. Mit dem hier beschriebenen Versuch soll eine aktive Steuerung in der Praxis getestet werden.

Im Vergleich: 2021 sind covidbedingt 2'500 Menschen mehr gestorben als erwartet. Die Hitzebelastung führt – v. a. bei vulnerablen und älteren Menschen – zu einer massgebenden erhöhten Sterblichkeit.

Sommer	Rangfolge der heissesten Sommer	Zusätzliche Todesfälle (Anzahl)	Übersterblichkeit (%)
2003	1	975	6.9
2015	2	804	5.4
2019	3	521	3.5

Abbildung 5: Hitzebedingte Übersterblichkeit in der Schweiz (Juni - August); (Quelle: Bundesamt für Statistik und Bundesamt für Gesundheit)

Gemäss einer Studie aus dem Waldlabor Zürich (WaldZürich, 2023) ist die Ökosystemleistung einer Hektar geschlossenen Waldes bezüglich der Verdunstungswärme enorm: Zur Erreichung derselben Kühlleistung müssten in 78 Hotelzimmern das ganze Jahr die Klimaanlage laufen, was Kosten von ca. 250'000 CHF verursachte.



Abbildung 6: Durch vier solcher schmaler Korridore soll in warmen Sommernächten Kaltluft zum Altersheim Kehl in Baden AG strömen.

2.1.2 Klimaanalysekarten des Kantons Aargau

Die Klimaanalysekarte des Departements Bau, Verkehr und Umwelt BVU (Januar 2021) bildet die Funktionen und Prozesse des nächtlichen Kaltluftaustausches ab (Kaltluftströmung-felder, Kaltluftlieferung der Grün- und Freiflächen, Kaltluftentstehungsgebiete und Kaltlufteinwirkungsbereiche innerhalb des Siedlungsgebiets). Für das Siedlungsgebiet stellt sie die nächtliche Überwärmung (Wärmeinseleffekt) dar. Sie beschreibt die Ist-Situation um 4 Uhr nachts. Zu diesem Zeitpunkt ist die langwellige Ausstrahlung maximal und das Kaltlufthaushaltssystem vollständig ausgebildet.

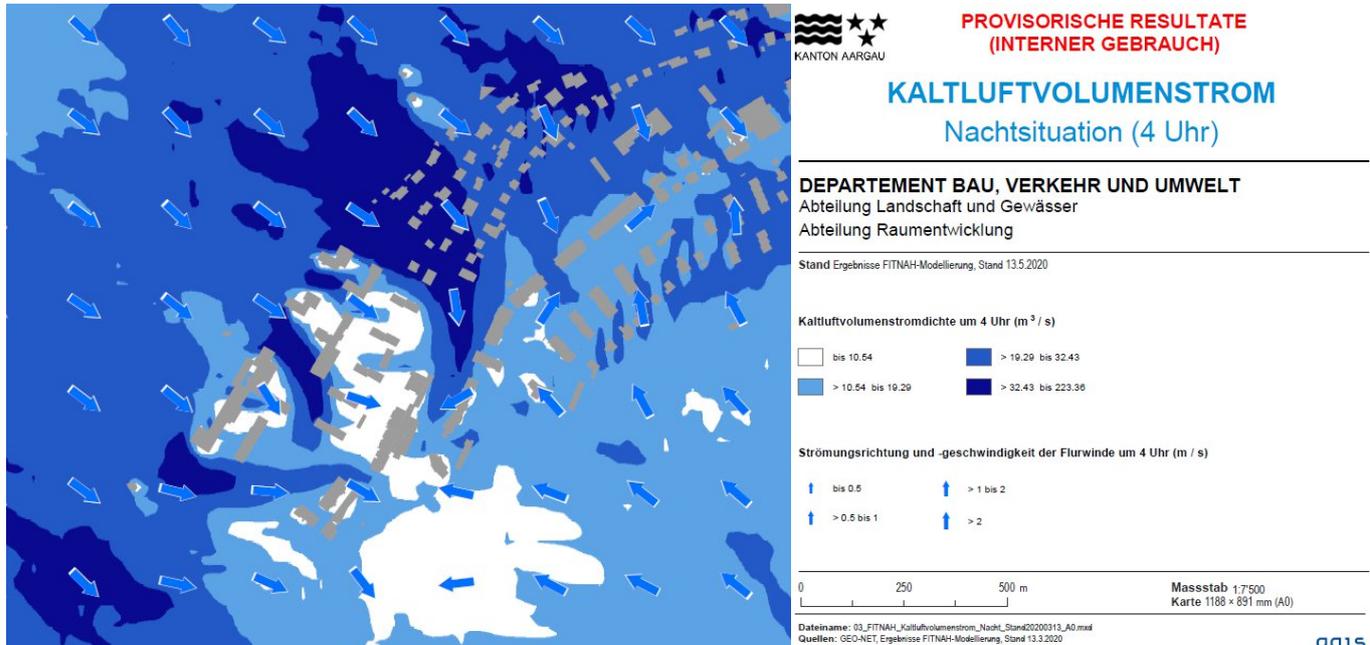


Abbildung 7: Klimaanalysekarte

Ersichtlich ist der Kaltluftstrom aus dem Wald in Richtung des unten gelegenen Alterszentrum sowie die blockierende Wirkung der hangparallel stehenden Gebäude.

Für Baden wurde eine Stadtklimasimulation im Entwicklungsperimeter Oberstadt erstellt (Ing. Geopartner im Auftrag des Kantons AG und der Stadt Baden). Empfohlen wird darin Kaltluftkorridore zu definieren und auszuscheiden. Weniger im Fokus waren Fragen, wie weit sich diese Korridore in den Wald fortsetzen sollen. Vorliegende Überlegungen könnten wertvolle Ergänzungen für weiterführenden Untersuchungen liefern.

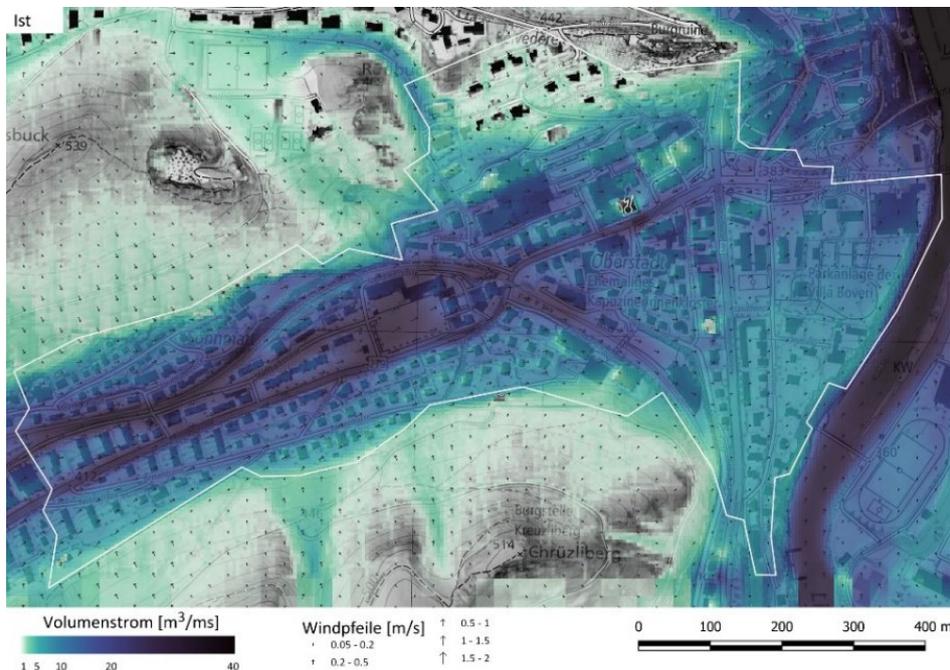


Abbildung 8:
Kaltluftabfluss –
Kaltluftvolumenstrom
aus
Stadtklimasimulation
Oberstadt + Baden
(von Geopartner /
Andreas Wicki)

2.1.3 Versuchssperimeter Kehl

Der Versuchssperimeter KEHL liegt in Baden am südöstlichen Rand des Waldkomplexes Sonnenberg. Unmittelbar angrenzend an den Waldrand stehen die drei Gebäudekomplexe Alterszentrum Kehl, Genossenschaften Lägern und Pro Familia mit einer z.T. älteren Bewohnerschaft. Der Wald schliesst unmittelbar oberhalb an diese Gebäude an und steigt zum Sonnenberg an.

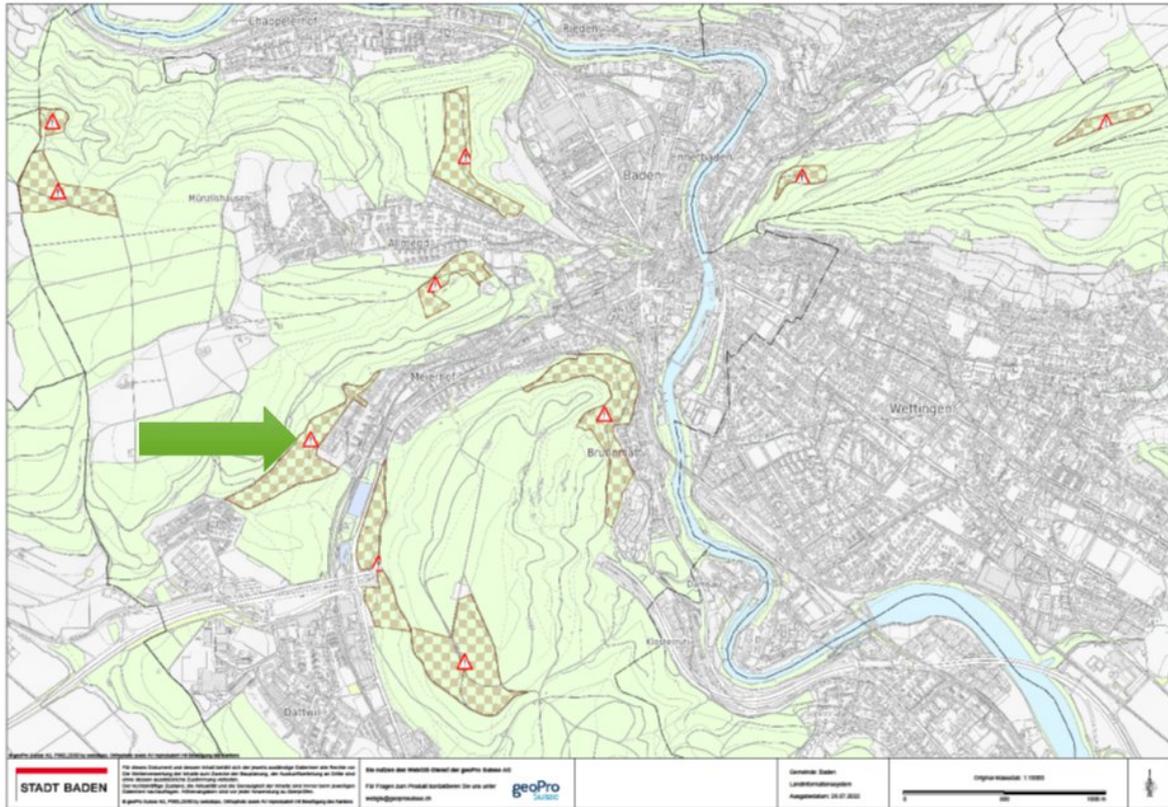
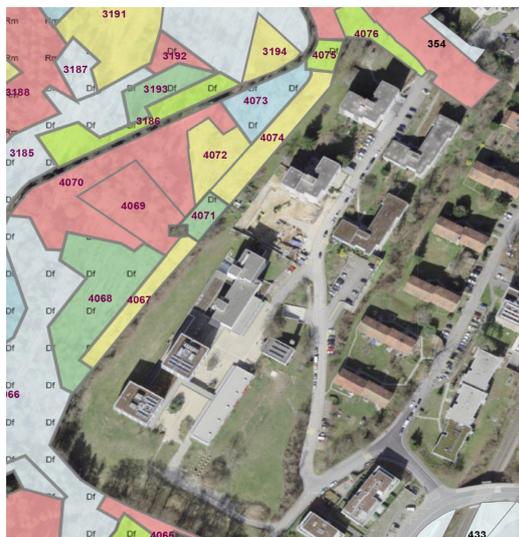


Abbildung 9: Lage des Projektes (grüner Pfeil) und geplante Holzschläge (karierte Signatur) 22/23 im Badener Wald

2.1.4 Waldbestand (Bewirtschaftungseinheit) vor dem Holzschlag



Oberhalb der Siedlungen steigt der Wald an. Der Waldbestand zeichnet sich mehrheitlich durch ein Baumholz III mit erntereifen Fichten und Eschen in der Oberschicht und beigemischten Buchen aus. Der Deckungsgrad liegt bei 80%. Der südlichen Teil des Waldrandes wurde 2021 als ökologisch gestufter Rand mit vorgelagertem Krautsaum gepflegt (Bestand 4067).

Abbildung 10: Bestandeskarte (2011) im Wald oberhalb des Alterszentrums Kehl, Genossenschaften Pro Familia und Lägern; in den Jahren 2011 - 2023 sind die Bestände in die jeweils nächste Entwicklungsstufe eingewachsen

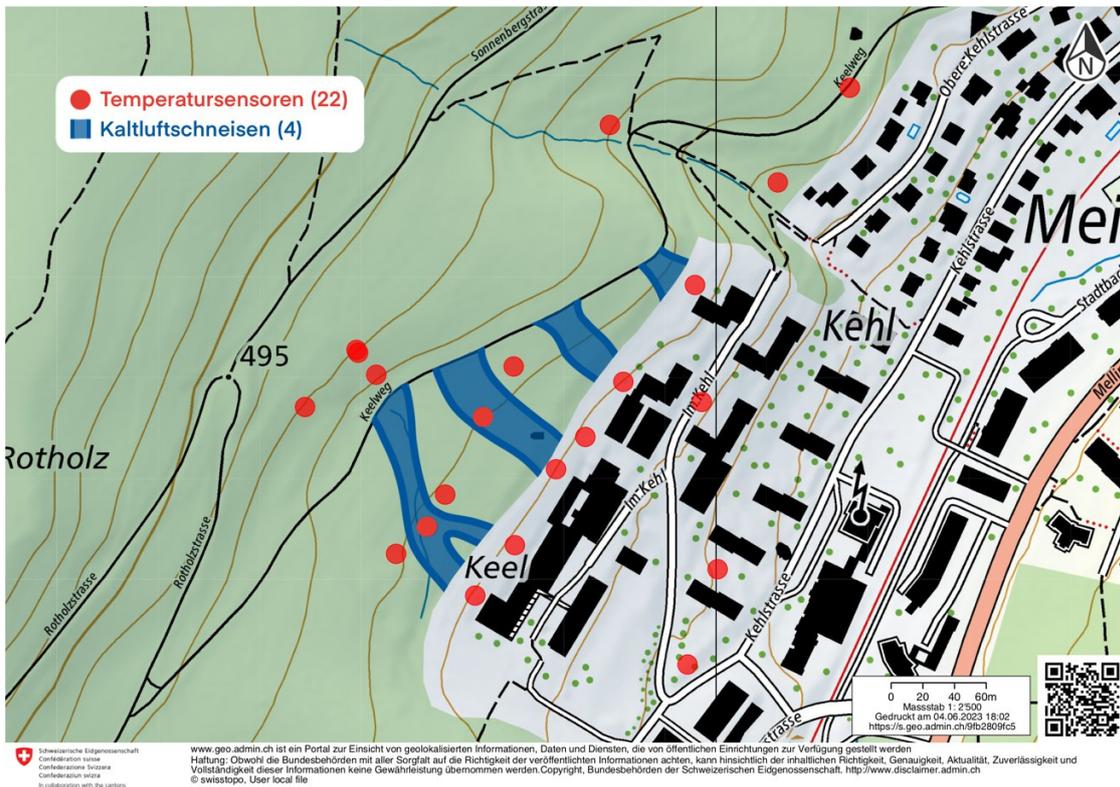


Abbildung 13: Schematische Darstellung der Kaltluftkorridore mit Standorten der Temperatursensoren

2.1.6 Vernetzung und Kommunikation

Im Vorfeld des Versuchs wurde sowohl mit den angrenzenden Anwohnern, als auch mit Wald- und Klimaexperten das Gespräch gesucht. Wichtige Inputs konnten im Versuch berücksichtigt werden. Einzelne Anregungen zur zeitlichen oder fachlichen Ausdehnung oder Vertiefung hätten aber diesen Praktikerversuch gesprengt und bilden den Fragekatalog für weitergehende Untersuchungen.

- Um den Bewohnenden die kaltluftoptimierte Waldpflege zu erläutern, wurde im Herbst 2022 eine Informationsveranstaltung für die drei hauptbetroffenen Siedlungen mit anschließendem Apéro durchgeführt.
- Um die Kühlleistung des Waldes aufzuzeigen, wurde am Waldrand am Kehl beim Kaltluftaustritt ein Kaltluftbänkli aufgestellt werden. Die Bevölkerung wurde aufgefordert, selber den kühlenden Effekt zu spüren und in mittels QR-Code ihre Beobachtungen zu kommentieren. Entworfen und gebaut wurde diese Kaltluftbank vom bekannten Badener Designer Willi Glaeser.
- Bei diversen Begehungen (Sommerwaldumgang der Ortsbürgergemeinde Baden, Walderläuterungen mit dem Vorsteher des Volkswirtschaftsdepartement des Kanton Aargau, Begehung mit der Forstkommission, Försterrapport des Forstkreises 2, Behördenbereisung mit dem Kantonsoberrforster, Besuch des Berner Forstdienstes) wurde das Projekt vorgestellt. Die Abteilung Wald (Kt AG) begleitet das Pilotprojekt mit der Erarbeitung einer Literaturrecherche.

- Das Bundesamt für Umwelt BAFU, Abteilung Klima, unterstützt den Versuch mit einem namhaften Betrag. Weiter hat das BAFU eine Studie zu waldbezogenen Geschäftsmodellen bei einem privaten Ingenieurbüro in Auftrag gegeben. Der Kühlwald Kehl wird als Beispiel für eine innovative Geschäftsstrategie erläutert und beschrieben (2023/4).
- Experteninterview und Teilnahme an einem eintägigen Austausch zum Thema, 'Inwertsetzung nichtmonetärer Walddienstleistungen') organisiert vom BAFU am 30.11.23.
- Von der ZHAW konnten für den Versuch verdankenswerterweise Temperatursensoren ausgeliehen werden. Auch konkrete fachliche Messtechnik-Fragen konnten mit den Experten der ZHAW besprochen werden.
- In einem Review konnte mit der Abteilung Landschaft und Gewässer die Versuchsanordnung weiterentwickelt werden. Es zeigte sich erneut, dass die Wirkmechanismen des Kaltluftsystems auch in Fachkreisen nur rudimentär bekannt sind.

2.1.7 Einbettung in das Stadtforstamt Baden

Das Stadtforstamt Baden bewirtschaftet 691 ha Ortsbürgerwald rund um die Bäder- und Kulturstadt Baden. Mit seinen vier Standbeinen Holznutzung, Naturschutz, Erholung und externe Dienstleistungen werden vielfältige Walddienstleistungen für die Einwohner und Arbeitnehmerinnen erbracht. Im Dialog mit der Gesellschaft und Wirtschaft konnte das Badener Modell zur Abgeltung von Ökosystemleistungen etabliert werden (vgl. Abb. 14). Dabei engagieren sich Unternehmen für einzelne Walddienstleistungen v. a. im Bereich Naturschutz, wie dem Schutz von Quellwasser oder seltener Eiben und Eichen. Kommunikativ werden Anliegen des Waldes und des Naturschutzes so in wirtschaftsnahe Kreise getragen.

Da in Baden der Grossteil der Siedlungen am Wald liegt, ist im Sommer die kühlende Waldluft von besonderer standörtlicher Bedeutung. Der Wald kann hier eine weitere Leistung für die Wohn- und Arbeitsbevölkerung erbringen. Die Suche nach einem geeigneten Sponsor wird nach Fertigstellung des Projektes gestartet.



Abbildung 14: Produkte Stadtforstamt Baden inkl. der Inwertsetzung nichtmonetärer Walddienstleistungen

2.2 Aufgabenstellung & Hypothesenerkundung

Das Stadtforstamt Baden möchte in heißen Sommerperioden den nächtlichen Austritt von Kaltluft aus dem Wald lenken, um Siedlungen zusätzlich zur natürlichen Abstrahlung gezielt zu kühlen.

Kann der Waldbewirtschafter Einfluss auf Kaltluftströme nehmen? Wie lässt sich diese Ökosystemleistung qualitativ und quantitativ aufzeigen?

Aufgrund der komplexen Materie handelt es sich bei vorliegender Arbeit um eine **Hypothesenerkundung**. Können vorausgesagte Kaltluftströme plausibilisiert werden? Die Antworten führen zu vielen weiteren Fragen. Ein Problemlösungszyklus beginnt.

3 Versuchsplanung und Messmethodik

3.1 Kaltluftkorridore

Da sich die Kaltluft aus Erfahrung sowie in Simulationen nach unten abfließt, soll an dessen Austritt ins Wiesland ein etwas offenerer Waldrand geschaffen werden. Durch den Holzschlag sollen im hangwärtigen Bestand Abflusskorridore ausgebildet werden, die die Luft kanalisiert nach unten fließen lassen. Bereits vorhandene Runsen in der Hang-Topografie werden dabei berücksichtigt.

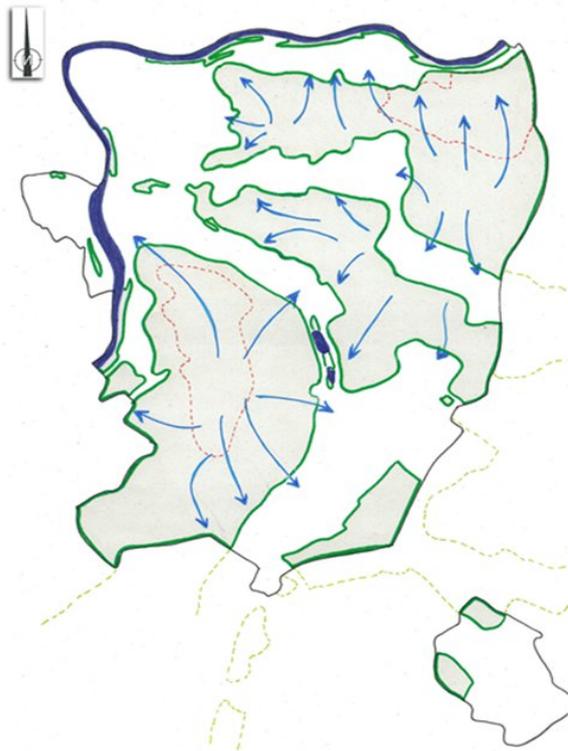


Abbildung 15: Kaltluftströme von den bewaldeten Hügelkuppen des Badener Waldes in die Siedlungen



Abbildung 16: Känel in der Hang-Topografie Stockmattgraben, Baden

3.2 Wahl der passenden Versuchsanordnung

Um den Effekt des Forsteingriffs auf die darunterliegende Siedlung zu untersuchen, ist eine Isolation dieses Einflusses gegenüber anderen Störfaktoren entscheidend. Es werden parallel zwei Ansätze verfolgt.

Ansatz 1 ermöglicht Rückschlüsse auf den **Effekt im Siedlungsgebiet**. Damit soll die Leitfrage beantwortet werden.

Ansatz 2 soll wertvolle Erkenntnisse zum **Systemverständnis «Kaltluftströme»** liefern und damit die Grundlagen für potentielle weitere Untersuchungen.

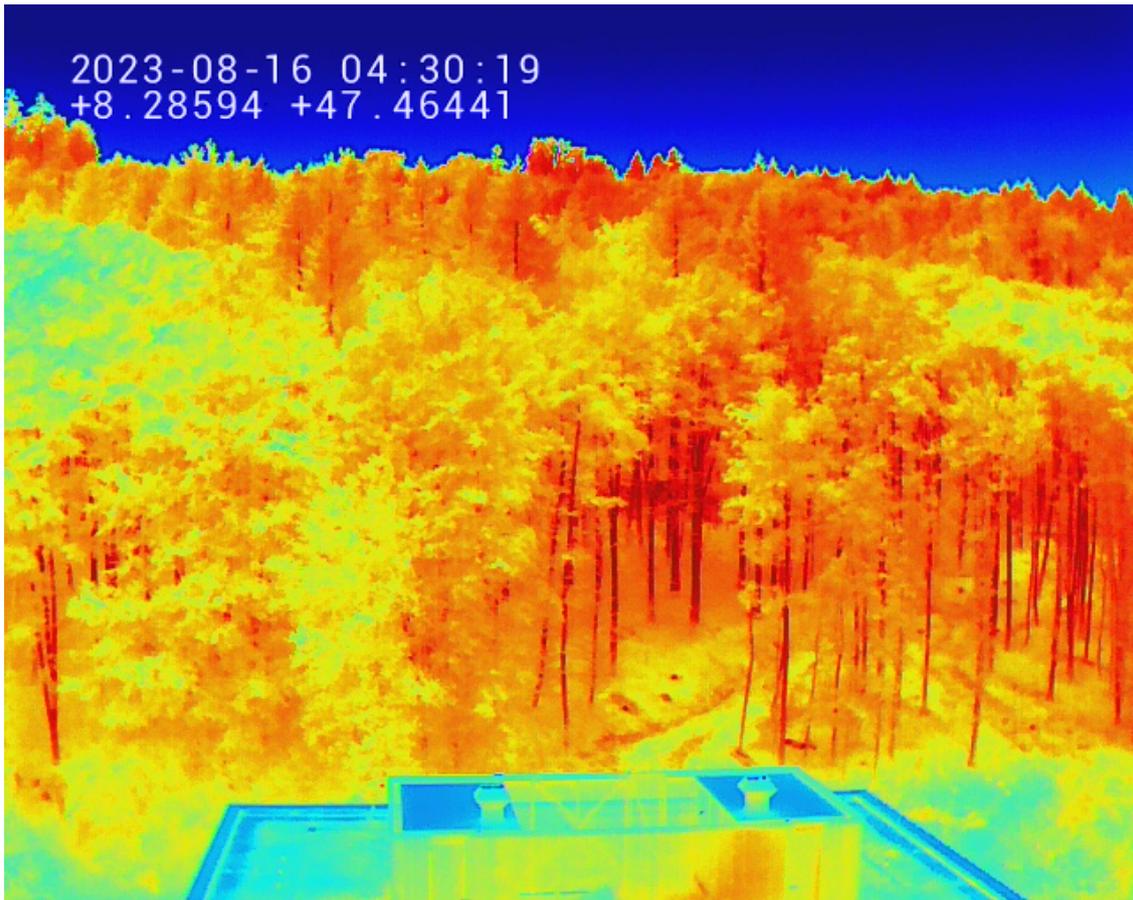


Abbildung 17: Blick einer Wärmebilddrohne vom Dach des Alterzentrums Kehl in einen Kaltluftkorridor

3.2.1 Ansatz 1: Vergleich vor und nach Forsteingriff

In diesem Ansatz wird das Kaltluftsystem als «Blackbox» betrachtet, lediglich der Effekt auf die darunterliegende Siedlung wird untersucht. Im Sommer vor und im Sommer nach dem Holzschlag werden an den identischen Standorten kontinuierlich die Temperaturen aufgezeichnet. Dadurch können standortbedingte Anomalien eliminiert werden.

In der Auswertung der Daten liegt die Herausforderung darin, dass klimatische Unterschiede der beiden Messperioden vom Einfluss des Holzschlags isoliert werden müssen. Dafür sorgen mehrere Massnahmen: Neben den Sensoren im Einflussbereich wurden auch Sensoren an Referenzstandorten platziert: Im Siedlungsgebiet, im Wald oberhalb des Eingriffes sowie an einem benachbarten Waldrandstück ohne Forstaktivität.

Mit einer Regressionsanalyse sollen nachträglich die klimatischen Variationen herausgerechnet werden. Zudem ist es rückblickend mit statistischer Auswertung möglich abzuschätzen, wie sehr sich die beiden Jahre unterschieden haben. Dafür stehen nebst der eigenen Daten auch Aufzeichnungen der MeteoSchweiz-Standorte «Lägern» und «Würenlingen/PSI» über Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Windgeschwindigkeit und Sonneneinstrahlung zur Verfügung.

3.2.2 Ansatz 2: Vergleich innerhalb und ausserhalb der Schneisen

Wertvolle Erkenntnisse kann auch das Platzieren von Sensoren in und ausserhalb der Kaltluftschneisen liefern. Dabei liegt der Fokus auf dem lokalen Einfluss des Waldbestandes auf die gemessenen Temperaturen. Aussagen über den Effekt auf die Siedlung können dabei nicht getroffen werden.

Im Vergleich zu Ansatz 1 bietet dieser Ansatz den Vorteil, dass der Effekt klimatischer jahrespezifischer Schwankungen wegfällt: Es werden jeweils identische Zeiträume miteinander verglichen. Jedoch können die Temperatur nach Sensorstandort leicht variieren.

3.3 Temperaturmessung

Um einen Effekt des Forsteingriffs nachweisen zu können, werden Temperatur-Daten-Logger eingesetzt. Diese befinden sich einerseits im Einflussbereich an den Enden der geschaffenen Kaltlufttrinnen, andererseits danebenliegend an Stellen, welche nicht im Einfluss der Forstarbeiten stehen. Die Nullmessung wurde im Sommer 2022 (Juli/August) aufgezeichnet. Der Pflegeeingriff wird im Winter 22/23 ausgeführt und die Vergleichsmessung wird im Juli/August 2023 vorgenommen.

Gelingt es, durch den Forsteingriff die Luftströmungen zu beeinflussen, so sollte dies auch einen Einfluss haben auf lokal gemessene Temperaturen. Daher wurden Mitte Juli 2022 an insgesamt neun Standorten Temperatur-Datenlogger aufgestellt: fünf im direkten Einflussbereich am Waldrand (1 bis 5), sowie vier weitere Sensoren an Standorten, die durch den Eingriff nicht beeinflusst werden (6 bis 9). Die vier Referenzsensoren ermöglichen später einen Vergleich, um abzuschätzen, ob gemessene Unterschiede wirklich auf den Eingriff zurückzuführen sind.

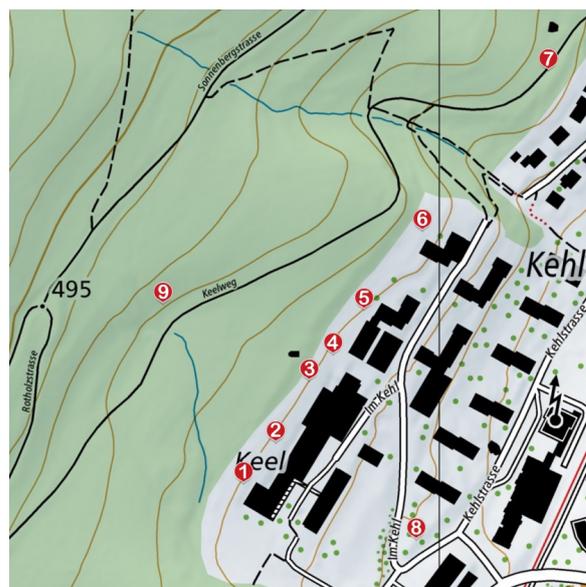


Abbildung 18: Messstandorte 2022-2023, die für Ansatz 1 ausgewertet wurden. Die Standorte 1 bis 5 befinden sich direkt unterhalb der Kaltluftschneisen, die Sensoren 6 bis 9 liefern Referenzwerte. Dadurch ist der Vergleich an identischen Standorten vor und nach dem Forsteingriff möglich. (Quelle: Swisstopo, eigene Ergänzungen)

Die direkte Messung und Auswertung von Luftströmungen ist um ein vielfaches komplexer als Temperaturmessungen. Da sich abwärtsgerichtete Strömungen mit Winden überlagern, gestaltet sich eine sinnvolle Auswertung als schwierig. Aus diesem Grund wurde auf direkte Windmessungen verzichtet.

3.3.1 Standorte

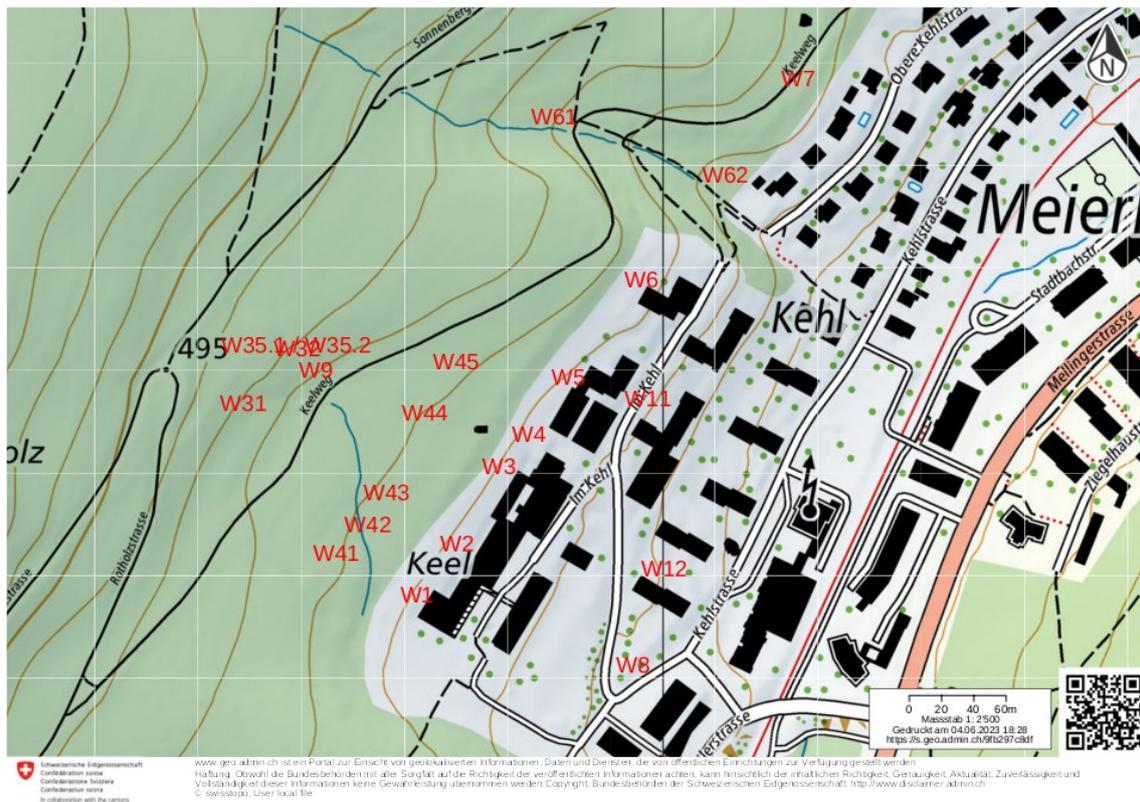
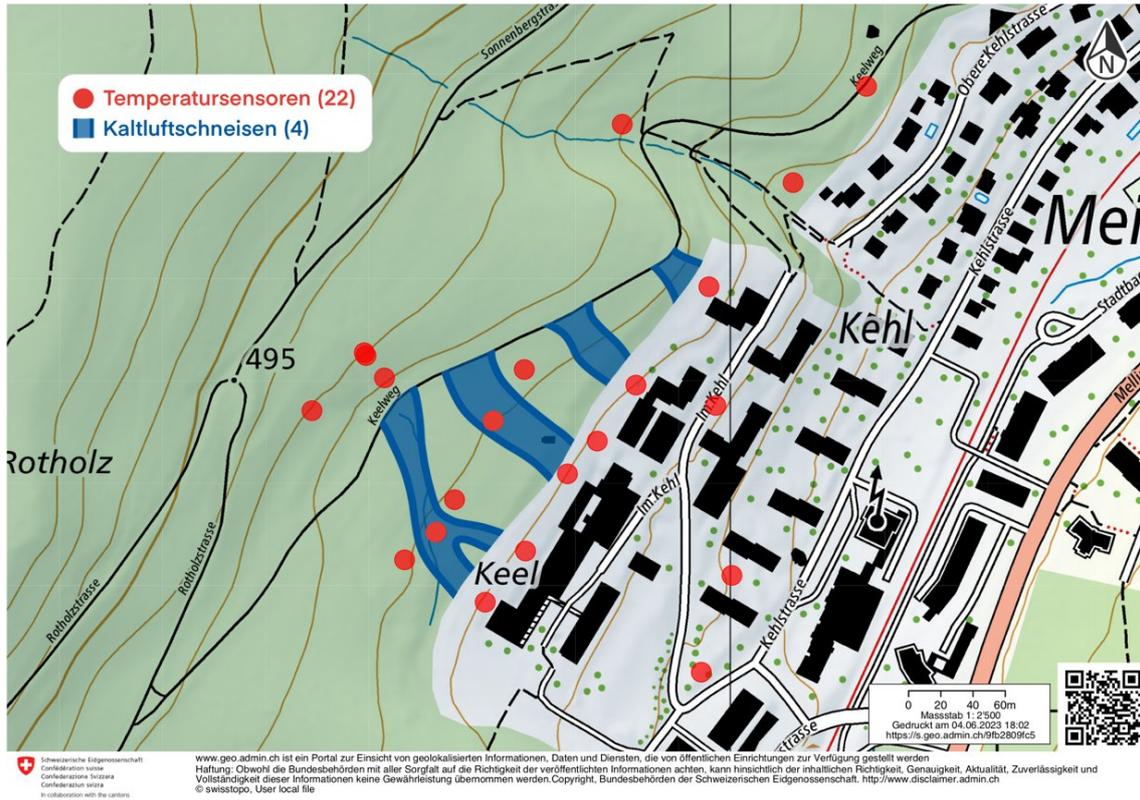


Abbildung 19: Messstandorte 2023, die für Ansatz 2 ausgewertet wurden. Die Standorte W11 und höher wurden im April 2023 angebracht und ermöglichen lokale Temperaturvergleiche in verschiedenen Zonen. (Quelle: Swisstopo, eigene Ergänzung)

ID	Beschreibung (2022-2023)	ID	Beschreibung (2023)
W1*	Waldrand unterhalb Forsteingriff	W11	Quartier Teer
W2*	Waldrand unterhalb Forsteingriff	W12	Quartier Rasen
W3*	Waldrand unterhalb Forsteingriff	W31	Wald
W4	Waldrand unterhalb Forsteingriff	W32	Wald
W5*	Waldrand unterhalb Forsteingriff	W35.1	Wald Baumkrone
W6*	Waldrand an Ende Holzschlag	W35.2	Wald Baumkrone
W7*	Referenz an Waldrand	W41	Holzschlag vor Schneise 1
W8*	Quartier Waldstück	W42	Holzschlag in Schneise 2
W9*	Wald Referenz	W43	Holzschlag zwischen Schneise 2 und 3
		W44	Holzschlag in Schneise 3
		W45	Holzschlag nach Schneise 3
		W61	Bach in Wald
		W62	Bach am Waldrand

Tabelle 1: Beschreibung der Messstandorte der WTDL1-Sensoren. Mit * gekennzeichneten Standorte waren zudem mit einem SHT31-Sensor ausgestattet.

3.4 Sensortypen

3.4.1 WTDL1

Der WTDL1 ist an allen Standorten vertreten und zeichnet die Daten autark im 3-Minuten-Takt auf. Durch die robuste Bauweise ist er gut von Umwelteinflüssen geschützt. Aufgrund einer fehlenden Strahlungsabschirmung sind die Daten jedoch nur zwischen Sonnenuntergang und -aufgang aussagekräftig. Direkte Sonneneinstrahlung heizt den Sensor auf und verfälscht die Resultate um dutzende °C. Da sich die aktuelle Untersuchung auf die Nacht konzentriert, hat dies jedoch keinen Einfluss auf die Qualität der Arbeit.

3.4.2 SHT31 SmartGadget

An sieben Standorten wurden zusätzlich Sensoren des Typs SHT31 von Sensirion angebracht. Diese wurden uns freundlicherweise zur Verfügung gestellt von der ZHAW, Abteilung Meteorologie, Umwelt und Luftverkehr.

Die eigens dafür entwickelte Halterung bietet den Vorteil, dass sie Sonneneinstrahlung abschirmt. Dadurch sind die gemessenen Temperaturen auch tagsüber belastbar. Die eingesetzte Messplatine wurde ursprünglich nicht für Aussenanwendungen entwickelt — deshalb kam es während der ersten Messkampagne zu etlichen Ausfällen. Folglich werden die Aufzeichnungen für die finale Auswertung nicht berücksichtigt. Sie liefern aber wertvolle Erkenntnisse über die Temperaturen tagsüber.



Abbildung 20: (rechts) SHT31 mit Strahlungsabschirmung, befestigt auf 2 m Höhe am Standort W2

Abbildung 21: (links) WTDL1-Temperatursensor, befestigt auf 2 m Höhe am Standort W2

3.5 Auswertung

Die Schwierigkeit in der Auswertung besteht darin, die natürlichen Temperaturschwankungen des Wetters von durch den Eingriff hervorgerufenen Temperaturunterschieden zu unterscheiden. Dafür sind etliche Teilschritte der Auswertung nötig.

Unter <https://l.janjo.ch/kaltluft> (QR-Code rechts) können die Temperaturdaten auf interaktive Weise angesehen werden. Die Rohdaten und die Auswertungsprogramme liegen unter <https://github.com/janjoch/kaltluftstrom>.



Abbildung 22: Interaktive Ansicht der Messdaten

3.5.1 Rohdaten

Die Rohdaten werden eingelesen und in einer Temperatur-Zeit-Grafik dargestellt. Somit kann die Integrität der Daten überprüft werden. Diese Übersicht ist unter l.janjo.ch/kaltluft-roh publiziert.

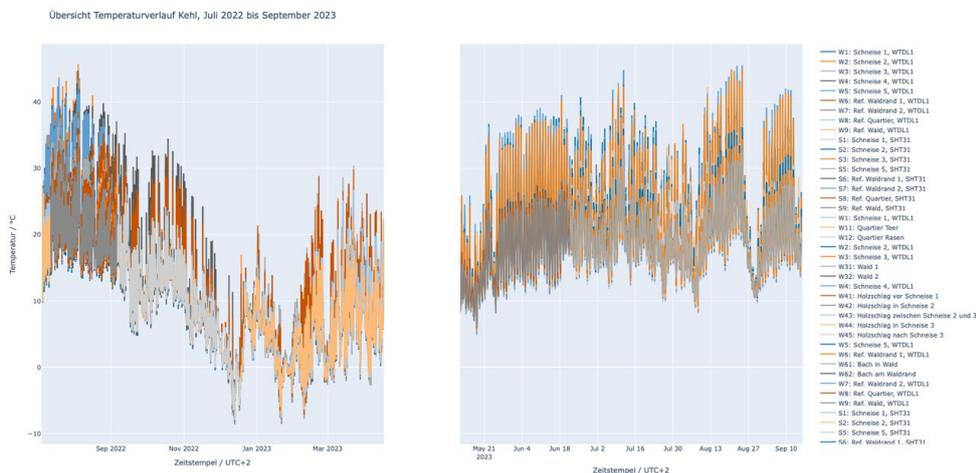


Abbildung 23: Übersicht über alle Temperaturdaten zwischen Juli 2022 und Juli 2023. In der interaktiven Ansicht kann gezoomt werden und einzelne Werte können ausgelesen werden. (Interaktive Grafik: l.janjo.ch/kaltluft-roh)

3.5.2 Zusätzliche Messungen

Ergänzend zu den fix stationierten Temperatursensoren wurde das Gelände vor dem Eingriff 2022 mit einer Wärmebild- und Kameradrohne überflogen. Dies hatte zum Ziel, bereits bestehende Temperatur- und Terrainunterschiede zu erkennen.

Nach dem Eingriff konnte am 16.8.23/04.00 in gleicher Thermo-Drohnenflugkamera mit der Stadtpolizei Baden durchgeführt werden. Die Kaltluftkorridore wurden deutlich sichtbar.

3.5.3 Terrainuntersuchung

Aus der Vogelperspektive können bestehende Unterschiede im Baumbestand gut erkannt werden. Dies erlaubt, die Kaltluftschneisen ideal zu positionieren.

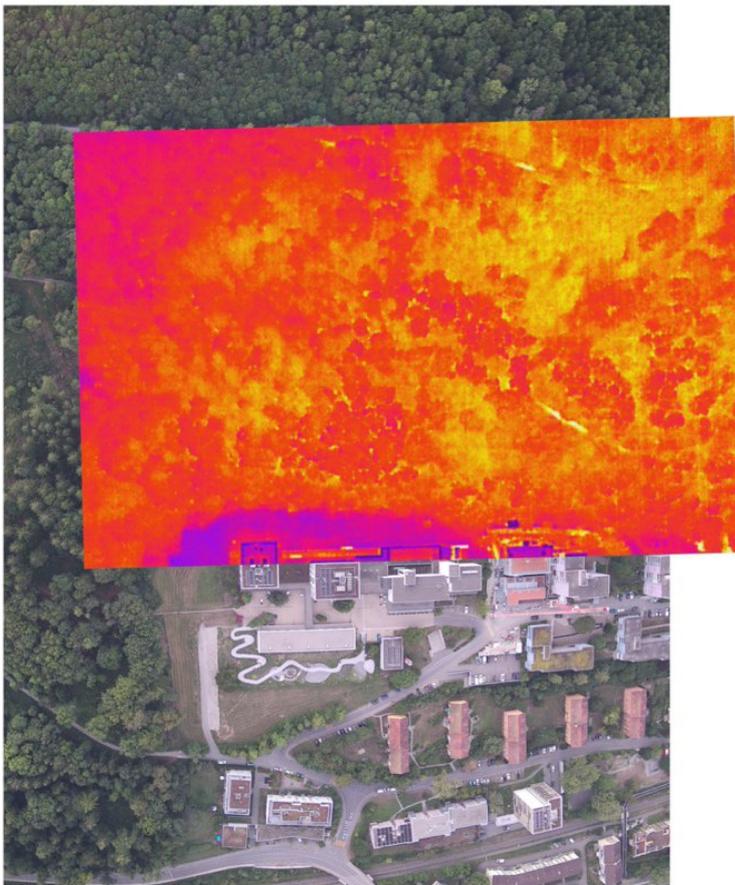


Abbildung 24: Terrainuntersuchung mithilfe einer Wärmebild- und Kameradrohne (je röter, je wärmer)

3.5.4 Temperaturunterschiede

Gemessene Temperaturen von Wärmebildkameras sind grundsätzlich mit Vorsicht zu genießen. Die eingesetzten Infrarot-Sensoren erfassen nicht die Temperatur direkt, sondern die Wärmestrahlung eines Objektes. Da diese Strahlung nicht nur von der Oberflächentemperatur, sondern auch von der Oberflächenbeschaffenheit und -farbe (Emissivität) abhängt, ist eine genaue Quantifizierung nur nach vorgängiger Kalibration auf einen kleinen Messbereich möglich. In einem inhomogenen Umfeld, wie dies im Wald der Fall ist, kann dies nicht sinnvoll durchgeführt werden.

4 Wirkungskontrolle bei Bewohnerinnen Kehl und Waldbesuchern

Neben der Temperaturmessung wurden auch die potentiellen Nutzniessenden nach ihrem subjektiven Empfinden befragt. Die Bewohnerinnen und Bewohner des Alterszentrum Kehl wurden eingeladen, ihre Eindrücke zum Versuch abzugeben. Waldbesucher und Waldbesucherinnen bot sich auf der Kaltluftbank Gelegenheit, ihre Erfahrungen zu teilen. Ziel war es, ein Stimmungsbild der gefühlten Temperatur-Wahrnehmung zum Kaltluftversuch zu erhalten. Die Umfragen waren nicht repräsentativ.

Parallel dazu kann auch auf eine erhöhte Akzeptanz des markanten Holzschlages durch den Einbezug der Nachbarschaft und durch die Information erwartet werden.

4.1 Begleitende Umfrage im Alterszentrum Kehl

Vor dem Holzschlag wurde im September 2022 eine Informationsveranstaltung für die unmittelbar dem Waldrand angrenzenden Siedlungen durchgeführt, die gut besucht war. Der Anlass fand in Zusammenarbeit mit dem Alterszentrum Kehl statt. Viel Neugierde, Verständnisfragen, Lob für die innovative Idee, aber auch kritische Fragen haben das gesellschaftsrelevante Thema dieses Versuchs bestätigt.

Nach dem Holzschlag im Winter 22/23 und der sommerlichen Hitzeperiode 23 wurde im September 2023 eine Umfrage zur gefühlten und empfunden Wirkung bei den Bewohnern des Alterszentrum Kehl durchgeführt. Gefragt wurde nach dem gefühlten Temperaturunterschied vor und nach dem Holzschlag in nächtlichen Tropennächten. Der Rücklauf wurde von der Leitung des Alterszentrums Kehl unterstützt und war dadurch mit 75%, oder insgesamt 45 Antworten, sehr hoch. Gefragt wurden Bewohnerinnen und Bewohner, die im Einflussbereich potentieller Kaltluftströme leben. Die Wirkung scheint sehr kleinräumig, je nach Lage der Alterswohnung im Bezug auf einen Kaltluftkorridor. Da statistisch die Stichprobe zu klein ist, kann daher nur summarisch eine Aussage getroffen werden:

- 15% der Antworten haben einen deutlich kühleren nächtlichen Luftstrom dank der Kaltluftkorridore gespürt
- 15% haben keinen Effekt gespürt
- 70% geben an, die beiden Jahre aus verschiedenen Gründen (Lage der Wohnung, Einzugstermin, fehlende Erinnerung, etc.) nicht vergleichen zu können.

Das Umfrageergebnis deutet darauf hin, dass ein Temperatur-Vergleich zwischen zwei Jahren objektiv sehr schwierig ist. Dies ist nachvollziehbar. Es scheint aber eine kleine Gruppe zu geben, die durch die Vorstellung einer zusätzlichen Kühlung aus dem Wald dies subjektiv spüren. Das Temperaturempfinden scheint auch von der Informationslage abzuhängen.

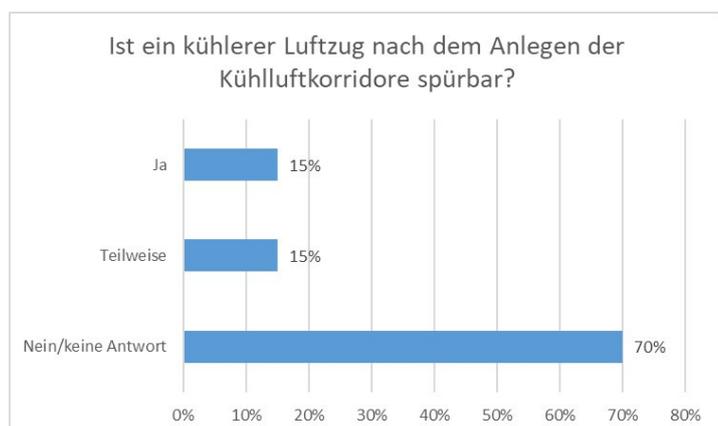


Abbildung 25: Umfrage bei AlterszentrumsbewohnerInnen Kehl im Herbst 2023.

Eine Meldung von Bewohnern haben einen bestehenden, und bekannten Kaltluftstrom zwischen den Blöcken an der Kehlstrasse 36/38 und 40/42 gemeldet.

4.2 Umfrage beim Kaltluftstuhl (Partizipation)

Um auch die Meinung und das Temperaturempfinden von Waldbesucherinnen abzuholen, wurde am Ende eines Kaltluftkorridors eine Kaltluftbank aufgestellt. Der bekannte Badener Möbeldesigner Willi Glaeser hat eine Kaltluftbank konzipiert und herstellen lassen. Mittels einer Umfrage über einen QR-Code konnten sich Besuchende zum Projekt äussern und Fragen zum Versuch beantworten. Aufmerksam gemacht wurde die breite Öffentlichkeit durch den Medienanlass und die nachfolgende Berichterstattung. Sowohl nationale Medien (SRF-TV Schweiz aktuell, SRF-Radio Regionaljournal AG/SO, Baublatt, Wald&Holz, Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen, WSL Dialog, Pro Natura Magazin) wie in den regionalen Medien (AZ, Badener Tagblatt, Baden Aktuell, Radio Argovia & today, Newsletter Stadforstamt & Klima und Umwelt) haben ausführlich berichtet und zum Austesten eingeladen. Da die Kaltluftströme nur in lauen Sommernächten spürbar werden, der Versuch Kehl hinter den Häusern versteckt ist, war der Rücklauf erwartungsgemäss bescheiden. Trotzdem kann ähnlich wie bei der Umfrage im Alterszentrum festgestellt werden, dass eine Minderheit einen wohltuenden kühlen Windhauch gespürt haben.



Abbildung 26: Eine Kaltluftbank lädt zum Verweilen ein: Florian Immer (Geschäftsführer Alterszentrum Kehl), Georg von Graefe (Stadtoberförster), Willi Glaeser (Möbeldesigner) und Stadtammann Markus Schneider.

5 Resultate

5.1 Ermittlung Tages-Referenztemperatur

Die Daten der vier Referenzstandorte, welche nicht vom Forsteingriff betroffen sind, bieten die Grundlage zur Berechnung der Tages-Referenztemperatur. Über einen vordefinierten Zeitraum (beispielsweise zwischen 21 und 22 Uhr) werden diese Temperaturmessungen zu einem Tages-Referenzwert gemittelt. Wichtig ist, dass die Sensoren in diesem Zeitfenster keiner direkten Sonneneinstrahlung ausgesetzt sind. Anhand der ermittelten Temperaturen können Tage anhand eines klaren Wertes eingeordnet werden. Nur dadurch können später Tage mit ähnlichen Wetterbedingungen untereinander verglichen werden.

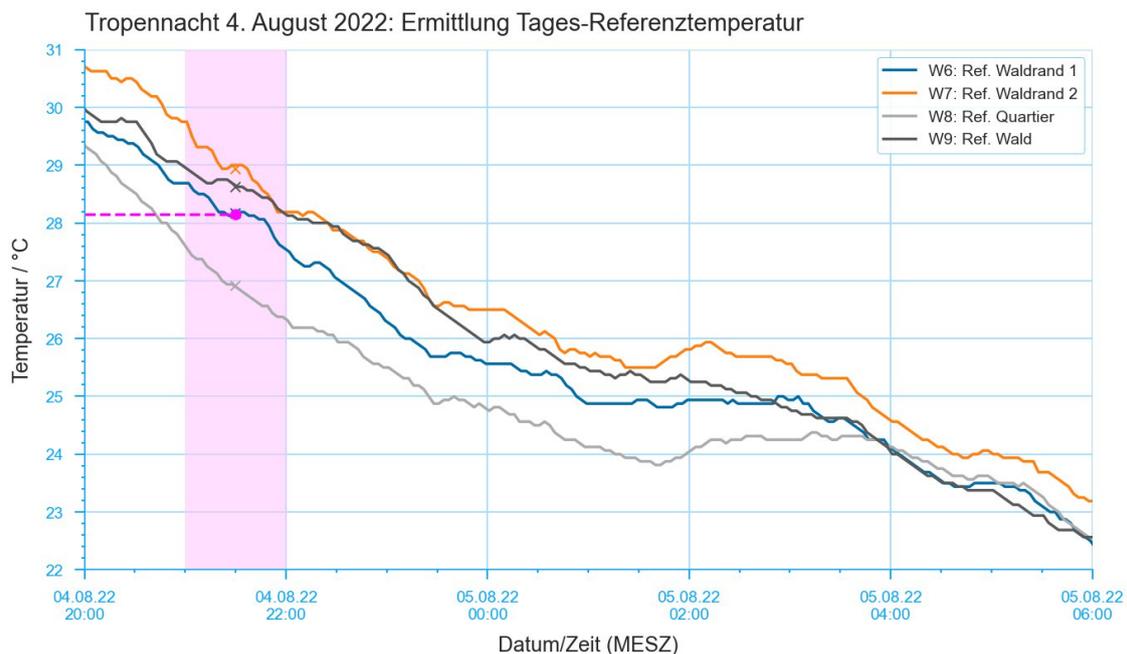


Abbildung 27: Ermittlung der Tages-Referenztemperatur in der Tropennacht vom 4. August 2022

5.2 Standortspezifische Temperaturen in vordefinierten Zeitbereichen

Für jeden Tag, für jeden Sensor und für jeweils zwei Zeitfenster (zum Beispiel erneut zwischen 21 und 22 Uhr sowie zwischen 3 und 4 Uhr) werden die Durchschnittstemperaturen berechnet. Die Differenz der beiden Werte wird ebenfalls bestimmt, diese entspricht der Abkühlung des Standorts am gegebenen Tag.

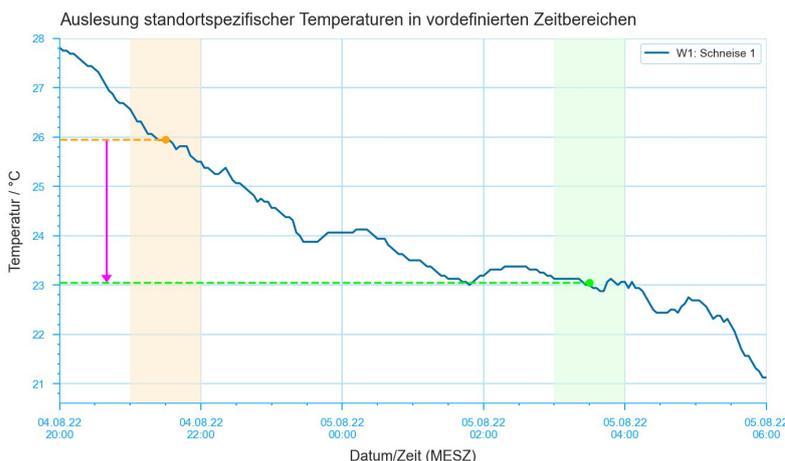


Abbildung 28: Temperaturmittelwerte in zwei Zeitfenstern am Standort 1 in der Tropennacht vom 4. August 2022

5.3 Gegenüberstellung der Tages-Referenztemperatur und der Abkühlung

In einem Streudiagramm können nun die Tages-Referenztemperatur und die tagesspezifische Abkühlung der Mess-Standorte gegenübergestellt werden.

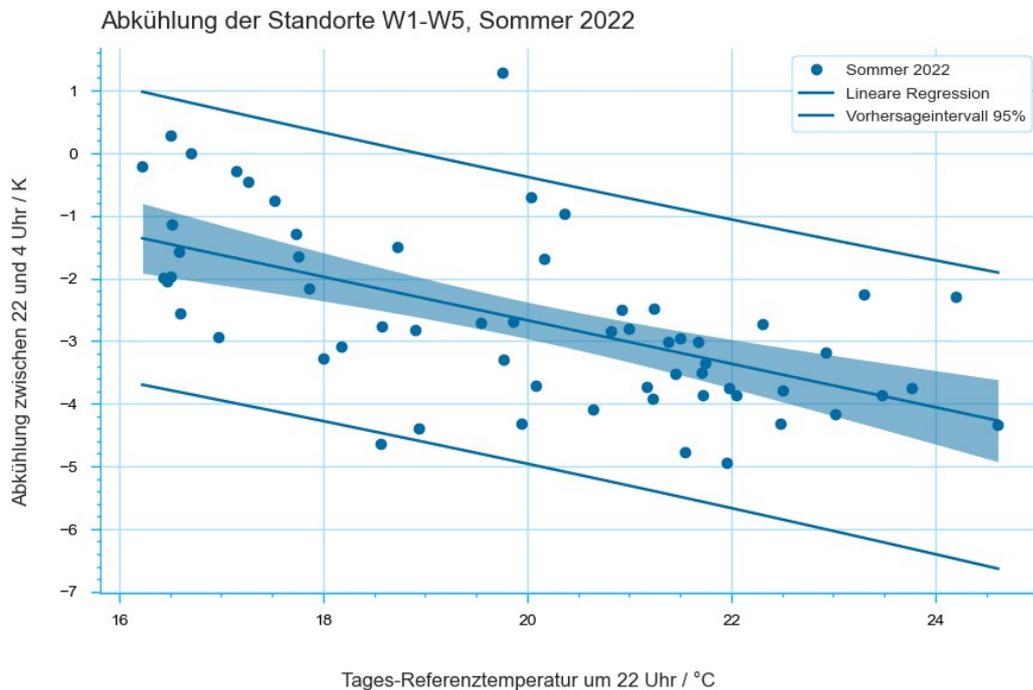


Abbildung 29: Gegenüberstellung der Tages-Referenztemperaturen mit der Abkühlung zwischen den beiden Zeitfenstern

5.4 Vergleich beider Messkampagnen 2022/23

Werden nun die Daten der beiden Messjahre verglichen, so sollte sich im Erfolgsfall bei den im Einflussbereich stehenden Sensoren ein Temperaturunterschied abzeichnen, der sich signifikant vom Temperaturunterschied der Referenzsensoren unterscheidet. Zudem kann mithilfe statistischer Methoden abgeschätzt werden, wie stark sich die gemessenen Differenzen von einem Zufallsereignis abgrenzen.

Abb. 30 zeigt **keinen** Unterschied zwischen den Jahren. Somit kann kein Unterschied zwischen der Abkühlung an den Waldrandstandorten vor und nach dem Eingriff festgestellt werden.

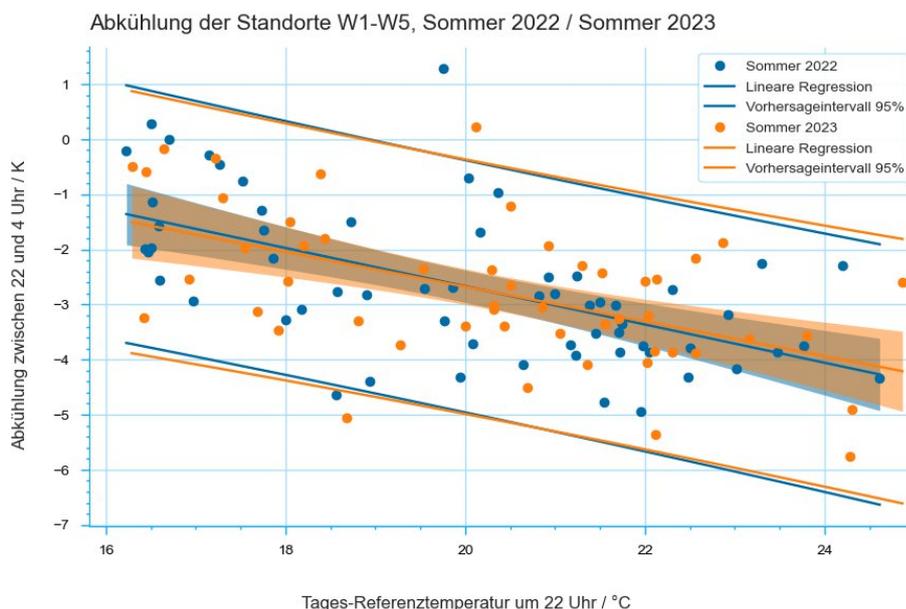


Abbildung 30: Gegenüberstellung der Jahre 2022 (blau) / 2023 (orange) der Messstandorte W1-5. Die Referenztemperatur ist mit Standort W7 berechnet. 2022 wurden 60, 2023 51 Tage im gleichen Zeitraum Juli - September selektiert.

5.4.1 Vergleichbarkeit der Jahre 2022 und 2023

Die Auswertung nach Ansatz 1 (Vgl. 3.2.1 *Ansatz 1: Vergleich vor und nach Forsteingriff*) basiert auf der Prämisse, dass die beiden Jahre klimatisch ähnlich sind. Um dies evaluieren zu können, wurden die Wetterdaten der MeteoSchweiz-Standorte Lägern und Würenlingen/PSI verglichen. Es wurden jeweils dieselben Zeiträume gefiltert, die auch für die Regressionsanalyse verwendet wurden. (Also Tages-Referenztemperaturen zwischen 16 und 25 °C.).

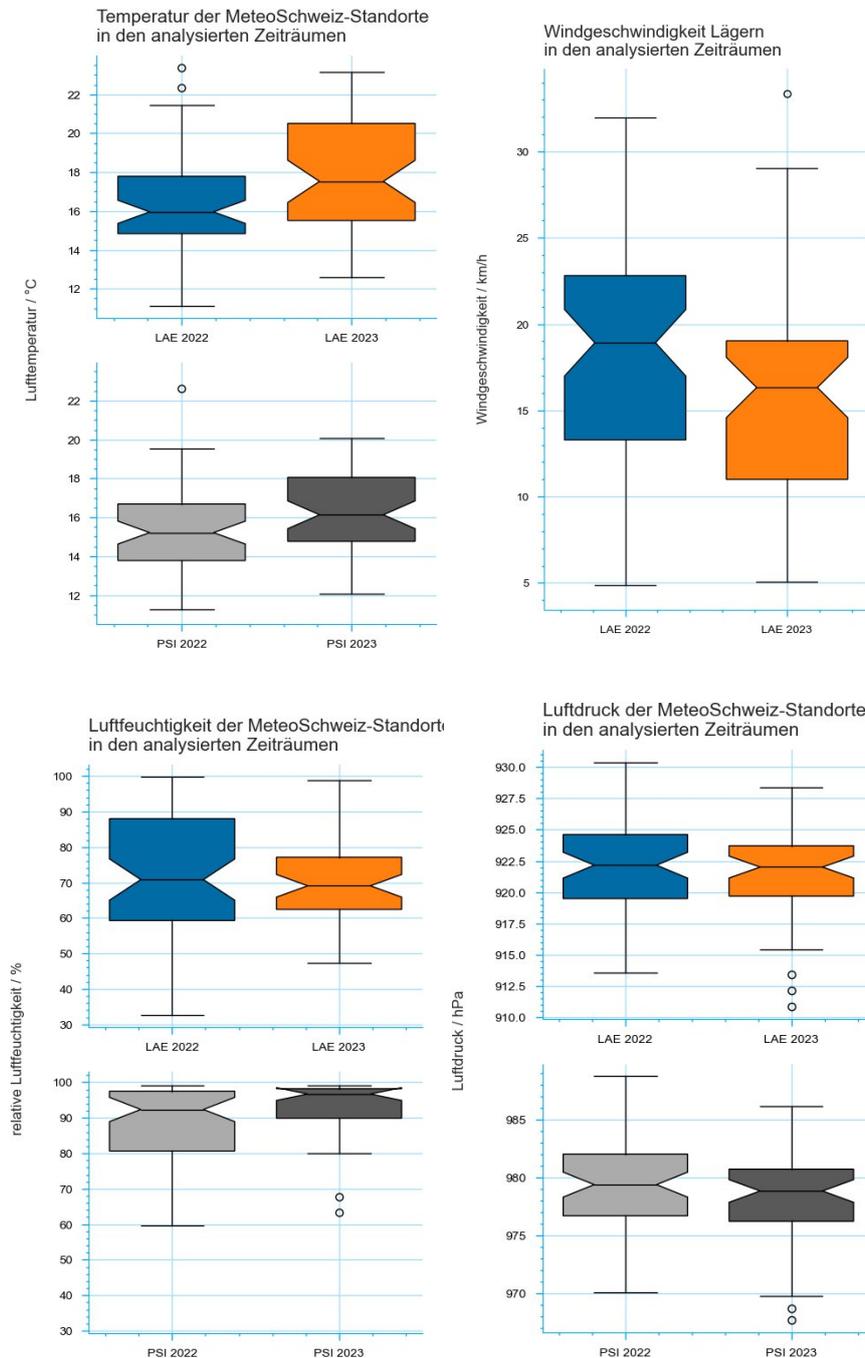


Abbildung 31: Klimabedingungen der MeteoSchweiz Standorte Lägern (LAE) und Würenlingen / PSI (PSI). Es wurden jeweils dieselben Tage berücksichtigt, die in die Regressionsanalyse geflossen sind. (2022: 60, 2023: 51) (Interaktive Grafik: l.janjo.ch/kaltluft-meteo)

5.5 Unterschiede 2023 zwischen verschiedenen Beständen

Für den Ansatz 2 wurde **innerhalb der Vegetationsperiode 2023** die Temperaturen und die Abkühlraten in verschiedene Waldbeständen untersucht, **um das Kaltluftsystem besser zu verstehen**.

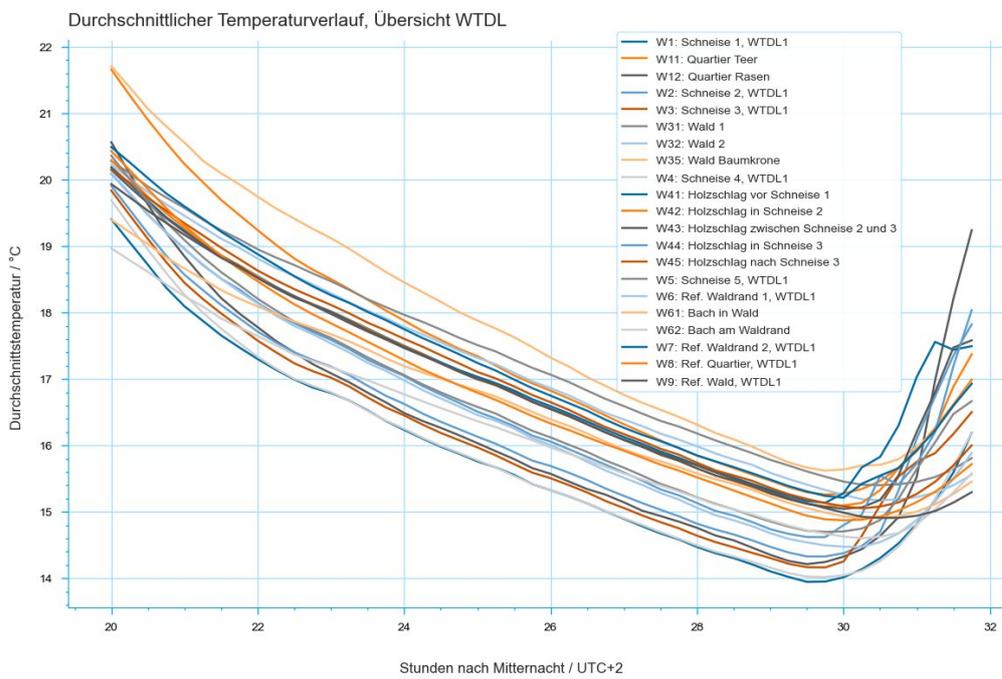


Abbildung 32:
Nächtlicher Temperaturverlauf der Standorte zwischen Mai und September 2023. Abgesehen von absoluten Verschiebungen sind nachts kaum Unterschiede in der Abkühlung erkennbar. (Interaktive Grafik: l.janjo.ch/kaltluftverlauf-alle)

Zwei Sensoren kühlen sich vergleichsweise schneller ab, wie Abbildung 33 zeigt:

- Der breite Korridor Nr. 3 mit dem Sensor 44 (hellblau) kühlt schneller und tiefer ab, als die Referenzsensoren im unbehandelten Wald W31/W32. Dies ist plausibel, kühlen Freiflächen schneller ab, als der temperaturdämpfende Wald.
- Ebenfalls diesem Muster folgt der Sensor W35, der auf der Spitze einer ca. 35m hohen Fichte installiert wurde.

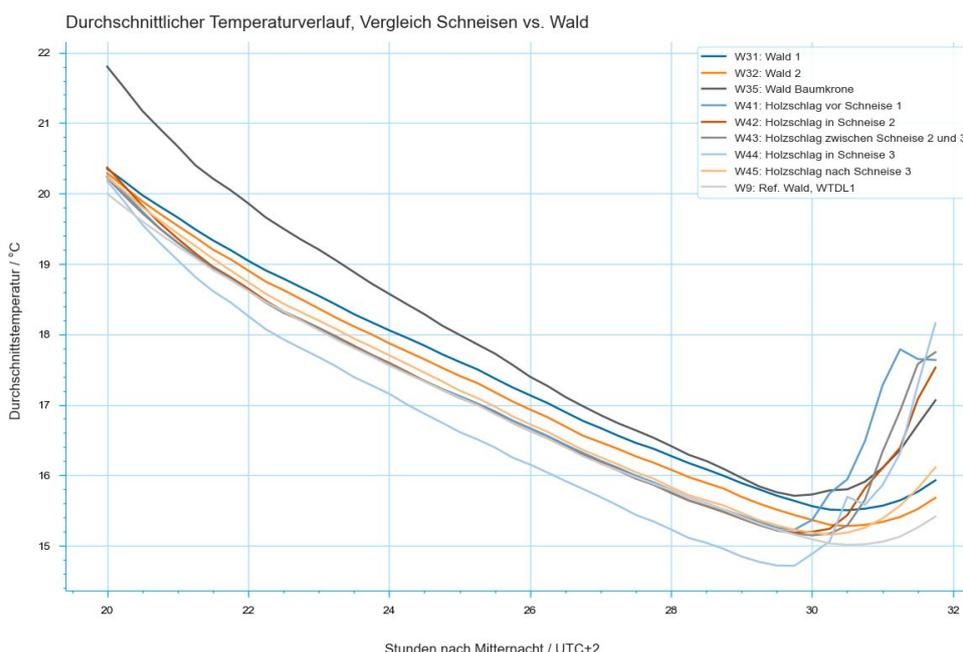


Abbildung 33:
Durchschnittlicher Temperaturverlauf, Vergleich Schneisen vs. Wald (Interaktive Grafik: l.janjo.ch/kaltluftverlauf-alle)

Keine Unterschiede in den Temperatur- oder Abkühlraten (vgl. Abb. 33) haben sich in derselben Nacht des gleichen Jahres 2023 zwischen

- den Sensoren im gesamten Hang mit Kaltluft-Korridoren inkl. dazwischenliegenden Waldzungen (W41-45) und Waldrandsensoren W1-4.
- Auch Waldzungen (W41/43/45) zwischen den Kaltluftkorridoren (W42/44) unterscheiden sich temperaturmässig nicht.
- Auch weitere untersuchte Standorte wie die Sensoren im unbehandelten Referenzkänel W61 + W62 unterscheiden sich nicht in ihrer Abkühlverhalten vom behandelten Kehlwald.

5.6 Schlussfolgerung

Die Hypothese, dass sich im vorliegenden Versuch durch die Ausbildung von Korridoren mit einem Forsteingriff die Temperatur beeinflussen lässt, hat sich in der Messperiode über zwei Jahre nicht bestätigt.

6 Fazit und Empfehlungen

6.1 Fazit

Der Versuch zeigt exemplarisch auf:

- Eine Beeinflussung der nächtlichen Kaltluftströme mittels forstwirtschaftlich einfacher Methoden scheint nicht möglich zu sein.
- Das Thema ist gesellschaftsrelevant. Das grosse Medien- und Fachinteresse ist auf die Kombination zwischen heissen Sommernächten (2023 wird vermutlich der heisseste Sommer seit Messbeginn 1864), der bekannten Verletzlichkeit alter und vulnerabler Personen und einem neuartigen Lösungsansatz zur die Nutzung einer (kühlenden) Waldleistung zurückzuführen.
- Die Kühleigenschaften des Waldes ist kommunikativ im aufziehenden Klimawandel eine zwar weitherum bekannte und geschätzte, aber noch nicht in Wert gesetzte Waldleistung. Weitere Überlegungen hierzu lohnen sich.
- Das Alterszentrum Kehl und der oben gelegene Waldkomplex war ein idealer Versuchssperimeter.
- Das nächtliche Kaltluftsystem ist komplex und viele Variable erschweren eine belastbare Aussage über die lenkende Wirkung eines Korridor-Holzschlags. Um das System zu beschreiben, wären Messungen über mehrere Sommer, eine grosse Anzahl an Messpunkten, ein methodisch breiter abgestütztes Versuchsdesign und generell eine wissenschaftliche Begleitung nötig. Der vorliegende Versuch kann als Hypothesenerkundung für eine vertiefte Untersuchung verstanden werden.
- Der Versuch hat bewusst auf die Messung von Kaltluftströmen verzichtet. Diese Messung ist für einen Praktikerversuch wie diesen, zu aufwändig, zu teuer und bedarf einer wissenschaftlichen Begleitung.
- Die Lenkung strömender Luft braucht seitlichen Widerstand. Vermutlich waren im vorliegenden Versuch diese Bestandesränder zu offen. Möglicherweise würden dichtere innere Waldränder einen messbaren Effekt hervorbringen. Denkbar wäre ein Versuch mit einem adaptierten Mittelwald.

6.2 Empfehlung für ein weiteres Vorgehen

Das Kaltluftbänkli wird nochmal einen Sommer aufgestellt und die Umfrage reaktiviert. Ziel ist das kühlende Waldklima weiter als Waldleistung zu kommunizieren. Um den Standort optisch zu markieren, werden versuchsweise Flatterbänder in den Kaltluftkorridoren aufgehängt. Diese sollen die Kaltluftströmungen visualisieren und können von der Badenfahrt wiederverwendet werden.

Ansonsten wird aufgrund der klaren Widerlegung der Hypothese wird mit diesem Bericht der Versuch abgeschlossen.

Die involvierten Partner bekommen einen Schlussbericht. Die Sponsoren und Mitfinanzierer werden verdankt.

Das Stadtforstamt Baden ist offen für weitere Versuche bezüglich der Waldleistung kühle Luft, z.B. in Form einer Begleitung von Bachelor-, Master- oder Doktorarbeiten.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Wärmebild einer Thermodrohne mit Kaltluftschneisen (dunklere Grünfärbung = kühler) und Alterszentrum Kehl.....	5
Abbildung 2: Kühle Luft fließt in die Stadt	6
Abbildung 3: Siedlungswirkung auf die Wärmeverteilung	6
Abbildung 4: Entwicklung der Hitzetage in Luzern von 1961 bis 2020 (Quelle: MeteoSchweiz)	6
Abbildung 5: Hitzebedingte Übersterblichkeit in der Schweiz (Juni - August); (Quelle: Bundesamt für Statistik und Bundesamt für Gesundheit)	7
Abbildung 6: Durch vier solcher schmaler Korridore soll in warmen Sommernächten Kaltluft zum Altersheim Kehl in Baden AG strömen.....	7
Abbildung 7: Klimaanalysekarte	8
Abbildung 8: Kaltluftabfluss – Kaltluftvolumenstrom aus Stadtklimasimulation Oberstadt + Baden (von Geopartner / Andreas Wicki)	8
Abbildung 9: Lage des Projektes (grüner Pfeil) und geplante Holzschläge (karrierte Signatur) 22/23 im Badener Wald	9
Abbildung 10: Bestandekarte (2011) im Wald oberhalb des Alterszentrums Kehl, Genossenschaften Pro Familia und Lägern; in den Jahren 2011 - 2023 sind die Bestände in die jeweils nächste Entwicklungsstufe eingewachsen	9
Abbildung 11: Pflanzensoziologische Karte: 7a (Typischer Waldmeisterbuchenwald) und 7f (typischer Waldmeisterbuchenwald mit Lungenkraut; etwas basenreicher) und 9a (Lungenkraut Buchenwald)	10
Abbildung 12: Holzschlag Winter 2022/23	10
Abbildung 13: Schematische Darstellung der Kaltluftkorridore mit Standorten der Temperatursensoren	11
Abbildung 14: Produkte Stadtforstamt Baden inkl. der Inwertsetzung nichtmonetärer Walddienstleistungen	12
Abbildung 15: Kaltluftströme von den bewaldeten Hügelkuppen des Badener Waldes in die Siedlungen	13
Abbildung 16: Känel in der Hang-Topografie Stockmattgraben, Baden	13
Abbildung 17: Blick einer Wärmebilddrohne vom Dach des Alterszentrums Kehl in einen Kaltluftkorridor	14
Abbildung 18: Messstandorte 2022-2023, die für Ansatz 1 ausgewertet wurden. Die Standorte 1 bis 5 befinden sich direkt unterhalb der Kaltluftschneisen, die Sensoren 6 bis 9 liefern Referenzwerte. Dadurch ist der Vergleich an identischen Standorten vor und nach dem Forsteingriff möglich. (Quelle: Swisstopo, eigene Ergänzungen)	15
Abbildung 19: Messstandorte 2023, die für Ansatz 2 ausgewertet wurden. Die Standorte W11 und höher wurden im April 2023 angebracht und ermöglichen lokale Temperaturvergleiche in verschiedenen Zonen. (Quelle: Swisstopo, eigene Ergänzung)	16
Abbildung 20: (rechts) SHT31 mit Strahlungsabschirmung, befestigt auf 2 m Höhe am Standort W2	18
Abbildung 21: (links) WTDL1-Temperatursensor, befestigt auf 2 m Höhe am Standort W2	18
Abbildung 22: Interaktive Ansicht der Messdaten	18
Abbildung 23: Übersicht über alle Temperaturdaten zwischen Juli 2022 und Juli 2023. In der interaktiven Ansicht kann gezoomt werden und einzelne Werte können ausgelesen werden. (Interaktive Grafik: l.janjo.ch/kaltluft-roh)	18

Abbildung 24: Terrainuntersuchung mithilfe einer Wärmebild- und Kameradrohne (je röter, je wärmer)	19
Abbildung 25: Umfrage bei AlterszentribewohnerInnen Kehl im Herbst 2023.	20
Abbildung 26: Eine Kaltluftbank lädt zum Verweilen ein: Florian Immer (Geschäftsführer Alterszentrum Kehl), Georg von Graefe (Stadtoberförster), Willi Glaeser (Möbeldesigner) und Stadttammann Markus Schneider.....	21
Abbildung 27: Ermittlung der Tages-Referenztemperatur in der Tropennacht vom 4. August 2022	22
Abbildung 28: Temperaturmittelwerte in zwei Zeitfenstern am Standort 1 in der Tropennacht vom 4. August 2022	22
Abbildung 29: Gegenüberstellung der Tages-Referenztemperaturen mit der Abkühlung zwischen den beiden Zeitfenstern	23
Abbildung 30: Gegenüberstellung der Jahre 2022 (blau) / 2023 (orange) der Messstandorte W1-5. Die Referenz-temperatur ist mit Standort W7 berechnet. 2022 wurden 60, 2023 51 Tage im gleichen Zeitraum Juli - September selektiert.....	23
Abbildung 31: Klimabedingungen der MeteoSchweiz Standorte Lägern (LAE) und Würenlingen / PSI (PSI). Es wurden jeweils dieselben Tage berücksichtigt, die in die Regressionsanalyse geflossen sind. (2022: 60, 2023: 51) (Interaktive Grafik: l.janjo.ch/kaltluft-meteo).....	24
Abbildung 32: Nächtlicher Temperaturverlauf der Standorte zwischen Mai und September 2023. Abgesehen von absoluten Verschiebungen sind nachts kaum Unterschiede in der Abkühlung erkennbar. (Interaktive Grafik: l.janjo.ch/kaltluft-verlauf-alle).....	25
Abbildung 33: Durchschnittlicher Temperaturverlauf, Vergleich Schneisen vs. Wald (Interaktive Grafik: l.janjo.ch/kaltluft-verlauf-alle).....	25

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Beschreibung der Messstandorte der WTDL1-Sensoren. Mit * gekennzeichneten Standorte waren zudem mit einem SHT31-Sensor ausgestattet.....	22
---	----