

Hambacher Forst in der Krise (II)

Temperaturmessungen zur Beurteilung
der mikroklimatischen Situation des Waldes
und des Randbereichs



Hambacher Forst in der Krise (II)

Temperaturmessungen zur Beurteilung der mikroklimatischen Situation des Waldes und des Randbereichs

Diese Studie wurde erstellt im Auftrag von Greenpeace e. V.

Autor*innen:

Jeanette S. Blumröder, Pierre L. Ibisch

Centre for Econics and Ecosystem Management
an der Hochschule für nachhaltige Entwicklung Eberswalde
Alfred-Möller-Str. 1, 16225 Eberswalde (pibisch@hnee.de)

Steffen Kriewald

Potsdam Institut für Klimafolgenforschung (PIK)
Telegraphenberg A 31, 14473 Potsdam

➔ Kein Geld von Industrie und Staat

Greenpeace ist eine internationale Umweltorganisation, die mit gewaltfreien Aktionen für den Schutz der Lebensgrundlagen kämpft. Unser Ziel ist es, Umweltzerstörung zu verhindern, Verhaltensweisen zu ändern und Lösungen durchzusetzen. Greenpeace ist überparteilich und völlig unabhängig von Politik, Parteien und Industrie. Rund 590.000 Fördermitglieder in Deutschland spenden an Greenpeace und gewährleisten damit unsere tägliche Arbeit zum Schutz der Umwelt.

Impressum

Greenpeace e.V., Hongkongstraße 10, 20457 Hamburg, Tel. 040/3 06 18-0 **Pressestelle** Tel. 040/3 06 18-340, F 040/3 06 18-340, presse@greenpeace.de, www.greenpeace.de
Politische Vertretung Berlin Marienstraße 19–20, 10117 Berlin, Tel. 030/30 88 99-0 **V.i.S.d.P.** Bastian Neuwirth **Foto** Titel: © Greenpeace



Hambacher Forst in der Krise (II)

Temperaturmessungen zur Beurteilung der mikroklimatischen Situation des Waldes und des Randbereichs

Jeanette S. Blumröder¹, Pierre L. Ibisch¹, Steffen Kriewald²

¹ Centre for Economics and Ecosystem Management an der Hochschule für nachhaltige Entwicklung Eberswalde, Alfred-Möller-Str. 1, 16225 Eberswalde (pibisch@hnee.de)

² Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung, Telegraphenberg A 31, 14473 Potsdam

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung.....	2
Einleitung.....	3
Methode.....	4
Indikatoren und Berechnungen.....	9
Ergebnisse	10
Maximaltemperatur	10
Tagesmitteltemperatur	12
Temperaturschwankungen	13
Tagesverlauf der Temperatur.....	15
Vergleich satellitenbildbasierte Analyse	16
Diskussion.....	17
Empfehlungen	19
Literatur	19

Zusammenfassung

Im August 2019 wurden **50 mikroklimatische Datenlogger** (Onset Hobo Pendant MX2201) um den Tagebau Hambach im Hambacher Forst und auf der Sophienhöhe installiert. Mit ihnen wurden in minütlichen Intervallen die Temperatur gemessen.

Die Studie **bestätigt die Ergebnisse einer ersten satellitenbildbasierten Studie¹ durch am Boden gemessene mikroklimatische Daten**. Sie liefert **Beweise zur kühlenden Wirkung des Hambacher Forsts und der Bedrohung des Waldes durch die angrenzende und sich stark erwärmende Tagebaugrube**. Die zuvor ausgesprochenen Empfehlungen zum Schutz des Waldes werden auf der Grundlage der neuen Daten unterstützt.

Der entwaldete Bereich zwischen dem Rand des Hambacher Forsts und der Grube des Tagebaus Hambach weist **die höchsten durchschnittlichen Maximaltemperaturen** auf. Die über alle Messpunkte gemittelte Tageshöchsttemperatur betrug **35,3°C**. Die durchschnittliche Maximaltemperatur am heißesten Messpunkt, der sich auf der nichtbewaldeten Offenfläche zwischen Grube und Waldrand befindet, war etwa **18°C wärmer als der kühlfte Messpunkt im Hambacher Forst**. Der Temperaturunterschied zwischen dem gemäß Satellitendaten deutlich heißerem Grubeninnern und dem Wald wird noch deutlich ausgeprägter sein.

Mit steigendem Baumkronenschluss und steigender Distanz vom Grubenrand in den Wald hinein nimmt die Kühlungsleistung zu. Im Mittel ist die relative Kühlkapazität innerhalb des Waldes im Hambacher Forst am stärksten. Die mit Bäumen bestockten Waldränder reduzieren die Tagesmitteltemperatur im Vergleich zum nichtbewaldeten Offenland in Grubennähe, die Ränder sind jedoch wärmer als das Waldinnere.

Wie viele Waldökosysteme in Deutschland leidet auch der Hambacher Forst unter der von der globalen Erwärmung ausgelösten **Klimakrise** und wird zudem zusätzlich durch eine **Mikroklimakrise** akut gefährdet. Er ist von sich stark erwärmenden Flächen umgeben, wobei besonders von der überdurchschnittlich heißen Tagebaugrube negative Randeffekte ausgehen.

Waldökosysteme haben eine weithin unterschätzte Fähigkeit, sich selbst zu regulieren und ökologische Funktionen auch nach Störungen aufrecht zu erhalten bzw. wiederherzustellen. **Im Hambacher Forst ist allerdings durch die geringe Größe des Restwaldes und die Nähe des Tagebaus ein überaus kritischer Zustand erreicht**. Soll der Wald erhalten bleiben, muss umgehend gehandelt werden. Erforderlich sind ein **sofortiger Stopp des Abbaggers v.a. an der dem Hambacher Forst zugewandten Tagebauseite und die Einrichtung einer angemessen breiten thermischen Pufferzone um den gesamten Wald herum**. Aufforstung bzw. Wiederbewaldung können erfolgreich eingesetzt werden, um alte Reliktwälder mikroklimatisch zu stabilisieren. Die Ergebnisse zeigen, dass es möglich wäre, an dem tagesbauseitigen Waldrand des Hambacher Forsts Temperaturschwankungen zu verringern sowie die Maximaltemperaturen und die Tagesmitteltemperatur zu senken.

¹ Ibisch, P.L., Kriewald, S., Blumröder, J.S., 2019. Hambacher Forst in der Krise: Studie zur Beurteilung der mikro- sowie Randeffekten. Greenpeace e.V., Hamburg.
(https://www.greenpeace.de/sites/www.greenpeace.de/files/publications/hambacher_forst.pdf)

Einleitung

Der Hambacher Forst wird durch den Tagebau Hambach in seiner Existenz bedroht - nicht allein und ganz direkt durch die Vergrößerung der Grube, sondern auch durch die vom Tagebau ausgehenden mikroklimatischen Randeffekte. Eine erste satellitenbildbasierte Analyse „Hambacher Forst in der Krise - Studie zur Beurteilung der mikro- und mesoklimatischen Situation sowie Randeffekten“ der Oberflächentemperaturen der Kölner Bucht zeigt, wie stark sich der Tagebau im Sommer aufheizt und den stetig schrumpfenden Hambacher Forst durch thermische Randeffekte beeinträchtigt (Ibisch et al., 2019). Dieser Effekt ist in heißen und trockenen Sommern von kritischer Relevanz. Das lokal veränderte Mikroklima vor allem in den Randbereichen verstärkt den von extremen Wetterlagen ausgehenden Hitze- und Trockenstress. Die satellitenbildbasierte Studie zeigt, dass die durchschnittlichen Tages-Oberflächentemperaturen des Tagebaus im Hitzesommer 2018 ca. 45°C betragen, während der Hambacher Forst 19°C kühler war.

Auch der Sommer des Jahres 2019 zeichnete sich durch eine hohe Zahl von Hitzetagen, außergewöhnlich hohe Maximaltemperaturen sowie geringen Niederschlag aus, was die negativen Effekte auf die Ökosysteme verstärkte, die noch keine Gelegenheit hatten, sich von den Folgen des vergangenen Hitzesommers zu erholen. Deutschlandweit ist zu beobachten, dass aufgrund fehlender Niederschläge und hoher Temperaturen in Kombination mit überaus zahlreichen Sonnenstunden und damit erheblich erhöhtem Strahlungsinput vorgeschwächte Bäume und ganze Waldbestände absterben. Auch an den dem Tagebau zugewandten Waldrändern des Hambacher Forsts zeigt sich das Absterben von Bäumen, die besonderem Hitze- und vor allem auch Trockenstress ausgesetzt sind (Ibisch et al., 2019). Wälder kühlen zwar sich selbst und die umgebende Landschaft, aber diese Funktion ist stark eingeschränkt, wenn die Waldflächen sehr klein sind und zudem von sich stark aufheizenden Flächen umgeben sind. Die aus Tagebaugruben aufsteigende sehr warme Luft befördert zudem die Austrocknung der Umgebung.

Die vorliegende Studie hat zum Ziel, die Ergebnisse der ersten satellitenbildbasierte Studie durch mikroklimatische Daten zu verifizieren und sie mit Erkenntnissen zur mikroklimatischen Regulationsfunktion bzw. Randeffekten zu ergänzen. Sie soll Beweise zur kühlenden Wirkung des Hambacher Forsts und der Bedrohung des Waldes durch die angrenzende und sich stark erwärmende Tagebau-Grube liefern sowie die Ableitung von Empfehlungen zum Schutz des Waldes unterstützen.

Im Vergleich zur ersten Studie, die auf 1 km (MODIS) und 30 m (Landsat-8) aufgelösten Fernerkundungsdaten beruht, ist bei dieser Studie eine höhere räumliche Auflösung gegeben, der punktgenaue Messungen am Boden zugrundeliegen. Dies erlaubt eine differenziertere Betrachtung der verschiedenen Waldgebiete, Waldränder und Offenflächen. Außerdem weisen die Messdaten dieser Studie eine sehr hohe zeitliche Auflösung auf, die durch minütliche Messwerterhebung im Vergleich zu den täglichen Werten der MODIS- und zweiwöchentlichen Landsat-8-Daten eine feinere Betrachtung der täglichen Temperaturverläufe ermöglicht.

Methode

Am 10. und 11. August 2019 wurden 50 mikroklimatische Datenlogger (Onset Hobo Pendant MX2201) um den Tagebau Hambach, im Hambacher Forst und auf der Sophienhöhe installiert. Die Datenlogger wurden entlang verschiedener Transekte, die von Ost nach West (jenseits des Waldrands zur Grube des Tagebau Hambach hin) und parallel innerhalb des Waldes sowie in zwei Transekten zwischen Tagebau und den südlich an den Wald angrenzenden landwirtschaftlichen Flächen aufgebaut (Abbildung 1; Abbildung 2, oben). Am östlichsten Rand des Hambacher Forsts wurden sieben weitere Datenlogger zwischen der nördlich angrenzenden Grube und dem südlichen Waldrand (Abbildung 2, unten) ausgebracht. Zudem wurden fünf Datenlogger im östlichen bzw. nordöstlichen Bereich der Sophienhöhe eingesetzt (Abbildung 3).



Abbildung 1: Übersicht zur räumlichen Verteilung der Datenlogger (türkise Pfeile) um den Tagebau Hambach (Google Earth Stand Mai 2018). Im Jahr 2019, zur Zeit der Durchführung der Studie, war der Tagebau bereits weiter vorangetrieben worden, und der Abstand zwischen Grubenrand und Wald betrug teilweise nur noch etwa 50 m.

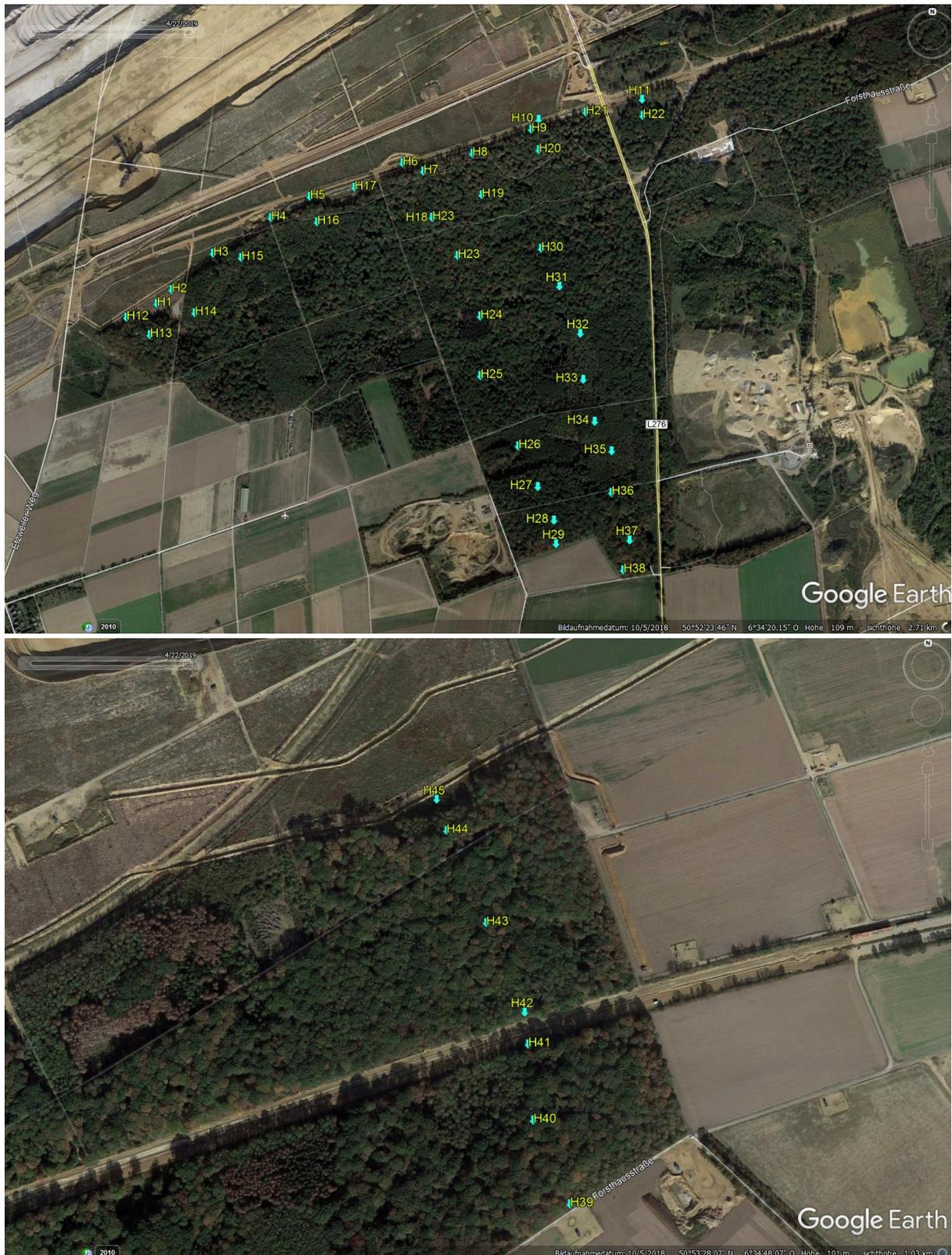


Abbildung 2: Übersicht zur räumlichen Verteilung der Datenlogger im westlichen (oben) und östlichen (unten) Bereich des Hambacher Forsts. Die gelben Zahlen geben die Bezeichnung des Messpunktes an.



Abbildung 3: Übersicht zur räumlichen Verteilung der Datenlogger auf der Sophienhöhe, nördlich des Tagebaus Hambach.

Die Datenlogger wurden in kleinen, nach unten offenen, weiß-lackierten und somit sonnenlichtreflektierenden Messhütten befestigt, die jeweils an der nördlichen Seite eines dafür installierten Zaunpfahles in einer Höhe von 1,3 m über dem Boden montiert wurden und nach Ende der Messperiode rückstandsfrei entfernt werden (Abbildung 4 a-h).





Abbildung 4: a) Datenlogger in einer Messhütte; b) Beispiele verschiedener Messpunkte am südlichen, landwirtschaftlichen Flächen zugewandten Waldrand; c) vom Waldrand waldeinwärts; d) innerhalb des Waldes; e) innerhalb der Wald-Lücke; f-g) zwischen Waldrand und Grube; h) auf der Sophienhöhe. Fotos: Jeanette Blumröder.

Die Datenlogger wurden so programmiert, dass Temperaturmesswerte in einem einminütlichen Zeitintervall gespeichert werden. Die Daten wurden am 30. und 31. August 2019 heruntergeladen. Um die gleiche Anzahl von Messdaten für jeden Messpunkt zu verwenden, wurden nur Daten zwischen dem 12. und 29. August 2019 in der Analyse berücksichtigt. Einer der 50 Datenlogger, Nummer H4 zwischen Waldrand und Grube, wurde entwendet und konnte daher nicht in der Analyse berücksichtigt werden.

Der Baumbestand in unmittelbarer Nähe zu jedem Messpunkt wurde charakterisiert. An jedem Probepunkt wurde der Kronenschluss des Baumbestandes mit Hilfe eines Kronen-Densiometers

(Spherical Convex Densiometer, Model A)² ermittelt. Dieses Gerät stellt einen sphärischen, konvexen Spiegel dar, der in ein gleichmäßiges geometrisches Raster unterteilt ist. Die Fläche, die am Himmel von Baumkronen bedeckt wird, kann mit Hilfe des Densiometers relativ einfach ausgezählt werden. Die resultierenden Daten stellen die Geschlossenheit des Kronendachs über dem Datenlogger dar und repräsentieren ein Maß der Beschattung. Der Kronenschluss wurde in den vier Himmelsrichtungen (Nord, Süd, Ost und West) gemessen und anschließend arithmetisch gemittelt. Beispiele für die unterschiedliche Baumkronenbedeckung sind in Abbildung 5 dargestellt.

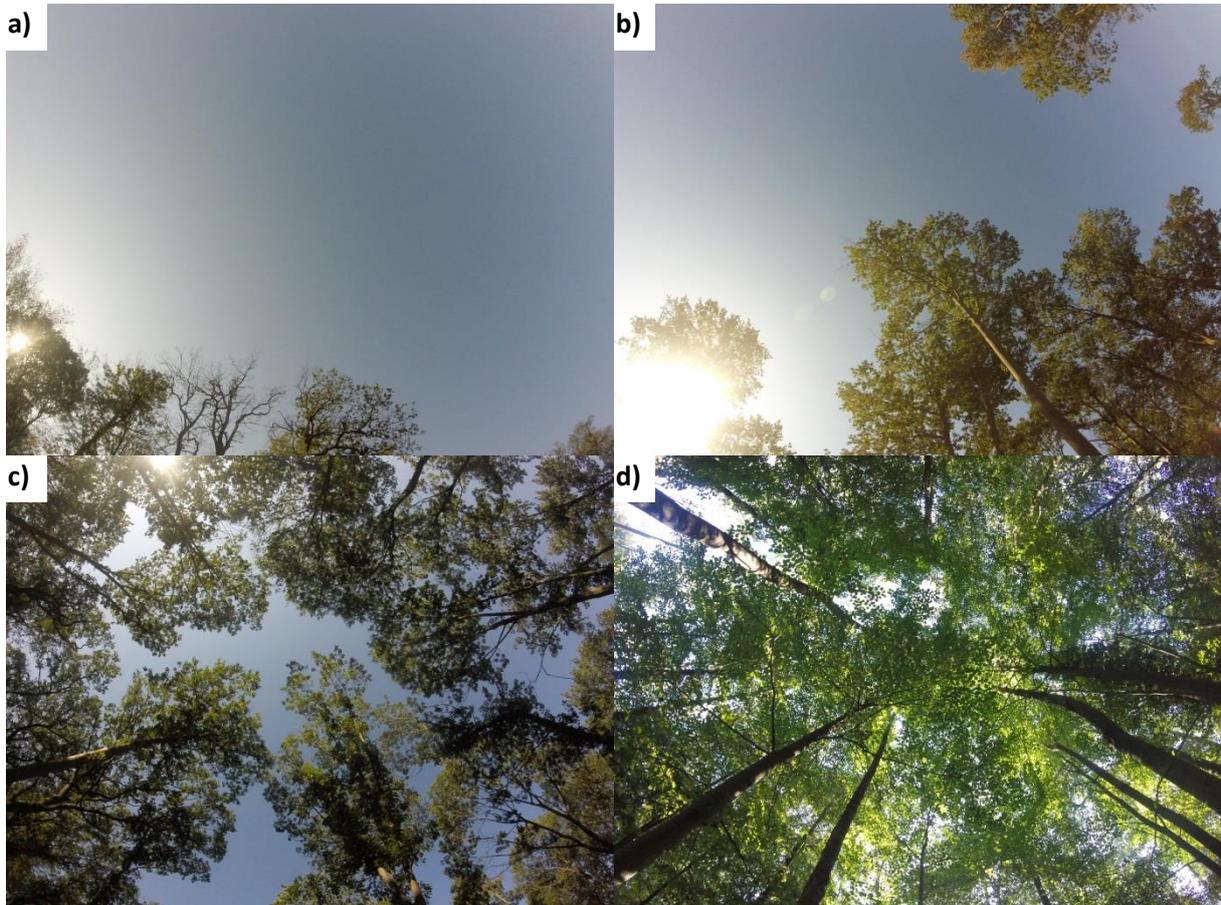


Abbildung 5 a-e: Darstellung der Baumkronenbedeckung an verschiedenen Messpunkten: a) H10: 3%; b) H11: 20%; c) H22: 55%; d) H16: 87%. Fotos: Jeanette Blumröder.

Außerdem wurde die Distanz jedes Messpunkts zum nächstgelegenen Waldrand vor Ort geschätzt und später anhand von GPS-Koordinaten mit Hilfe eines Geographischen Informationssystems verifiziert. Dabei wurde die Entfernung eines innerhalb des Waldes gelegenen Punktes zum Waldrand mit einer positiven Zahl versehen. Den Messpunkten außerhalb des Waldes, wie die Punkte zwischen Wald- und Grubenrand des Tagebaus Hambach wurde eine negative Zahl zugewiesen. Die maximale Entfernung von Messpunkten, die sich außerhalb des Waldes, zwischen Waldrand und Grube befinden, beträgt 45 m zum Waldrand. Innerhalb des Waldes war ein maximaler Abstand von 380 m zwischen Messpunkt und zum Waldrand gemessen worden. Die Entfernung zum Waldrand wurde in dieser Studie linear betrachtet; es wurde also nur die Distanz zum nächstgelegenen Rand gemessen. Es ist aber zu beachten, dass manche Messpunkte in mehr als eine Richtung auf einen Waldrand treffen und Flächen durch Straßen zerschnitten werden.

² https://www.forestry-suppliers.com/Documents/1450_msds.pdf

Indikatoren und Berechnungen

Da die Studie auf Hitzebelastung fokussiert, wurden aus dem gesamten Datensatz die wärmsten Tage ausgewählt. Diese wurden als diejenigen Tage definiert, an denen der Mittelwert aller Messungen eine Tagesmitteltemperatur von mindestens 20°C ergab. Im genannten Messzeitraum ergaben sich sieben solcher Tage (Tabelle 1).

Tabelle 1: Übersicht über die Messtage mit einer Tagesmitteltemperatur von mindestens 20°C, die in der Analyse berücksichtigt wurden.

Datum	Tagesmitteltemperatur [°C]	Standardabweichung der Tagesmitteltemperatur [°C]	Tagesminimumtemperatur [°C]	Tageshöchsttemperatur [°C]	Differenz zwischen Tagesminimum- und -höchsttemperatur [°C]
2019-08-23	20,38	6,10	9,82	35,30	25,48
2019-08-24	21,41	6,87	9,35	37,49	28,14
2019-08-25	22,98	6,62	11,02	38,26	27,24
2019-08-26	24,52	5,20	14,97	38,78	23,81
2019-08-27	24,31	5,27	15,23	39,64	24,41
2019-08-28	23,69	4,52	15,70	36,21	20,51
2019-08-29	21,91	2,57	16,56	31,57	15,01

Die warmen Tage sind von besonderem Interesse, da an ihnen zum einen die Kühlungsfunktion sowie die Absenkung der Maximaltemperaturen umso wichtiger ist und zum anderen die Unterschiede zwischen den verschiedenen Standorten am besten sichtbar werden.

Die Maximaltemperatur ($T_{\max 20}$) ergibt sich aus dem Mittel der fünf Maximalwerte pro Tag und Messpunkt. Die relative Kühlkapazität (RTC für *relative temperature cooling capacity*) berechnet sich aus dem Kehrwert der Tagesmitteltemperatur eines Messpunktes geteilt durch die Tagesmitteltemperatur über alle 49 berücksichtigten Messpunkte. RTC repräsentiert somit die Tagesmitteltemperatur eines Messpunktes im Verhältnis zur Tagesmitteltemperatur aller Messpunkte. Die relative Pufferkapazität (RTB für *relative temperature buffering capacity*) wird als der Kehrwert der Standardabweichung der Tagesmitteltemperatur eines Messpunktes geteilt durch die Standardabweichung der Tagesmitteltemperatur aller Messpunkte berechnet. Die Standardabweichung des Mittelwerts ist ein Maß für die Verteilung der Tagesmitteltemperatur und repräsentiert damit die Streuung oder Schwankung um den Mittelwert. RTB repräsentiert somit die Temperaturschwankung eines Messpunktes im Verhältnis zur Temperaturschwankung aller Messpunkte. Das Messverfahren und die Indikatoren wurden bereits in anderen Studien zur mikroklimatischen Untersuchung von Waldgebieten angewendet (vergleiche Blumroeder et al., 2019).

Bei der Datenauswertung wurden die mikroklimatischen Indikatoren in Zusammenhang mit den Walddaten (Distanz zum Waldrand, Baumkronenschluss und Standort) gebracht. Alle Berechnungen, statistischen Analysen und die Darstellung wurden mit Hilfe von RStudio Version 1.1.456 (R Development Core Team, 2008) durchgeführt.

Ergebnisse

Die untersuchten Messpunkte unterscheiden sich in ihrer Entfernung zum Waldrand und in ihrer Überschildung durch Baumkronen. Beide Parameter sind nicht direkt miteinander korreliert. Es sind unterschiedlich stark geöfnete Waldränder mit offenen Kronenstrukturen vorzufinden, wie auch relativ geschlossene Waldränder, aber auch innerhalb des Waldes sind Baumücken oder offene Kronenstrukturen vorhanden. Es wurden Messpunkte untersucht, die teilweise gänzlich frei stehen, wo also kein überschattendes Baumkronendach vorhanden ist, aber auch Messpunkte, die teilweise überschirmt sind, oder auch eine fast vollständigen Überschildung mit einem Kronenschlussgrad von fast 90% aufweisen. Im Folgenden wird dargestellt, wie sich beide Parameter (Kronenschluss und Entfernung zum Waldrand) auf die Maximaltemperatur, Tagesmittelwerte und Temperaturschwankungen am jeweiligen Messpunkt auswirken.

Maximaltemperatur

Abbildung 6 und 7 zeigen, dass der entwaldete Bereich zwischen dem Rand des Hambacher Forsts und der Grube des Tagebaus Hambach die höchsten durchschnittlichen Maximaltemperaturen aufweist. Die über alle dort befindlichen Messpunkte gemittelte Tageshöchsttemperatur beträgt 35,3°C. Die durchschnittliche Maximaltemperatur am heißesten Messpunkt, der sich auf der nichtbewaldeten Offenfläche befindet (H2: 36,4°C), ist etwa 18°C wärmer als der kühlste Messpunkt im Hambacher Forst. Einer der mit etwas älteren Bäumen bestockte Messpunkt H49 auf der Sophienhöhe ist 19°C kühler.

Prinzipiell ist mit zunehmender Bedeckung durch Baumkronen und mit einer größeren Entfernung vom Waldrand in den Wald hinein eine Reduktion der durchschnittlichen Maximaltemperatur zu verzeichnen. Ausnahmen sind mit einer Kombination beider Faktoren zu begründen, da auch innerhalb des Waldbestandes das Wegfallen eines Kronenschirms (z.B. in Lücken) zu erheblicher Erwärmung der Temperaturen führt (z.B. H26). Auch kommt es innerhalb des Waldgebietes durch (trockenheits- und borkenkäferbedingtes) Absterben von Fichten zur Öffnung des Baumbestandes und damit zur Erhöhung der Temperaturen. Die Zerschneidung des Waldes durch Wege, Straßen und die ehemalige Autobahn A4 führt zur Öffnung des kühlenden Kronendachs und damit zur Temperaturerhöhung. Auch auf einem Teil - mit einem niedrigen Baumbestand bestockten - Sophienhöhe (H 47 und H48) sind hohe Maximaltemperaturen zu verzeichnen.

Es ist zu erkennen, dass die Temperatur an den Waldrändern durch einen erhöhten Kronenschluss reduziert wird. Die Flächen, auf denen eine bodendeckende Vegetation vorhanden ist, sind kühler als die Messpunkte, die sich auf kahlem Boden befinden. Entlang des Waldrandes ist zu erkennen, dass es bis auf wenige Ausnahmen mit zunehmender Beschattung durch die noch intakten Baumkronen zu einer Kühlung kommt. Die Messpunkte innerhalb des Waldgebietes, die einen Baumkronenschluss von über 70% aufweisen, sind relativ gleich temperiert und kühl im Vergleich zu den Rand- und Offenbereichen.

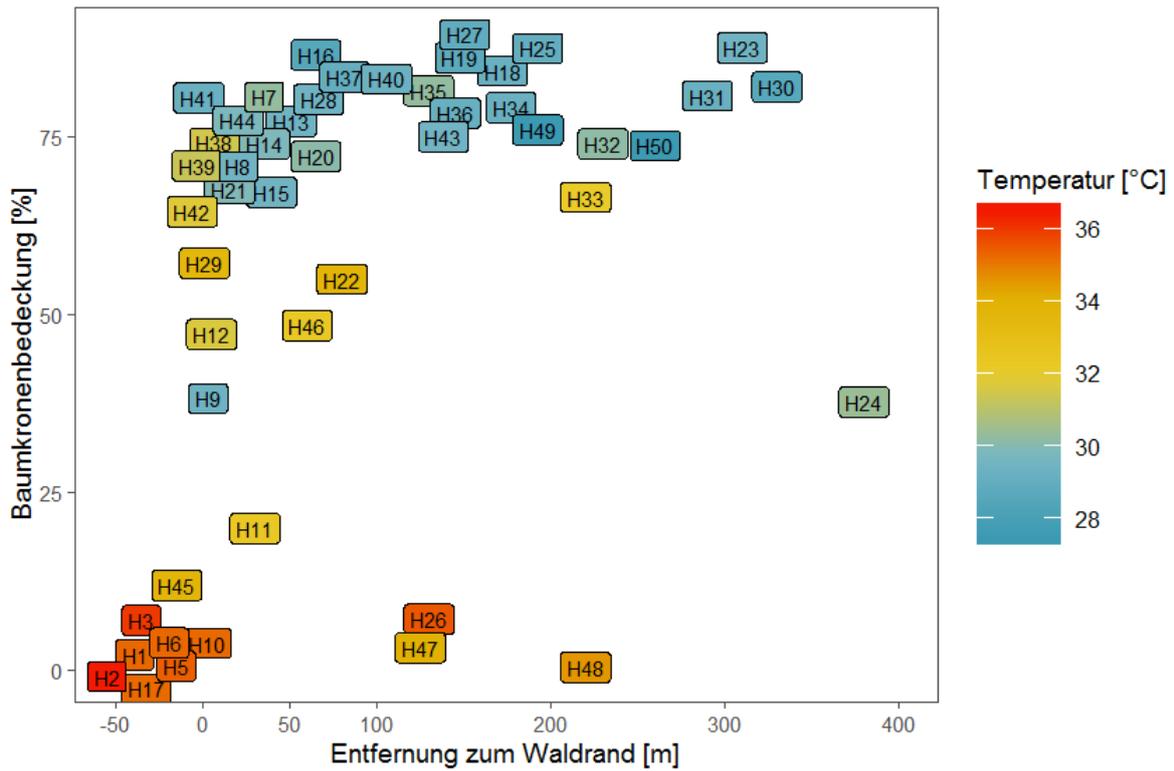


Abbildung 6: Durchschnittliche Maximaltemperatur an Tagen mit Tagesmitteltemperatur über 20°C. Die Ziffern in den Kästchen stellen den Namen eines Messpunktes dar. Die Entfernung eines Messpunktes innerhalb des Waldes zum Waldrand ist durch positive Zahlen dargestellt; die Entfernung eines Punktes außerhalb des Waldes, also dem Bereich zwischen Grube und Waldrand, ist mit negativen Zahlen gekennzeichnet.

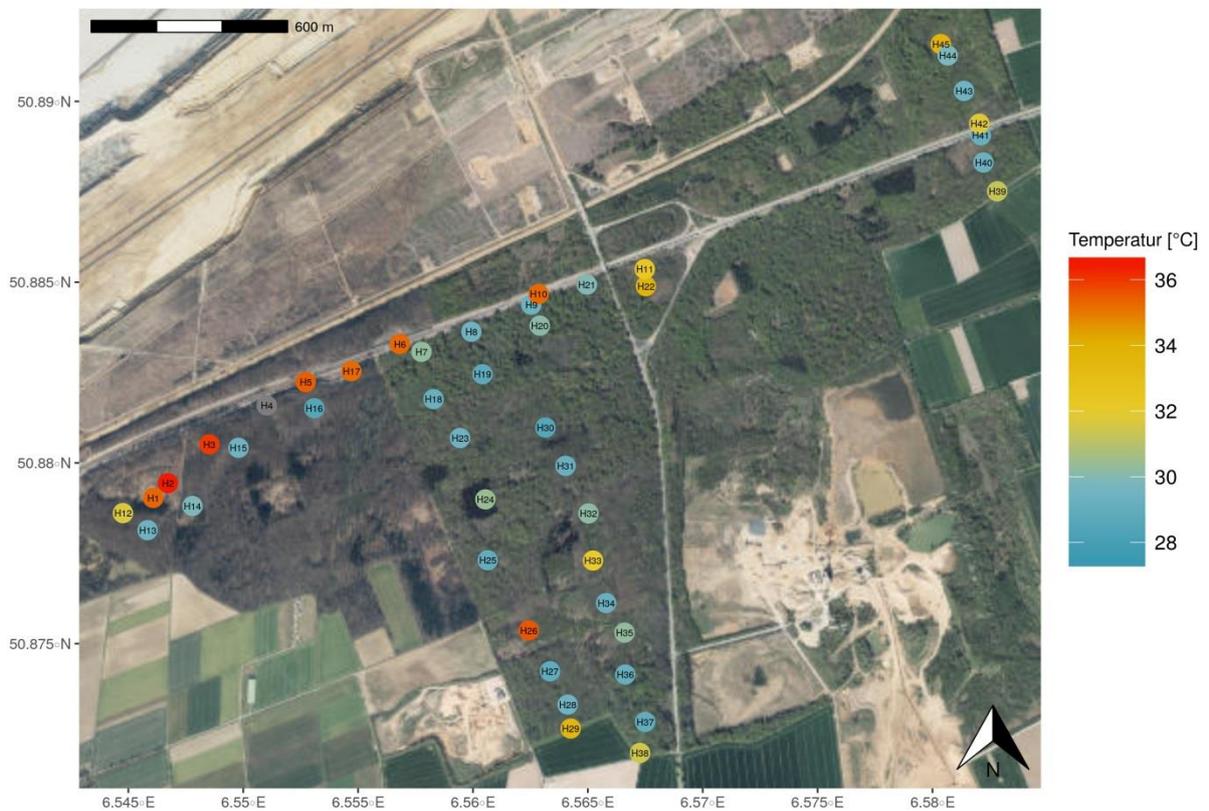


Abbildung 7: Räumliche Verteilung der Messpunkte südlich des Tagebaus Hambach. Die Farbe der Punkte repräsentiert die durchschnittliche Maximaltemperatur (blau=kühl, gelb=mittel, rot=warm).

Tagesmitteltemperatur

Mit steigendem Baumkronenschluss und steigender Distanz vom Grubenrand in den Wald hinein nimmt die Kühlungsleistung prinzipiell zu (Abbildung 8). Im Mittel ist die relative Kühlkapazität (RTC) innerhalb des Waldes im Hambacher Forst am stärksten (Abbildung 9). Die mit Bäumen bestockten Waldränder reduzieren die Tagesmitteltemperatur im Vergleich zum nichtbewaldeten Offenland in Grubennähe, die Ränder sind dennoch wärmer als das Waldinnere. Innerhalb des Hambacher Forsts bleibt die Tagesmitteltemperatur kühler als an dessen Rändern, auch dort wo das Baumkronendach innerhalb des Waldes offener ist (z.B. innerhalb der Lücke H24 und der mit Fichten bestandenen Fläche H26). Das nichtbewaldete Offenland Richtung Grubenrand und der weniger bewachsene Teil der Sophienhöhe weisen die geringsten Werte für RTC und somit die höchsten Tagesmitteltemperaturen auf.

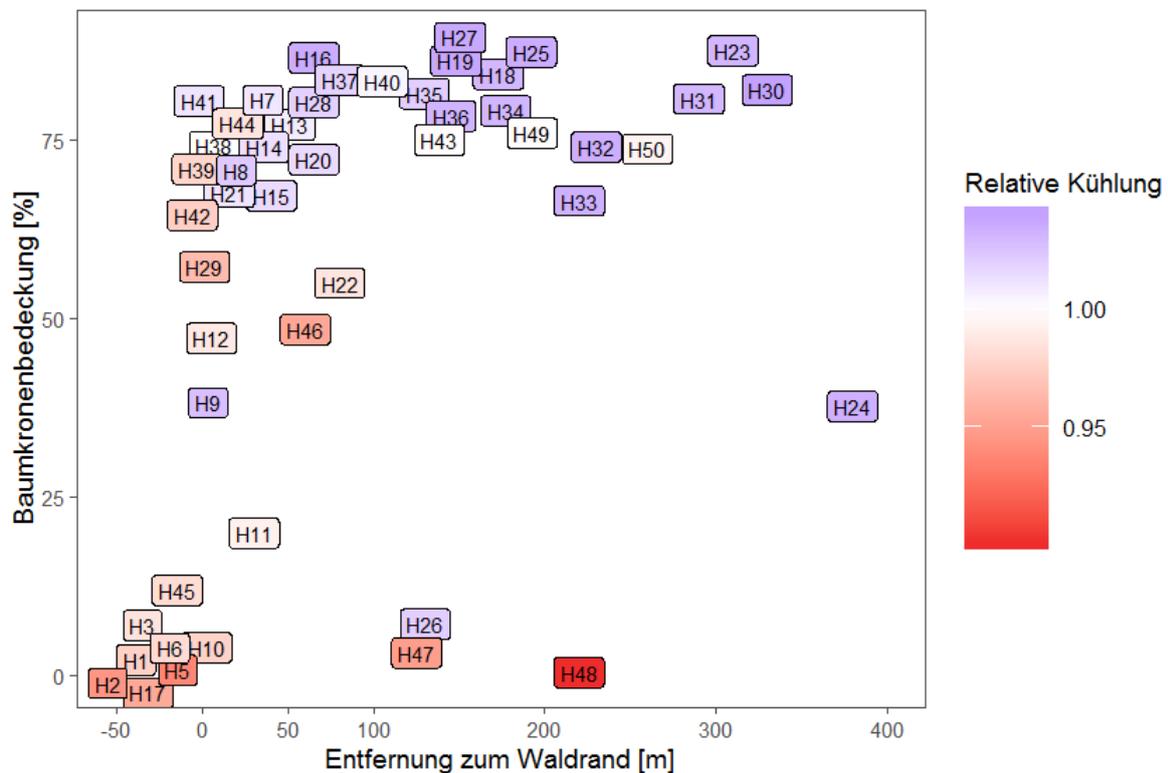


Abbildung 8: Durchschnittliche relative Kühlkapazität (RTC) an Tagen mit Tagesmitteltemperatur über 20°C. Werte =1 bedeuten, dass der Messpunkt die gleiche Tagesmitteltemperatur hat wie der Durchschnitt über alle Messpunkte. Ein Wert <1 bedeutet, dass ein Messpunkt im Vergleich zum Durchschnitt wärmer war; ein Wert >1 zeigt, dass er kühler war als der Durchschnitt über alle Messpunkte. Die Ziffern in den Kästchen stellen die Bezeichnung der verschiedenen Messpunkte dar. Die Entfernung eines Messpunkts innerhalb des Waldes zum Waldrand ist durch positive Zahlen dargestellt; die Entfernung eines Punkts außerhalb des Waldes - also dem Bereich zwischen Tagebau-Grube und Waldrand - ist mit negativen Zahlen gekennzeichnet.



Abbildung 9: Räumliche Verteilung der Messpunkte südlich des Tagebaus Hambach. Die Farbe der Punkte repräsentiert die relative Kühlkapazität (RTC) (blau= überdurchschnittliche Kühlkapazität, weiß=durchschnittliche Kühlkapazität, rot=keine Kühlkapazität).

Temperaturschwankungen

Abbildung 10 und 11 zeigen, dass im Mittel die Pufferung von Temperaturschwankungen (dargestellt durch die relative Pufferungskapazität (RTB), deren Berechnung die Standardabweichung der Tagesmitteltemperatur zugrunde liegt) im Innern des Hambacher Forsts am größten ist. Das heißt, im Hambacher Forst ist die Fluktuation der Temperaturen am geringsten. Jedoch sind die Schwankungen auch dort größer, wo das Baumkronendach offen ist. Der Waldrand an der dem Tagebau zugewandten Seite zeigt stärkere Temperaturschwankungen als die südlichen und landwirtschaftlichen Feldern zugewandten Ränder. Mit geringererem Baumkronenschluss und niedrigerer Distanz vom Grubenrand (also waldeinwärts) nimmt die Temperaturpufferungsleistung ab.

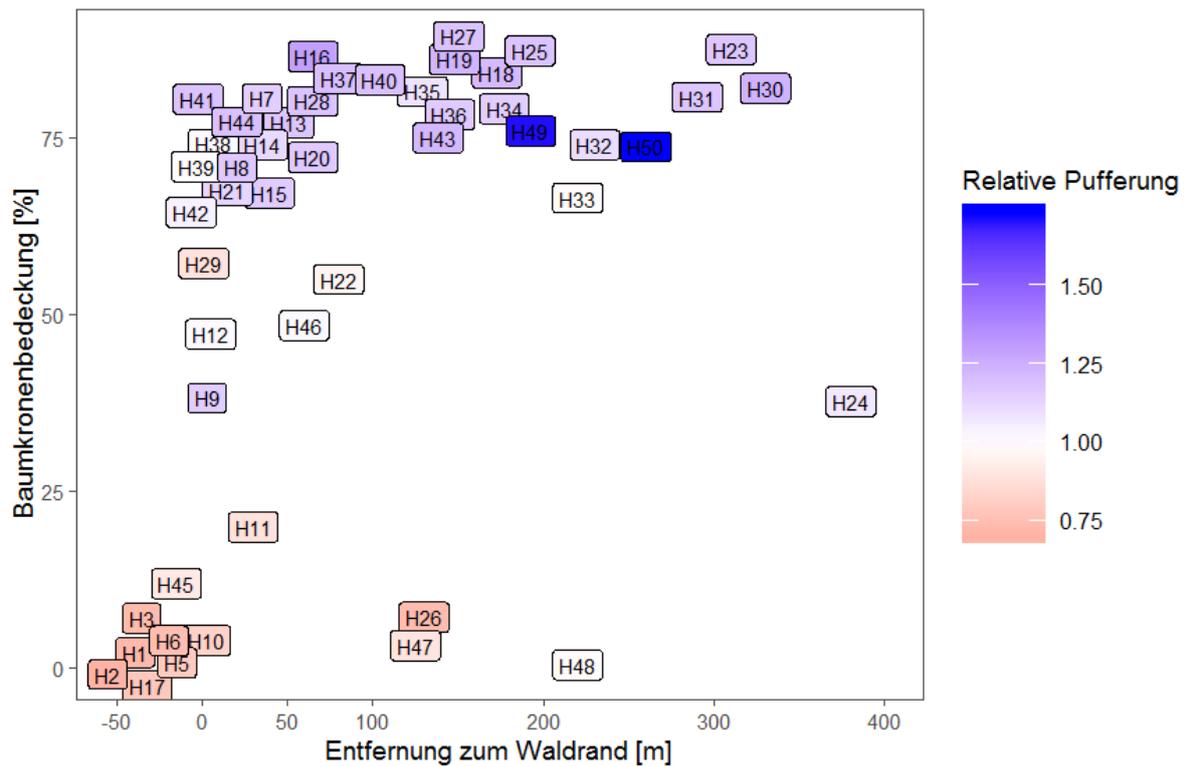


Abbildung 10: Durchschnittliche relative Temperatur-Pufferungskapazität (RTB) an Tagen mit Tagesmitteltemperatur über 20°C. Werte =1 bedeuten, dass der Messpunkt die gleiche Fluktuation der Tagesmitteltemperatur aufweist wie der Durchschnitt über alle Messpunkte. Werte <1 bedeuten, dass die Temperatur an einem Messpunkt im Durchschnitt und im Vergleich zum Durchschnitt über alle Messpunkte weniger stark schwankt. An den Messpunkten mit Werten >1 wurden die Temperaturschwankungen überdurchschnittlich gut gepuffert. Die Ziffern in den Kästchen stellen die Bezeichnung eines Messpunktes dar. Die Entfernung eines Messpunktes innerhalb des Waldes zum Waldrand ist durch positive Zahlen dargestellt; die Entfernung eines Punktes außerhalb des Waldes, also dem Bereich zwischen Grube und Waldrand, ist mit negativen Zahlen gekennzeichnet.



Abbildung 11: Räumliche Verteilung der Messpunkte südlich des Tagebaus Hambach. Die Farbe der Punkte repräsentiert die relative Temperatur-Pufferungskapazität (RTB). Die Farbe der Punkte repräsentiert die berechneten Werte (blau=überdurchschnittlich hohe Pufferungskapazität, weiß=durchschnittliche Pufferungskapazität, rot=geringe Pufferungskapazität).

Tagesverlauf der Temperatur

Für ein besseres Verständnis über den Zusammenhang der mikroklimatischen Indikatoren ist nachfolgend der Verlauf der Tagestemperatur am heißesten Tag der Messperiode dargestellt (26. August 2019; Abbildung 12). Der Unterschied zwischen den Standorten wird am (späteren) Nachmittag, wenn die Tageshöchsttemperaturen erreicht werden, am deutlichsten. Die der Grube zugewandten Ränder sind am heißesten (am Nachmittag) und am kältesten (am Morgen) und zeigen demnach die höchsten Maximaltemperaturen sowie die größten Schwankungen. Der Hambacher Forst ist am Nachmittag einer der kältesten Standorte, der über den gesamten Tagesverlauf die geringsten Schwankungen aufweist. Die beiden Messpunkte auf Aufforstungsflächen der Sophienhöhe mit größeren Bäumen weisen die geringsten Schwankungen auf; die Aufforstungsflächen mit kleineren Bäumen zeigen eine größere Schwankung.

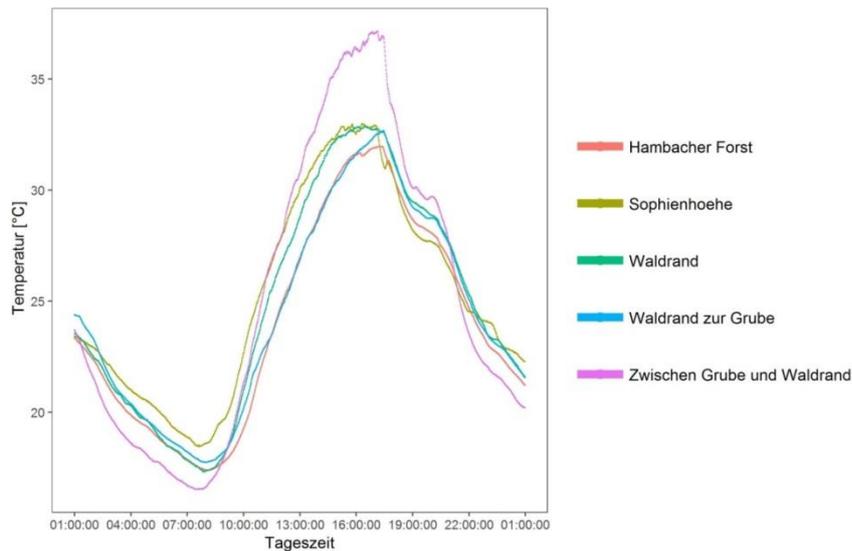


Abbildung 12: Temperaturverlauf am 26.08.19 als Mittelwert pro Standort und Messintervall (eine Minute).

Vergleich satellitenbildbasierte Analyse

Die durchschnittlichen Maximaltemperaturen, die anhand der Datenlogger-Messwerte berechnet wurden, bestätigen die Ergebnisse der satellitenbildbasierten Analyse (Abbildung 13). Das Waldinnere ist kühler als die Waldränder, die sich v.a. zur Grube des Tagebaus Hambachs hin erwärmen. Die einzige Ausnahme stellen die beiden Messpunkte dar, die innerhalb von weitgehend baumfreien Lücken innerhalb des Waldes installiert wurden, aber nicht durch die gröbere räumliche Auflösung auf der satellitenbildbasierten Analyse sichtbar wurden.

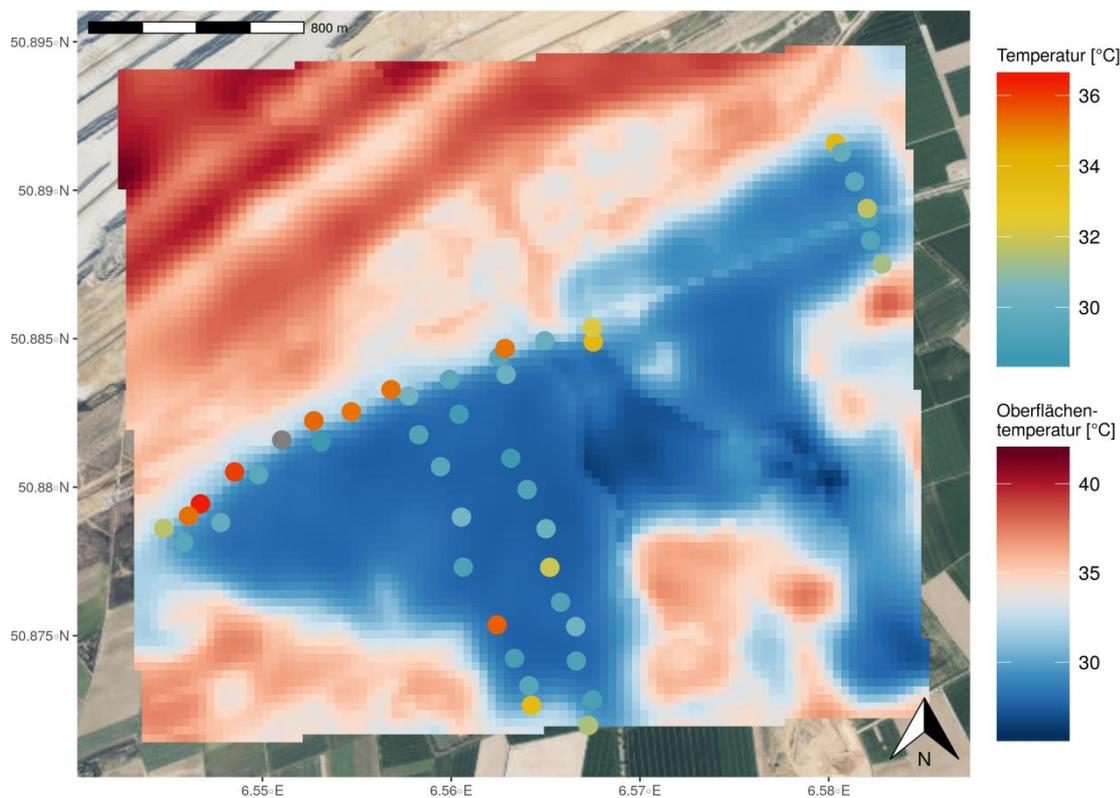


Abbildung 13: Durchschnittliche Maximaltemperatur (dargestellt als farbige Punkte) aus dieser Datenlogger-basierten Analyse und Ergebnisse der satellitenbildbasierten Analyse anhand von Landsat-8 Daten (Ibisch et al. 2019).

Diskussion

Obwohl nicht an den heißesten Tagen des Sommers gemessen wurde, bestätigt die nunmehr am Ende des Sommers durchgeführte mikroklimatische Studie die Befunde aus der satellitenbildbasierten Analyse (Ibisch et al., 2019). Der Hambacher Forst leidet unter der von der globalen Erwärmung ausgelösten Klimakrise und zudem auch an einer Mikroklimakrise. Er ist von sich stark erwärmenden Flächen umgeben, wobei besonders von der überdurchschnittlich heißen Tagebaugrube negative Randeffekte ausgehen.

Die Studie ergibt detailliertere Ergebnisse zur Wirkung des Tagebaus auf die Temperaturen des Waldes und Waldränder bzw. zur Kühlungsfunktion des Hambacher Forsts und dessen Ränder unter Berücksichtigung der Kronendachstruktur sowie der Entfernung zum Waldrand. Die Temperaturmessungen zeigen (erwartungsgemäß), dass die höchsten Temperaturen am Nachmittag erreicht werden. Da die Satellitendaten sich jeweils auf frühere Tageszeiten beziehen (Landsat-8: zehn Uhr morgens; MODIS Mittagszeit), ist davon auszugehen, dass sie die maximalen Oberflächentemperaturen sogar unterschätzen.

Der Hambacher Forst weist im Durchschnitt die tiefsten Temperaturen an heißen Tagen sowie die höchste relative Kühlungs- und Pufferungskapazität im Untersuchungsgebiet auf. Letztlich bestätigt dies auf methodisch völlig unabhängigem Wege die Befunde der satellitengestützten Analyse. Die Messpunkte zwischen Tagebau-Grube und Waldrand zeigen im Vergleich zum kühleren Wald bis zu 18°C höhere Temperaturen. Dies bedeutet, dass der Temperaturunterschied zwischen dem (gemäß Satellitendaten deutlich heißerem) Grubeninnern und Wald noch deutlich ausgeprägter sein wird. Es war bislang nicht möglich, weitere Messpunkte in geringerer Entfernung zum Grubenrand des Tagebaus oder innerhalb der Grube zu installieren. Die näher am Waldrand gelegenen Messpunkte werden auch durch den angrenzenden Wald und die noch vorhandene Bodenvegetation gekühlt.

Die Waldränder sind dort am wärmsten, wo das vor Sonneneinstrahlung schützende Kronendach am stärksten geöffnet ist. Ein geschlosseneres Baumkronendach führt zur Kühlung der Waldränder. Die Bäume an den dem Tagebau zugewandten Waldrändern sind stärkerer Hitze und Strahlung ausgesetzt und leiden unter der wetterbedingten und durch den Tagebau Hambach verstärkten Trockenheit (vgl. Ibisch et al., 2019). Die Bäume sind inmitten eines geschlossenen Waldbestandes aufgewachsen und wurden nun durch die dem Tagebau vorangehende Rodung plötzlich freigestellt. Die Bäume können sich an diese abrupt eingetretene Situation nicht anpassen und sind an heißen Tagen und in Trockenperioden ungepuffert derartig extremen Bedingungen ausgesetzt, sodass sie plötzlich absterben. Der offene Waldrand führt außerdem zu erhöhtem Windwurf der Randbäume und damit zur weiteren Öffnung des Kronendachs, wodurch sich die Flächen weiter erwärmen und austrocknen, was wiederum zum weiteren Absterben von Bäumen führt, wodurch das Kronendach wiederum noch offener wird. Dieser eskalierende Effekt einer komplexen Wirkungskaskade stellt eine akute Bedrohung und Gefahr für den Hambacher Forst dar. Eine geschlossener Waldrandstruktur würden die Waldbäume vor Hitze, Sonneneinstrahlung und der damit verbundenen Austrocknung von Böden und Wurzelwerk schützen. Außerdem könnte der Wind von einem gestuften Waldrand besser abgeleitet werden, sodass Bäume weniger leicht umstürzen.

Das nichtbewaldete Offenland weist die stärksten Temperaturschwankungen auf. Interessant ist die Betrachtung der Aufforstungsflächen auf der Sophienhöhe. Der vor längerer Zeit wiederbewaldete Teil der Sophienhöhe zeigt die größten relativen Werte für die Pufferungskapazität. Interessant ist,

dass die Temperaturen dort zwar weniger schwanken als an anderen Messpunkten, gleichzeitig aber die Tagesmitteltemperatur durchschnittlich hoch ist. Die Fläche weist demnach keine überdurchschnittliche Kühlungsleistung auf. Die Sophienhöhe ist nur dort relativ kühl, wo Bäume schon einige Jahrzehnte alt werden konnten und die Baumkronen einen Kronenschluss von über 70% erreicht haben. Im Kontrast gehören die drei Messpunkte, die im noch jüngeren, gepflanzten Baumbestand auf der Sophienhöhe liegen, zusammen mit den nichtbewaldeten Offenflächen zu den wärmsten. Ökologisch gesehen kann die bepflanzte Sophienhöhe nicht mit dem alten und durch eine sehr lange Kontinuität charakterisierten Hambacher Forst verglichen werden, der neben einer diversen Mischung an heimischen Baumarten und natürlicher Verjüngung auch einige sehr alte Bäume beherbergt und über eine außerordentlich gute Bodenqualität verfügt. Allerdings kann als erwiesen gelten, dass Aufforstung bzw. Wiederbewaldung erfolgreich eingesetzt werden können, um alte Reliktwälder mikroklimatisch zu stabilisieren. Die Ergebnisse zeigen, dass es möglich wäre, an dem tagebauseitigen Waldrand des Hambacher Forsts Temperaturschwankungen zu verringern sowie die Maximaltemperaturen und die Tagesmitteltemperatur zu senken. Dazu müsste die dem Wald vorgelagerte Fläche erhalten bleiben und wiederbewaldet werden.

Sämtliche abgestorbene oder windgeworfene Bäume müssen unbedingt an Ort und Stelle verbleiben, da die Stämme Wasser speichern und zur mikroklimatischen Regulation beitragen sowie die wichtige Boden- bzw. Humusbildung befördern. Eine Befahrung der Böden im Hambacher Wald sollte unbedingt unterlassen werden, um diese nicht zu schädigen. Die vorhandenen befestigten Straßen und Trassen (wie z.B. die alte Autobahn A4) haben eine wärmende Wirkung auf den Wald und zerschneiden das Waldökosystem. Ein Rückbau der Wege sowie eine Wiederbewaldung sollte schnellstmöglich umgesetzt werden.

Deutschlandweit leiden Wälder unter enormer Hitze und Trockenheit und viele Bäume sind gestresst oder sterben ab. Im Hambacher Forst ist der Trockenstress durch den Tagebau erheblich gesteigert. Die zu beobachtenden Probleme im Hambacher Forst sollten nicht leichtfertig mit Verweis auf die deutschlandweite Situation abgetan werden. Gleichzeitig gilt hier, was auch in anderen geschädigten Wäldern zu beachten ist: Auch wenn einzelne Bäume oder Baumbestände absterben, bleibt ein sich dynamisch wandelndes Waldökosystem bestehen - zumindest solange schädliche Eingriffe wie Rodungen oder das kontinuierliche Abbaggern und Entwässern ausbleiben. Waldökosysteme haben eine weithin unterschätzte Fähigkeit, sich selbst zu regulieren und ökologische Funktionen auch nach Störungen aufrecht zu erhalten bzw. wiederherzustellen. Im Hambacher Forst ist allerdings durch die geringe Größe des Restwaldes und die Nähe des Tagebaus ein überaus kritischer Zustand erreicht. Soll der Wald erhalten bleiben, muss umgehend gehandelt werden. Erforderlich sind der sofortige Stopp des Abbaggers v.a. auf der dem Hambacher Forst zugewandten Seite und die Einrichtung einer angemessen breiten thermischen Pufferzone um den gesamten Wald herum.

Empfehlungen

Durch diese Studie können die bereits in der satellitenbasierten Studie zu den Oberflächentemperaturen in der Umgebung des Hambacher Forsts formulierten Empfehlungen zum Schutz des Hambacher Forsts bestätigt und bekräftigt werden:

- Sofortiger Stopp des Abbaggers v.a. auf der dem Hambacher Forst zugewandten Seite.
- Einrichten einer thermischen Pufferzone von möglichst 500 m durch Wiederbewaldung mit einheimischen Arten auf dem gerodeten Gelände vor dem Tagebau, aber auch auf den umliegenden Flächen, einschließlich der Kiestagebaue und der landwirtschaftlichen Flächen.
- Bei anhaltender Dürre in den kommenden Jahren eine ökologisch verträgliche Bewässerung gewährleisten.
- Vorhandene Entwässerungssystem verschließen bzw. zurückbauen.
- Korridore (von mindestens 100 m Breite) schaffen und ausbauen, um die umliegenden Waldgebiete miteinander zu verbinden.
- Rückbau der befestigten Wege, Straßen und der Autobahn sowie Wiederbewaldung derselben.
- Totholz im Wald belassen.
- Keine Befahrung des Waldes und der Waldränder.

Literatur

Blumroeder, J.S., Burova, N., Winter, S., Goroncy, A., Hobson, P.R., Shegolev, A., Dobrynin, D., Amosova, I., Ilina, O., Parinova, T., Volkov, A., Graebener, U.F., Ibisch, P.L., 2019. Ecological effects of clearcutting practices in a boreal forest (Arkhangelsk Region , Russian Federation) both with and without FSC certification. *Ecol. Indic.* 106. doi:10.1016/j.ecolind.2019.105461

Ibisch, P.L., Kriewald, S., Blumröder, J.S., 2019. Hambacher Forst in der Krise: Studie zur Beurteilung der mikro- sowie Randeffekten. Greenpeace e.V., Hamburg. (https://www.greenpeace.de/sites/www.greenpeace.de/files/publications/hambacher_forst.pdf)

R Development Core Team, 2008. R: A language and environment for statistical computing. doi:ISBN 3-900051-07-0