

A. MARTINA GRUDZIELANEK / RICHARD LEMOINE-
RODRIGUEZ / PATRICIA GLOCKE / TOBIAS SCHOLZ / HARALD
ZEPP

Cold spots oder hot spots

Thermische Muster und Kaltluftabfluss auf Bergehalden im Ruhrgebiet

Cold spots or hot spots

Thermal patterns and cold airflow on tailings piles in the Ruhr area

KURZFASSUNG: Die thermischen Muster der Oberfläche von Bergehalden im Ruhrgebiet wurden durch Satellitenbildinterpretation (Landsat 8, Thermalkanal) und Geländemessungen identifiziert. Die räumliche Verteilung der Oberflächentemperatur wurde mittels der CART-Analyse auf Unterschiede der Bodenbedeckung (Wald, Grasbewuchs und dunkle unbewachsene Oberflächen) und Exposition zurückgeführt. NW- bis NE-exponierte bewaldete Hänge zeigten die niedrigste Oberflächentemperaturen, die höchsten traten an unbewachsenen E- bis SE-exponierten Hängen mit dunkler Oberfläche auf. Kaltluftabfluss sowie die Bildung von Kaltluftseen am Hangfuß einer exemplarisch ausgewählten Halde wurden durch Messungen mit einer thermischen Infrarotkamera (TIR) und Lufttemperatursensoren nachgewiesen. Der Kaltluftabfluss von der Halde trat in die angrenzende Schüngelbergsiedlung über. Die Ergebnisse sind relevant für lokale Klimaanpassungsplanungen.

Schlagwörter: Stadtklima, Halden, Kühlungspotential, Thermographie, Fernerkundung, Kaltluft

ABSTRACT: Thermal patterns of tailings piles in the Ruhr area by considering both surface temperatures and air temperatures were investigated. Surface temperatures were both calculated from Landsat 8 (thermal band) and measured in the field. By means of the CART analysis, for eleven selected heaps, plausible and according to the state of knowledge expected LST differences of the land cover types forest, grassland, and dark vegetation free surfaces were proved. NW- to NE-exposed wooded slopes showed lowest surface temperatures, highest surface temperatures occurred on bare E- to SE-exposed slopes covered with dark vegetation free surfaces. The formation of cold airflow on the NE-slope of the Rungenberg heap as well as the formation of cold air pools at the foot of the slope by means of field measurements using a thermal infrared camera (TIR) and air temperature sensors were verified. Thus, the cooling effect of the cold air formed on the slope on the Schüngelberg settlement could also be demonstrated. The concluding findings are relevant for local climate adaptation plans.

Keywords: City climatology, Heaps, Cooling effect, Thermography, Remote sensing, cold air

1 Einleitung

Die Bergehalden im Ruhrgebiet sind ein Zeugnis des Steinkohlebergbaus der letzten Jahrhunderte. Nach dem Ende der Schüttung wurden die Halden zum Teil bepflanzt, zum Teil entwickelte sich die Vegetation spontan, so dass das Erscheinungsbild der Halden inzwischen durch Wälder, Wiesen, Hochstaudenfluren, Annuellenfluren und vegetationsfreie Bereiche gekennzeichnet ist. Die meisten Halden sind zu wichtigen Erholungsräumen für die Stadtbevölkerung geworden. Als Grün- und Freiflächen stellen sie zahlreiche Ökosystemleistungen bereit, unter denen die Minderung städtischer Überwärmung im Ballungsraum (LANUV NRW 2016) als eine wesentliche Rolle diskutiert wird. Besonders bei stabilen Wetterlagen, die eine Luftdurchmischung abschwächen und große Hitze mit sich bringen, kommt es in Ballungsgebieten, in denen städtische Wärmeinseln relativ dicht beieinander liegen, zu starker thermischer Belastung der Stadtbewohner. Daher weisen LANUV NRW (2018) und MKULNV NRW (2011, 24) den Grünflächen und somit auch den begrünter Halden eine thermische Ausgleichsfunktion zu.

Die besonderen Standorteigenschaften, wie dunkle Schotteroberflächen und das Fehlen natürlich entstandener tiefgründiger Böden, modifizieren das oberflächennahe Mikroklima. Zudem ist anzunehmen, dass die Halden das Geländeklima der näheren Umgebung günstig beeinflussen. Halden scheinen aufgrund ihrer exponierten Stellung, bewachsenen Oberflächen und der steilen Hänge in der Lage zu sein, Kaltluft zu bilden und in die Umgebung abfließen zu lassen. Andererseits sind einige Halden noch nicht endgültig erkaltet. Die verkippte Restkohle kann sich bei Sauerstoffzufuhr selbst entzünden und in wenigen Metern Bodentiefe zu hohen Temperaturen führen (BEZIRKSREGIERUNG ARNSBERG 2018, o. S.).

Es gibt bis heute wenige Studien, die die thermischen Eigenschaften von Halden und deren klimatische Ausgleichsfunktion detailliert untersucht haben (z. B. HOBERT & SCHÄPEL 1986; KUTTLER et al. 2011; SCHIRMER et al. 2013). Durch den fortschreitenden Klimawandel wird die klimatische Ausgleichsfunktion immer relevanter und die Halden rücken wegen ihrer Reliefenergie und der dadurch potentiell großen Reichweite des kühlenden Einflusses in den Fokus der Stadtplanung. Zudem hat sich die Vegetationsbedeckung auf den Halden im Ruhrgebiet über die Jahrzehnte stark verändert, wodurch eine Analyse der heutigen Situation mit einem passenden Methodenensemble sinnvoll ist.

In diesem Beitrag wird daher auf der Grundlage empirischer Daten aus Fernerkundung und bodengestützten Messungen der Frage nachgegangen, welche Abhängigkeiten zwischen dem thermischen Charakter von Haldenoberflächen, der Exposition sowie der Art der Oberflächenbedeckung bestehen. Im Anschluss daran wird an einem repräsentativen Fallbeispiel untersucht, ob nächtliche Kaltluftabflüsse nachweisbar sind und ob sie stark genug sind, während heißer Tage eine kühlende Wirkung auf angrenzende Siedlungen zu entfalten. Abschließend wird diskutiert, inwiefern die Ergebnisse verallgemeinerungsfähig sind und was sie für die Regional- und Bauleitplanung bedeuten.

2 Geländeklima und Halden-spezifische Modifikationen

2.1 Geländeklima, Kaltluftproduktion- und Akkumulation

Bei autochthoner windschwacher Strahlungswetterlage kann sich bodennah ein standortabhängiges Mikroklima ausbilden. Es ist vom übergeordneten klimatischen Geschehen abgekoppelt, das sich gemäß den kleinräumigen Standorteigenschaften ausbildet (BENDIX 2004, 23). Die Standorteigenschaften bedingen die Strahlungsbilanz, die maßgeblich die Ausprägung des Geländeklimas beeinflusst. Die wichtigsten Eigenschaften sind die Geländehöhe, die Oberflächenbedeckung und -eigenschaften sowie der Geländewinkel (BENDIX 2004, 51 ff.). Der Geländewinkel setzt sich aus Sonnenhöhe, Sonnenazimut, Inklination (Hangneigung) und Exposition (Hangausrichtung) zusammen. Die Standorteigenschaften entscheiden darüber, wie viel kurzwellige Sonneneinstrahlung (am Tag) u.a. reflektiert oder absorbiert und wie viel langwellige Wärmestrahlung (am Tag und in der Nacht) abgegeben und zudem, wie viel Wärme wann und wie lange gespeichert wird. Betrachtet man Vollformen, wie die Bergehalden im Ruhrgebiet, entscheidet vorwiegend die Form der Halde und die daraus resultierende Exposition der Hänge über den Zeitpunkt der Abschattung bei Sonnenuntergang. Die Strahlungsbilanz von nord- und ostexponierten Hängen wird durch die frühere Abschattung früher negativ, als es an süd- und westexponierten Hängen der Fall ist (auf der Nordhalbkugel). Wenn die Strahlungsbilanz der Erdoberfläche negativ wird, es also mehr langwelligen Strahlungsoutput (Wärmestrahlung) als kurzwelligen Strahlungsinput (Sonneneinstrahlung) gibt, kühlt der oberflächennahe Boden aus, und als Folge dessen kühlen auch die bodennahen Luftschichten ab. Es bildet sich eine Bodeninversion aus mit geringen Lufttemperaturen in Oberflächennähe und höheren Lufttemperaturen darüber. So entsteht Kaltluft in Oberflächennähe. Je nach Oberflächenart unterscheiden sich die Kaltluftproduktionsraten: Äcker, Wiesen und Wälder erreichen höhere Raten, als beispielsweise bebauten und versiegelten Flächen (BENDIX 2004, 163). Vegetationsdichte, Bodenverdunstung und Transpiration der Pflanzen sind einige der Einflussfaktoren, die zu großen Spektren der Kaltluftproduktionsraten führen. Kalte Luft ist schwerer als warme Luft und strömt hangabwärts entlang des Reliefs (OKE 1987, 178). Die Reliefenergie verleiht der im gegliederten Gelände gebildeten Kaltluft einen zusätzlichen Bewegungsimpuls. Sie muss somit nicht ausschließlich durch die thermischen Unterschiede und den dadurch entstehenden Druckgradienten in Bewegung kommen. Die Kaltluft fließt teils in Kaltluftpaketen unterschiedlicher Größe und Form hangabwärts entlang von Rinnen (Foken 2006, 238 ff.). Befinden sich im Gelände Mulden und Täler, so füllen sich diese über Nacht mit Kaltluft auf, es bilden sich Kaltluftakkumulationen, auch Kaltluftseen genannt (WHITEMAN et al. 2010, 1895 ff.; DORNINGER et al. 2011, 2225 ff.). Diese Kaltluftseen können sich dynamisch bewegen, den entsprechenden Bewegungsimpuls erhalten sie beispielsweise von übergeordneten Winden und den in den Kaltluftsee zusätzlich hineinfließenden Kaltluftpaketen (LAREAU & HOREL 2015, 259 ff.; LEHNER et al. 2016, 231). Ändert sich die oberflächennahe Lufttemperatur, z. B. durch ein hangabwärts strömendes Kaltluftpaket, so ändern

sich auch die Oberflächentemperaturen, da das Luftpaket einen sofortigen (kühlenden) Einfluss auf die Oberflächen hat.

2.2 Klimatische Einordnung von Halden im Ruhrgebiet

Rudolf Geiger (1941) stellte schon früh heraus, dass Halden das Mikroklima verändern: Er verwandte den Begriff „Hangklimate“, ohne die Hangklimate von Halden genauer zu beleuchten. Hobert & Schäpel wiesen 1986 durch empirische Analysen auf Bergehalden im Ruhrgebiet nach, dass trotz frischer Schüttung und bei noch geringer Vegetationsbedeckung im Bereich des Haldenfuß, bei autochthoner Wetterlage Kaltluft produziert wurde und an den Hangbereichen abfloss (HOBERT & SCHÄPEL 1986, 16 ff.). Die *Gesamtstädtische Klimaanalyse Gelsenkirchen* bestätigt, dass „bei einer ausreichenden Größe des Haldenkörpers [...] während austauscharmer Strahlungsnächte eine Kaltluftbildung einsetzt“ und es zu einer Kaltluftakkumulation am Haldenfuß in Folge von Stauwirkungen durch Hindernisse oder entsprechender Topographie kommen kann (KUTTLER et al. 2011, 132). Das Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz NRW teilt in der *Klimaanalyse NRW* den Halden das „Freilandklimatop“ zu (LANUV NRW 2018, 41), welches die Fähigkeit zur Kaltluftproduktion und somit grundsätzlich die Voraussetzung zur klimatischen Ausgleichsfunktion beinhaltet. Der Regionalverband Ruhr (RVR) beschreibt hingegen im *Fachbeitrag zum Regionalplan der Metropole Ruhr* Halden als überwärmte Kuppenzonen, die über lange Zeit aus der nächtlichen Bodeninversion herausragen. Kalte Luft fließt von Kuppenzonen ab, wodurch diese relativ warm bleiben (RVR 2013, 46). Das bedeutet, dass Halden nachts warme Spots darstellen können, gerade weil sie Kaltluft produzieren, diese aufgrund des Reliefs jedoch direkt abfließt und sich nicht akkumuliert. Zudem ist zu erwarten, dass vegetationsfreie dunkle Kuppen sich aufgrund ihrer geringen Albedo stark erwärmen und deshalb einen stark ausgebildeten *hot spot* darstellen könnten. Im *Klimaserver Ruhrgebiet* wird einigen Halden pauschal das Parkklima (Grasflächen) oder das Waldklima (Flächen mit Baumbestand) zugeteilt (RVR 2021a), ohne die Oberflächenbedeckung differenziert zu betrachten. Einigen Halden, für die das Parkklima ausgewiesen ist, wird eine hohe Kaltluftproduktionsrate sowie eine Kaltluft- und Flurwinddynamik zugesprochen (RVR 2021a).

Die gegensätzlichen Bewertungen des Haldenklimas mögen auf die große Vielfalt der Halden zurückzuführen sein; sie variieren in i) ihrer Größe und Topographie, ii) dem Material ihrer Haldenkörper, iii) ihrer Oberflächenbeschaffenheit und iv) ihrer in der Halde u. U. (noch) vorhandenen Eigenwärme. Die Frage nach der Wechselwirkung zwischen Warmbereichen sogenannter Brennender Halden und Kaltluftbildung ist bislang nicht bearbeitet. Dieser Beitrag analysiert zunächst die Abhängigkeit der thermischen Muster der Oberflächentemperaturen von der Oberflächenbeschaffenheit und der Exposition. Die Analyse mündet in eine hierarchische Klassifikation der Oberflächentemperaturen (Land Surface Temperature(s) = LST). Am Beispiel einer Halde dokumentiert dieser Beitrag durch Messungen, wie sich über Flächen mit unterschiedlicher Oberflächentemperatur Kaltluft bildet und sie anschließend hangabwärts fließt.

3 Untersuchungsraum und Methodik

3.1 Die Halden im Untersuchungsraum

Die Zusammenstellung von Berke (2016) bietet mit mehr als 50 einzelnen Erhebungen die derzeit umfassendste Übersicht über die größeren Halden und Deponien im Ruhrgebiet. Deren Gesamtfläche beträgt 2269 ha. Die Auswahl für die vorliegende Arbeit besteht aus zehn Halden und einer Deponie (Tab. 1) aus dem nördlichen Ruhrgebiet (Abb. 1), die zusammen 642 ha oder 28,3 % der oben angeführten Gesamtfläche entsprechen. Wichtigstes Auswahlkriterium war eine große Verschiedenheit der Oberflächenbedeckung bzw. -beschaffenheit (Wald, Grasbewuchs und dunkle unbewachsene Oberflächen), um Aussagen über den Einfluss der Oberflächenbeschaffenheit auf die Oberflächentemperatur treffen zu können. Deshalb sind in der dargestellten Auswahl die im Ruhrgebiet seltenen vegetationsfreien und die Halden ohne Waldbedeckung überrepräsentiert. Zehn Halden weisen dunkle unbewachsene Areale auf. In dieser Untersuchung werden unter der Bezeichnung dunkle unbewachsene Oberfläche dunkelgrau bis schwarz gefärbte Oberflächen aus Lockermaterial verschiedener Korngröße (Sand bis Blöcke) und dunkle Asphaltoberflächen zusammengefasst. Für die fernerkundliche Detektion der LST wurde darauf geachtet, nur genügend große Areale zu berücksichtigen, die eine homogene Oberflächenbeschaffenheit aufweisen, sodass sie durch eine größere Anzahl an Satellitenbild-Rastern zusammenhängend überdeckt sind. So gelangte, wegen ihrer prozentual großen zusammenhängend dunklen unbewachsenen Oberfläche, die mit 5 ha flächenmäßig kleinste, die Halde Lothringen, in die Auswahl.

3.2 Halde Rungenberg

Die Halde Rungenberg bot sich bevorzugt als Untersuchungsobjekt für Kaltluftmessungen an, da (i) sie potentiell Kaltluft-bildende Oberflächen aufweist, (ii) die Hänge steil genug sind, dass Kaltluft abfließen kann und (iii) eine Siedlung in unmittelbarer Nachbarschaft liegt, die möglicherweise von einer klimatischen Ausgleichswirkung der Halde profitiert (Abb. 2). Im Klimaanpassungskonzept der Stadt Gelsenkirchen ist ihr eine relevante Funktion für die Produktion und den Abfluss von Kaltluft in die Umgebung zugesprochen (KUTTLER et al. 2012, 42). Die Halde steht im Zusammenhang mit dem ehemaligen Steinkohlebergwerk Hugo (BERKE 2016) in Gelsenkirchen-Buer. Sie liegt nördlich der Autobahn A2 und wird von der Rungenbergstraße im Westen und der Horster Straße im Osten begrenzt. Die Halde dient als Naherholungsgebiet, insbesondere für die Bewohner*innen der benachbarten Schüngelbergsiedlung. Mit ihrer aufgesetzten Doppel-Pyramide ist sie als Industriedenkmal des Ruhrgebiets überregional bekannt. Sie zählt zu den höchsten Halden im Ruhrgebiet (HELLMANN 2018; Höhe: 60 m; Pyramidenspitze 106 m ü. NN). Auf der Halde detektierte die Bezirksregierung Arnsberg im Rahmen eines Monitorings vier Warmbereiche. Deshalb gilt sie als ‚Brennende Halde‘. Die maximale Temperatur in 10-15 m Tiefe betrug 66 °C (BEZIRKSREGIERUNG ARNSBERG 2018, o. S.). Die Lage der Warmbereiche wurde nicht veröffentlicht.

Tab. 1: Charakteristika der Halden

| Name | Kommunale Zugehörigkeit | Fläche [ha] ^{a)} | Prominenz [m] | Oberflächenbedeckung/ -beschaffenheit ^{b)} | | | Nr. in Abb. 1 |
|-------------------------------|--|------------------------------|---------------|--|-------------|---------------------------------|-----------------|
| | | | | geschlossene Baumvegetation/Wald | Grasbewuchs | dunkle unbewachsene Oberflächen | |
| Schurenbachhalde | Essen | 41 | 57 | xxx | - | xx | 3 |
| Halde Rheinelbe | Gelsenkirchen | 16 | 48 | xxx | x | xx | 5 |
| Halde Lothringen ^e | Bochum | 5 | 26 | xxx | | xx | 10 |
| Halde Rungenberg | Gelsenkirchen | 53 | 77 | - | xxx | xx | 4 |
| Halde Haniel | Bottrop | 110 | 117 | xxx | xx | x | 1 |
| Halde Mottbruch | Gladbeck | 34 | 47 | - | xxx | x | 2 |
| Deponie Becker/Wollkippe | Drei-Städte-Eck Bochum / Gelsenkirchen / Herne | 21 | max. 57 | xxx | x | x | 6 ^{c)} |
| Halde Hoppenbruch | Herten | 70 | 73 | xxx | x | x | 7 |
| Halde Hoheward | Herten/Recklinghausen | 165 | 111 | xxx | xx | x | 8 |
| Kissinger Höhe | Hamm | 43 | 60 | xxx | | x | 11 |
| Deponie II/ Gleiskippe | Grenze Bochum / Gelsenkirchen | 8 | max. 31 | xxx | - | - | 6 ^{c)} |

xxx = dominant xx = gut vertreten x = kommt vor - = nicht vorhanden

| | | | | | | | |
|-------------------------------------|-----------------------|----|----|-----|---|---|---|
| Halde Ewald- Fortset- zung | Oer-Erken- schwick | 16 | 55 | XXX | - | - | 9 |
|-------------------------------------|-----------------------|----|----|-----|---|---|---|

^a im GIS ermittelt

^b visuell ermittelt über Google Earth

^c Deponie Becker/ Wollkippe und Deponie II/ Gleiskippe bilden eine zusammenhängende Erhebung.

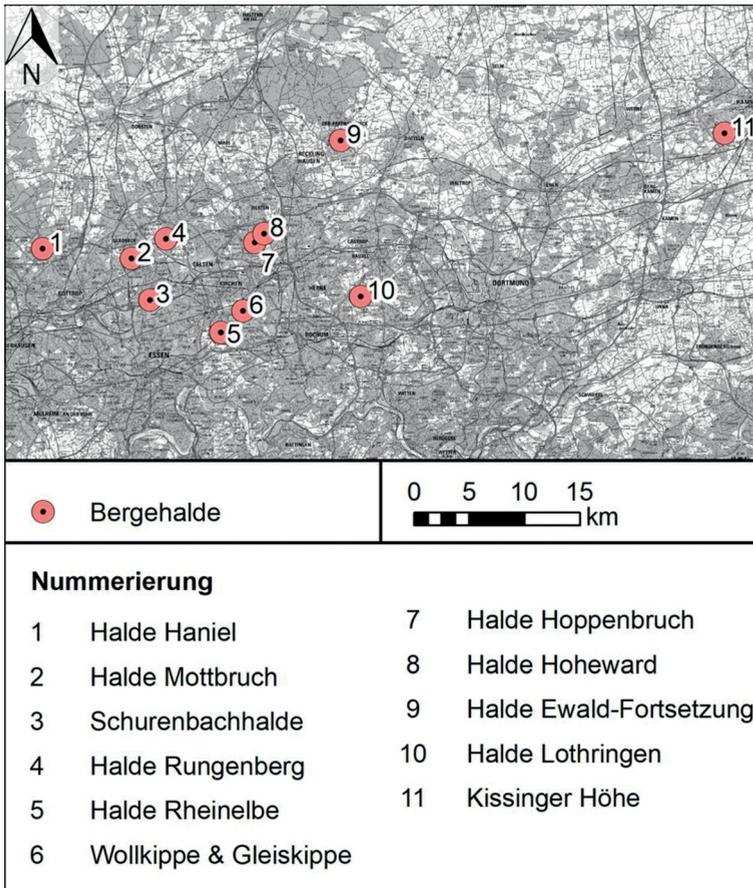


Abb. 1: Lage der untersuchten Halden im nördlichen Ruhrgebiet. Kartenhintergrund: Geobasis NRW 2022. Eigene Darstellung.

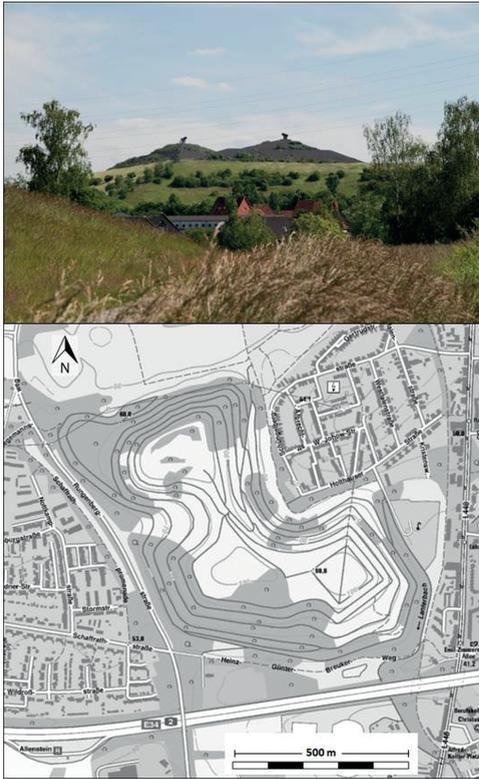


Abb. 2:
Halde Rungenberg in Gelsenkirchen-Buer,
NRW ($51^{\circ}33'N$, $7^{\circ}02'E$); a) Foto von Norden,
Dächer der Schüngelbergsiedlung im Vorder-
grund, eigenes Foto; b) Topographie: Geoba-
sis NRW 2022. Eigene Darstellung.

3.3 Methodik

3.3.1 Thermische Muster der Oberflächentemperaturen auf Halden im Ruhrgebiet

Die LST der in Tabelle 1 aufgeführten Halden wurden fernerkundlich ermittelt. Dazu wurde der Thermalkanal der Landsat-8-Satellitenbilder mit einer 30 m-Auflösung für einen wolkenlosen Tag (1.4.2019, 10:27 MEZ (Mittleuropäische Zeit)) analysiert (LEMOINE-RODRÍGUEZ & MAS 2020). Die räumliche 30 m-Auflösung der Landsat-Thermalbänder ist das Ergebnis einer Neuabtastung der ursprünglichen Auflösung von 100 m unter Anwendung der ‚kubischer Faltung‘ (*cubic convolution*; USGS, 2019). Bei diesem Verfahren werden die resultierenden Zellenwerte für einen vier mal vier großen Block berechnet, der die Eingabezelle umgibt. Diese Prozedur reduziert die Unterschiede in der Pixelausrichtung zwischen der 100 m-Thermalauflösung und den 30 m-Multispektralbändern auf Kosten räumlicher Details. Die Transformation ist in der Regel nicht invertierbar, eine Inversion würde nicht zu einer lagegenaueren Abbildung der 100 m-Pixel führen. Die Verwendung einer solchen 30 m-Auflösung der Landsat-Thermalbänder ist das Standardverfahren in der satellitengestützten Stadtklimatologie, um Unterschiede in der Oberflächentemperatur in sehr heterogenen räumlichen Konfigurationen wie städtischen Gebieten festzustellen. Die Temperaturabweichungen vom

Mittelwert der Temperaturen aller Rasterflächen gingen als Zielvariable in das Analyseverfahren ein. Als bestimmende Variablen für die LST wurden die Haldenattribute ‚Oberflächenbeschaffenheit‘ und ‚Exposition in 8 Sektoren‘ gewählt. Tabelle 2 zeigt die diesen Haldenattributen zugeordneten Häufigkeiten der Rasterzellen.

Tab. 2: Häufigkeitsverteilung der Haldenattribute auf die insgesamt 2133 Rasterzellen

| Oberflächenbedeckung/ -beschaffenheit | Exposition* | Anzahl der Rasterzellen des Satellitenbilds |
|--|--------------------|--|
| Dunkle unbewachsene Oberflächen | E | 32 |
| | N | 33 |
| | NE | 26 |
| | NW | 58 |
| | S | 42 |
| | SE | 61 |
| | SW | 45 |
| | W | 35 |
| Grasbewuchs | E | 16 |
| | N | 10 |
| | NE | 18 |
| | NW | 20 |
| | S | 106 |
| | SE | 34 |
| | SW | 64 |
| | W | 88 |
| geschlossene Baumvegetation/Wald | E | 182 |
| | N | 463 |
| | NE | 377 |
| | NW | 252 |
| | S | 27 |
| | SE | 81 |
| | SW | 17 |
| | W | 46 |

^{*)} Datengrundlage: https://www.bezreg-ko-eln.nrw.de/brk_internet/geobasis/hoehenmodelle/index.html; Gitterweite: 1 m; Höhengenaugigkeit: +/- 2 dm

Die CART-Analyse (*Classification and Regression Trees*; BREIMANN et al. 1984; BREIMANN 1996; R CORE TEAM 2020) identifiziert die Haldenattribute und ihre Ausprägung, welche die LST am stärksten bestimmen. Im CART-Algorithmus werden Binärbäume erzeugt, also entstehen in jedem Rechenschritt immer max. zwei neue Äste, die in je-

dem Rechenschritt die signifikanten Zusammenhänge mit der geringsten Irrtumswahrscheinlichkeit identifizieren. Das Ergebnis erlaubt somit verallgemeinerbare Aussagen über die Abhängigkeiten der LST von den Haldenattributen. Weitere Erläuterungen der hier durchgeführten CART-Prozedur sind im Anhang zu dieser Arbeit einzusehen.

3.3.2 Kaltluftbildung, Kaltluftabfluss und Kühlungspotential der Halde Runenberg

Geländemessungen dienten der Erfassung der Oberflächen- und Lufttemperaturen auf der Halde Runenberg am 14.9.2020. Dieser Tag zeigte eine autochthone Witterung, welche die Grundlage für geländeklimatische Unterschiede, somit auch für thermische Unterschiede und Kaltluftentstehung darstellt. An verschiedenen Standorten auf der Halde (Abb. 3) wurden mittels mobiler Messgeräte Handmessungen durchgeführt sowie eine bodengestützte thermographische Infrarot Kamera (TIR) (*VarioCam, Infra-Tec*) eingesetzt. Lufttemperatur und Luftfeuchte, Windgeschwindigkeit und -richtung wurden auf Messgängen zwischen 15 MEZ und 22 MEZ in 2 m sowie 5 cm über Grund erfasst. So konnten Bodeninversionen sowie bodennahe Strömungen erkannt werden. Die mittels der TIR Kamera erfassten Oberflächentemperaturen (Mittelwert aus jeweils 4 m² großen Messflächen) ermöglichen (i) den Abgleich mit dem durch die Satellitenbilder erfassten thermischen Muster (Infrarot-Kanal) am Tag und (ii) eine Einschätzung der thermischen Veränderung über den Abend in die Nacht hinein. Das Kronendach der Bäume war am Messtag noch vollständig ausgebildet.

Für den Nachweis von Kaltluftbildung, Kaltluftabfluss und Kühlungspotential wurde eine Messkampagne auf dem ostexponierten Hang im nördlichen Teil der Halde sowie im angrenzenden Bereich der Schüngelbergsiedlung (Abb. 3) durchgeführt. Der Hang ist mit einer Wiese bewachsen und weist nur wenige kleine Gebüsche auf, die den Kaltluftabfluss behindern könnten. Die Untersuchungsfläche ist ungefähr 90 m breit und etwa 200 m lang. Der Hang ist durch Bermen terrassiert, auf denen Wege verlaufen. Im unteren Hangabschnitt stehen Bäume dicht beieinander (Abb. 2b), Abb. 3). Der Übergang in die Schüngelbergsiedlung wird abschnittsweise durch eine 3,5 m hohe Mauer unterbrochen.

Die Messkampagne fand in der Nacht vom 21. auf den 22.4.2019 auf dem Hang im Nordosten der Halde statt. Auch dieser Tag zeigte eine autochthone Witterung. Das Kronendach der Bäume auf der Halde und ihrer Umgebung war zu diesem frühen Zeitpunkt in der Vegetationsperiode bereits vollständig ausgebildet. Von der Pyramide aus wurden die Oberflächentemperaturen des Hanges, des Haldenfußes sowie der Siedlung mit der TIR Kamera von 19:30 bis 4:30 MEZ in einem Intervall von 2 Sekunden erfasst. Eine solche sequenzierte Erfassung der Oberflächentemperatur an begrünten Hängen kann die abfließende Kaltluft detektieren und ermöglicht eine Analyse der bodennahen Strömungsmuster (GRUDZIELANEK & CERMAK 2015, 325 ff.; GRUDZIELANEK & CERMAK 2018, 3 ff.). Des Weiteren wurden Lufttemperatur und -feuchte mittels kleiner Lufttemperatursensoren (*iButtons Hygrochron DS1923, maxim integrated*) in unterschiedlichen Höhen (T1: 0,35 m und 1,40 m; T2: 0,65 m und 1,35 m; T4, T5 und T6:

1,30 m) über Grund erfasst. Die Sensoren wurden entlang der zu erwartenden Kaltluftachse installiert (Abb. 3).

Die mittlere Höhe der Kaltluftschicht wurde mittels des Ansatzes von Briggs (1979; VDI-RICHTLINIE 3787 2003, 34) rechnerisch ermittelt:

Dabei sind:

H = mittlere Höhe der Kaltluftschicht

α = Neigung der Fläche

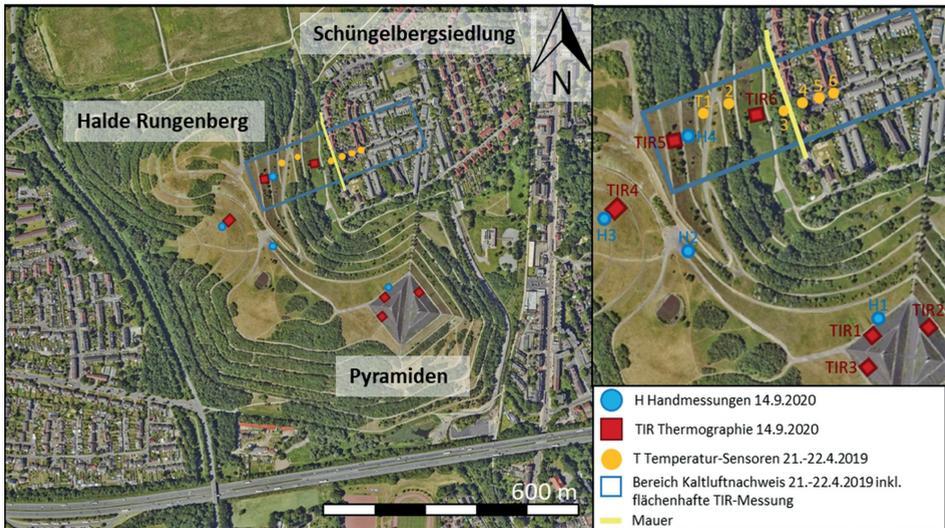


Abb. 3: Luftbild der Halde Runenberg in Gelsenkirchen-Buer, NRW ($51^{\circ}33'N$, $7^{\circ}02'E$) inkl. des Setups der Messkampagnen vom 21.-22.4.2019 sowie vom 14.9.2020. Handmessungen: Lufttemperatur, Windgeschwindigkeit. Projektion: UTM32 (verändert nach: RVR 2021b). Eigene Darstellung.

4 Ergebnisse

4.1 Thermische Muster der Oberflächentemperaturen auf Halden im Ruhrgebiet

4.1.1 Satellitenbildgestützte Analyse

Die mittlere LST aller Halden betrug am 1.4.2019, 10:27 MEZ $15,6^{\circ}C$. Baumbestandene Halden waren mit $14,2^{\circ}C$ deutlich kühler, grasbewachsene und unbewachsene deutlich wärmer ($18,4^{\circ}C$) (Abb. 4). Das nächstwichtige Merkmal zur Trennung unterschiedlich temperierter Hangareale ist die Exposition, sowohl bei den baumbestandenen Flächen als auch beim Offenland. Während die expositionsbedingte Differenz der mittleren LST bei den baumbestandenen Flächen knapp 1,5 Kelvin ($15,3$ zu $13,9^{\circ}C$) beträgt, ist der Unterschied bei den Offenlandflächen mit 2,2 Kelvin ($19,7$ und $17,5^{\circ}C$) größer. Auch die

Unterteilung nach Hangexpositionen unterscheidet sich bei beiden Oberflächentypen: Der Azimutsektor mit den niedrigeren LST umfasst bei den baumbestandenen Flächen 90° (NW bis NE) und beim Offenland 270° (SW über N bis NE). Auf der dritten Klassifikationsebene kommt die Unterscheidung in dunkle unbewachsene Oberflächen und Grasbewuchs zum Tragen. Die jeweils wärmeren Oberflächen besaßen in beiden Expositionsgruppen (Sonnen- und Schattenhang) die dunkle unbewachsene Oberflächen. Die Spannweite der mittleren LST aller sechs durch die CART-Klassifikation gebildeten Gruppen beträgt 6,7 Kelvin, für die am Messtag bewaldeten Schattenhänge (13,9 °C) und die sonnenbeschienenen Hänge mit dunklen unbewachsenen Oberflächen (20,5 °C) die Extreme bilden.

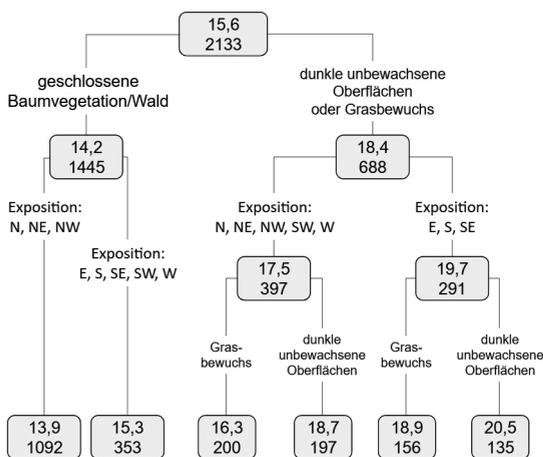


Abb. 4: Gruppierung und Entscheidungsbaum der CART-Analyse. Beziehung zwischen LST und den Attributen Oberflächenart (Bäume, Grasbewuchs, dunkle unbewachsene Oberflächen) und Hangexposition (N, NW, NE, W, E, SW, S, SE) für alle elf ausgewählten Halden. Obere Angabe in Kästen: Mittlere LST, untere Angabe: Anteil der Pixel zur Berechnung der mittleren LST. Eigene Darstellung.

Der Zusammenhang zwischen der LST und Oberflächenbedeckung ohne Differenzierung nach der Exposition (siehe Abb. 5 und Tab. 3) bestätigt die Ergebnisse der CART-Analyse: Flächen mit geschlossener Baumvegetation/Wald zeigen die geringsten LST (14,2 °C), Grasbewuchs mit 17,5 °C höhere und die dunklen unbewachsenen Oberflächen mit knapp 19,5 °C die höchsten LST-Werte. Die größte Standardabweichung sowie die größte Spanne der LST-Werte traten bei den dunklen unbewachsenen Oberflächen auf. Die Unterschiede der Mittelwerte zwischen den Gruppen sind statistisch signifikant (Kruskal-WallisTest, $p < 0,0001$; Wilcoxon-Vergleichstest (paarweise), 95% Konfidenz-Niveau).

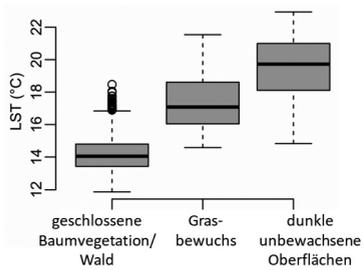


Abb. 5:
Boxplot von LST (°C) mit der Oberflächenbeschaffenheit für elf Halden. Eigene Darstellung.

Tab. 3: Statistische Kennzahlen der Oberflächentemperaturen (LST, in °C), unterschieden nach Oberflächenbedeckung. LST am 1.4.2019, 10:27 MEZ. LST: Infrarot-Kanal Landsat. Auflösung 30 m x 30 m.

| Oberflächenbedeckung | arithmet. Mittel | Median | Standardabweichung | Minimum | Maximum | Spannweite |
|---|------------------|--------|--------------------|---------|---------|------------|
| dunkle unbewachsene Oberflächen | 19,5 | 19,7 | 1,9 | 14,8 | 22,9 | 8,1 |
| Grasbewuchs | 17,5 | 17,1 | 1,8 | 14,6 | 21,5 | 7,0 |
| geschlossene Baumvegetation/Wald | 14,2 | 14,0 | 1,1 | 11,9 | 18,5 | 6,6 |

4.1.2 Räumliche und zeitliche Differenzierung von Oberflächen- und Lufttemperaturen auf der Halde Rungenberg

Zum Überfliegszeitpunkt im April 2019 lässt der Thermalkanal des Satellitenbilds auf der Halde Rungenberg (vormittags) eine ausgeprägte räumliche Differenzierung der Oberflächentemperaturen (LST) erkennen (Abb. 6). Maxima liegen bei 20,3 °C auf der Südflanke der dunklen unbewachsenen Pyramide und Minima bei 13,3 °C an der bewaldeten NW-Flanke der Halden. Die Veränderung der Oberflächentemperaturen über den Tages- und Nachtverlauf ermöglichen die bodengestützten Messungen im September 2020. Bereits um 15:00 MEZ ist die Oberfläche des begrünten ostexponierten Hanges kühler (29,3 °C) als die des Westhangs (37,7 °C) (Abb. 7). Die beiden Hänge mit annähernd gleicher Vegetation und Vegetationsdichte sowie gleichem Substrat zeigen einen Unterschied der Oberflächentemperatur von 8,4 Kelvin. Um 17:45 MEZ ist die Oberflächentemperatur auf beiden Seiten gesunken, dennoch zeigt der Westhang weiterhin höhere Werte.

Die Oberflächentemperaturen des ostexponierten Hangs und des ebenfalls begrünten Haldenfuß im Osten sind mit 24,8 °C bzw. 25,2 °C annähernd gleich. Ab 19:30 MEZ sind nur noch geringe Unterschiede an den drei Standorten zu erkennen. Die Oberflächentemperaturen der Pyramidenstandorte unterscheiden sich um 17:45 MEZ noch sehr stark voneinander: Die höchsten Werte weist der SW-Hang auf (38,7 °C), gefolgt vom NW-Hang (33,4 °C). Die tiefste Oberflächentemperatur zeigt der NE-Hang der Pyramide mit 26,9 °C. Über den Abend gleichen sich die Oberflächentemperaturen der drei Pyramiden-Expositionen an, die des SW-Hanges bleibt bis 21:20 MEZ am höchsten. Abbildung 8 bestätigt die Erkenntnisse für die gesamten Bereiche von SW- und NW-Hang.

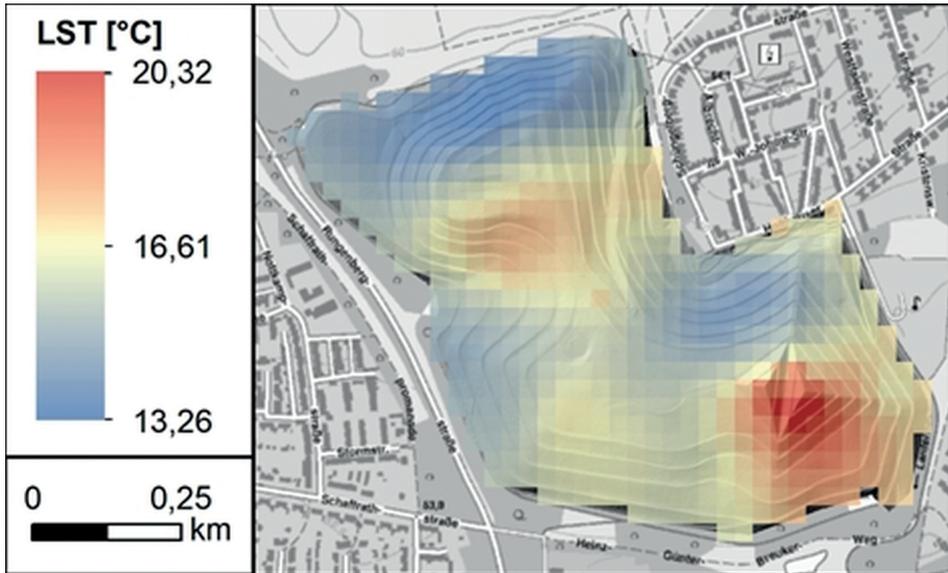


Abb. 6: Oberflächentemperaturen (LST) am 1.4.2019, 10:27 MEZ. LST: Infrarot-Kanal Landsat. Auflösung 30 m x 30 m; Topographie: Geobasis NRW 2022. Eigene Darstellung.

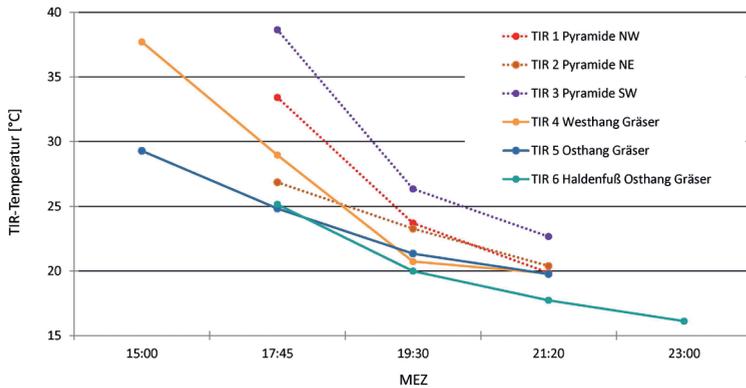


Abb. 7: Oberflächentemperaturen der TIR-Messpunkte TIR₁ – TIR₆ zu fünf Zeitpunkten am 14.9.2020. TIR = Thermal Infrared. Sonnenuntergang um 20:48 MEZ. Zeitachse nicht linear, Uhrzeiten stellen die jeweilige zeitliche Mitte eines Messgangs dar. Die Messflächen TIR₁₋₃ besitzen die Oberflächenart dunkle unbewachsene Oberflächen. Eigene Darstellung.

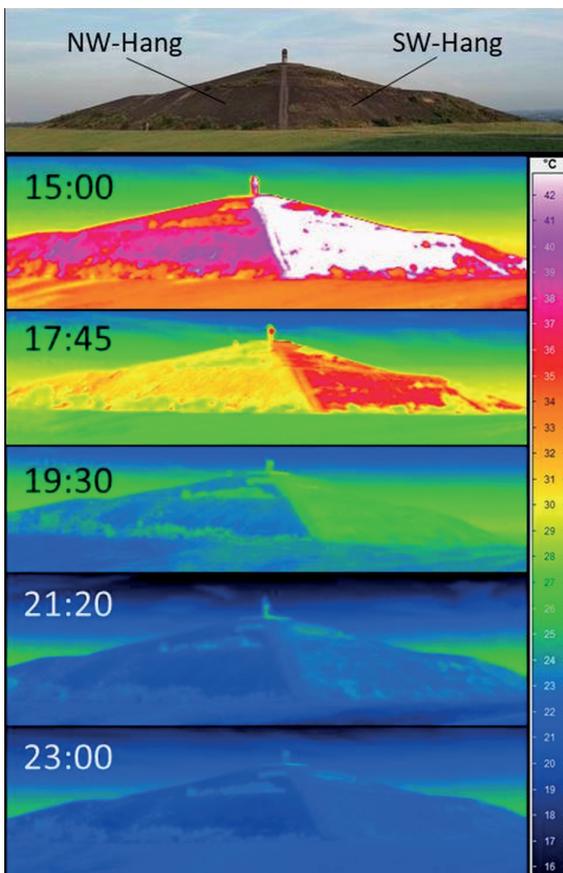


Abb. 8: TIR-Aufnahmen der Pyramidenhänge Nordwest bis Südwest zu fünf Zeitpunkten (MEZ) am 14.9.2020, aufgenommen vom Messpunkt H₂ aus. Dunkelblaue Farbe $T < 16\text{ }^{\circ}\text{C}$, Weiße Bereiche $T > 42\text{ }^{\circ}\text{C}$. Eigene Darstellung.

Die Lufttemperaturen in 2 m und 5 cm über Grund (Abb. 9) zeigen das stets überhöhte Lufttemperaturniveau des Standortes H1 auf der Pyramide. Beide Messhöhen weisen annähernd gleiche Werte auf. Der Ausreißer um 15:00 MEZ dürfte auf eine kurzzeitige Turbulenz zurückzuführen sein. Mit Ausnahme des Standorts ‚Pyramide‘ bilden alle Messstandorte während des Abends eine Bodeninversion aus. Die bodennahe Lufttemperatur ist zwischen 0,5 und 2,9 Kelvin niedriger als die in 2 m gemessene Lufttemperatur.

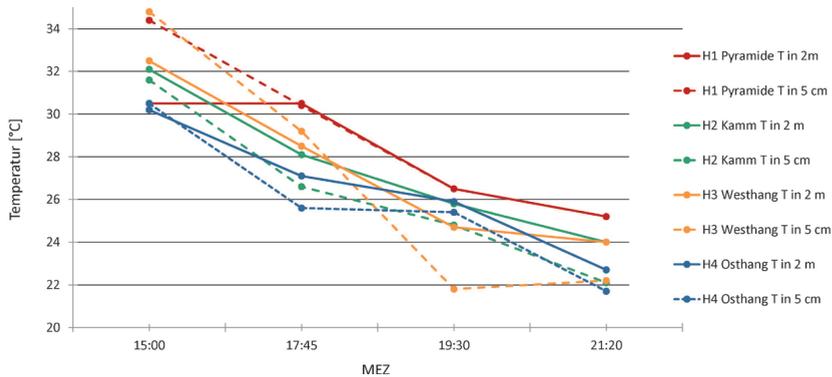


Abb. 9: Lufttemperaturen der Messpunkte H1 – H4 zu vier Zeitpunkten am 14.9.2020. Zeitachse nicht linear, Uhrzeiten stellen die jeweilig zeitliche Mitte eines Messgangs dar. Eigene Darstellung.

4.2 Kaltluftbildung, Kaltluftabfluss und Kühlungspotential der Halde Rungenberg

Am ostexponierten Hang der Halde wird sowohl im oberen Bereich (T_1) als auch am unteren Bereich (T_3) lange vor dem astronomischen Sonnenuntergang (20:35 MEZ) am 21.4.2019 eine Bodeninversion festgestellt: Kurz vor 20:00 MEZ sinken die Lufttemperaturen in geringerer Höhe über Grund (35 cm bei T_1 ; 65 cm bei T_3) unter die Lufttemperatur in größerer Höhe (140 cm bei T_1 ; 135 cm bei T_3) (Abb. 10). Nach 21:09 MEZ fällt am Standort T_3 in beiden Messhöhen ein besonders starkes Absinken der Lufttemperatur auf, ehe diese kühle Phase zwischen 21:49 und 22:16 MEZ durch einen Lufttemperaturanstieg kompensiert wird. Insgesamt nehmen die Lufttemperaturen nach dem Beginn der Bodeninversion bis zum Messende um etwa 8 Kelvin ab.

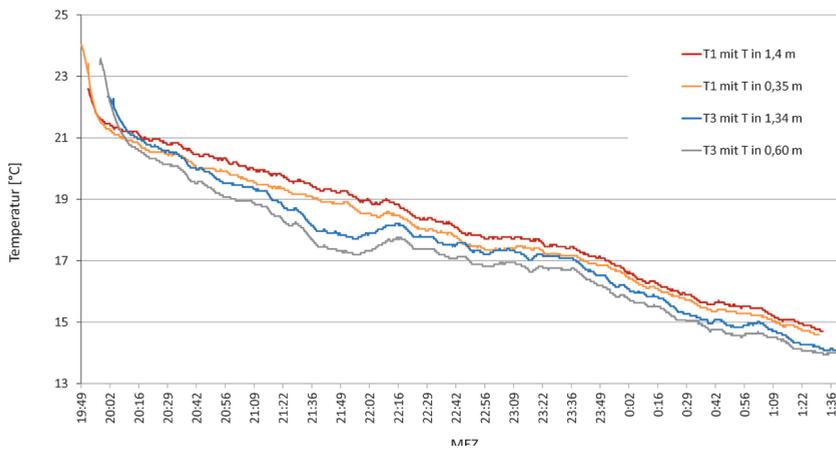


Abb. 10: Lufttemperaturen der Lufttemperatursensoren für den gesamten Messzeitraum vom 21.-22.4.2019. Sonnenuntergang um 20:35 MEZ. Eigene Darstellung.

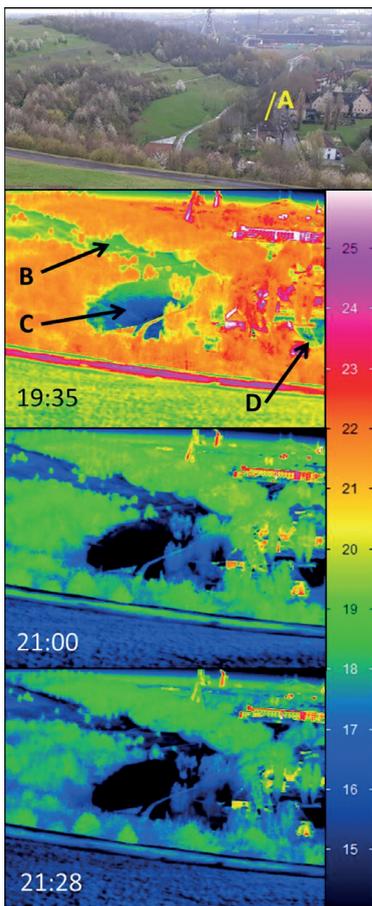


Abb. 11: Foto und TIR-Bilder (Oberflächentemperaturen in °C) des nordöstlichen Teils der Halde Rungenberg inkl. der im Text erwähnten Lage der Mauer (A) und des Hanges der Kaltluftflussmessung (B) für drei ausgewählte Zeitpunkte (MEZ) am 21.4.2019. C markiert die im Text beschriebene Verortung des Kaltluftsees und D die des weiteren Kaltluftentstehungsgebietes im Siedlungsbe- reich. Eigene Darstellung.

Die TIR-Aufnahmen erfassen die Oberflächentemperaturen des gesamten Hanges sowie eines Teils der Schüngelbergsiedlung (Abb. 11). Sie dokumentieren, wie sich die Oberflächen über den Zeitraum von 19:35 MEZ bis 21:28 MEZ abkühlen (Abb. 11). Als erstes zeigen sich die tieferen Oberflächentemperaturen (blaue und grüne Farbtöne) am grasbewachsenen Osthang (B in Abb. 11). Das Minimum der Oberflächentemperaturen wird am Hang- und Haldenfuß erreicht (C in Abb. 11). Die sich ausbreitenden blau gefärbten Areale im vorderen, grasbewachsenen Hangbereich um 19:35 MEZ veranschaulichen die Bildung eines Kaltluftsees. Die Bäume (am 21.4. 2019 bereits komplett belaubt) bleiben am Kronendach relativ warm. Am rechten Bildrand entsteht ab 21:00 MEZ ein davon abgesetztes zweites kaltes Areal, im Bereich der auf dem Luftbild erkennbaren und an die Schüngelbergsiedlung angrenzenden Wiese (D in Abb. 11).

Aus der Berechnung nach Briggs (1979) ergibt sich für die Kaltluft am betrachteten Osthang eine mittlere Mächtigkeit von 1,6 m. Eine Überwärmung der Oberfläche durch erhöhte Temperaturen im Boden (vgl. Kap. 1, BEZIRKSREGIERUNG ARNSBERG 2018, o. S.) wurde an den mittels TIR-Kamera untersuchten Haldenabschnitten nicht detektiert.

5 Diskussion

5.1 Thermische Muster der Oberflächentemperaturen auf Halden im Ruhrgebiet

Die Verteilung der thermischen Muster auf der Halde Runenberg (Abb. 6), die statistisch signifikanten Unterschiede der LST in Abhängigkeit von der Oberflächenbeschaffenheit (Tab. 3) sowie die Ergebnisse der CART-Analyse (Abb. 4) bestätigen allgemein gültige geländeklimatologische Erwartungen (BENDIX 2004) für eine strahlungsklimatisch dominierte Situation an einem Vormittag: Bäume erwärmen sich an der Oberfläche des Kronendaches nicht so stark wie offene Grasflächen und die sich besonders schnell erwärmenden dunklen unbewachsenen Oberflächen. Als Grund wird in der Literatur eine größere Oberflächenrauigkeit genannt, die zu einem höheren turbulenten Wärmefluss und einer höheren Evapotranspiration führt (LEE et al. 2011, DAVIN & DE NOBLET-DUCOUDRÉ 2010). Allerdings bleibt vor dem Hintergrund des frühen Aufnahmezeitpunkts im Jahr (1. April) die niedrigere LST der baumbestandenen Flächen im Vergleich zu denen mit Grasbewuchs bemerkenswert. Trotz insignifikant höherem NDVI (normierter differenzierter Vegetationsindex) der grasbewachsenen Flächen (NDVI = 0,69) im Vergleich zu den baumbestandenen Flächen (NDVI = 0,64) verhält sich die LST signifikant gegensätzlich, sind also die baumbestandenen Oberflächen kühler. Vermutlich gibt hier die höhere Oberflächenrauigkeit den Ausschlag. Bei vollentwickeltem Kronendach wäre die LST-Differenz noch größer und der NDVI der baumbestandenen Flächen höher als der NDVI der Flächen mit Grasbewuchs. Hierarchisch nächstrangig wirkt sich die Exposition aus: Erwartungsgemäß zeigen die west- über süd- bis ostexponierten Hänge die höheren mittleren LST. Die nächste Differenzierungsstufe unterschiedlich temperierter Flächen bildet die Beschaffenheit

der Oberflächen: Die dunklen unbewachsenen Oberflächen weisen im Vergleich zum Grasbewuchs die höheren LST auf. Diese Gliederung gilt für den Aufnahmezeitpunkt 10:27 MEZ. Die kleinräumigen Unterschiede der Albedo zwischen grünen Vegetationsoberflächen und unbewachsenen dunklen Oberflächen bedingen Unterschiede in der Strahlungsabsorption und damit der LST. Die mit 8,1 Kelvin größere Spanne der LST auf dunklen unbewachsenen Oberflächen mag mit dem abschnittsweise vorhandenen Bewuchs mit Flechten, Moosen und einigen Gräsern zusammenhängen. Bezeichnenderweise entspricht die Minimum-LST der dunklen unbewachsenen Oberflächen der des Grasbewuchses. Die Spannen der LST der Oberflächen mit Grasbewuchs sowie mit geschlossener Baumvegetation sind mit 7,0 °C bzw. 6,9 °C recht ähnlich, was sicher mit dem im Jahresverlauf frühen Aufnahmezeitpunkt zusammenhängt.

Die dargestellten, statistisch signifikanten Regelmäßigkeiten erscheinen überraschend klar in Anbetracht der räumlichen Auflösung des Satellitenbildes von 30 m x 30 m und der satellitenbildgestützten Abgrenzung von nur drei Typen der Oberflächenbeschaffenheit. Möglicherweise würde eine höhere räumliche Auflösung der Thermalkanäle ein differenzierteres Bild der LST der beiden Oberflächentypen ergeben. Trotz der relativ geringen Häufigkeiten der nach Oberfläche und Exposition gruppierten Rasterzellen (Tab. 2) resultieren plausible und signifikante Zusammenhänge. Zu den Stärken der CART-Modelle gehört, dass sie mit Multikollinearität und nicht normal verteilten Daten erlauben, die dargestellte Analyse durchzuführen, weil sie die Daten auf der Grundlage der Werte der erklärenden Variablen rekursiv in homogenere Gruppen aufteilen. Während andere Modelle möglicherweise eine bessere Vorhersagekraft haben, ermöglichen CARTs die einfache Interpretation nichtlinearer und hierarchischer Beziehungen, was ein Ziel dieser Arbeit war.

Bei fortgesetzter Einstrahlung und im Tagesverlauf wanderndem Sonnenstand würde eine andere thermische Klassifizierung der Hänge resultieren. Diese Veränderung veranschaulicht Abbildung 8 für die Halde Rungenberg. Die dunklen unbewachsenen Oberflächen im Bereich der Pyramiden stellen damit hot spots dar, die bis in den späten Abend bestehen bleiben.

Die bodengestützte Messung bestätigt die zu erwartenden thermischen Muster der Oberflächentemperaturen in Abhängigkeit von Tageszeit, Hangexposition und Beschattung (Abb. 7). Die Oberflächentemperaturen der grasbewachsenen Hänge gleichen sich im Laufe des Abends an, bis ab 19:30 MEZ nur noch geringe Unterschiede der Oberflächentemperaturen zu erkennen sind. Dass die Oberflächentemperaturen am Haldenfuß bereits um 19:30 MEZ geringste Werte aufweisen und im Gegensatz zu den anderen Standorten eine verstärkte Abkühlung im weiteren Verlauf des Abends stattfindet, ist ein Indiz für den an diesem Standort entstehenden Kaltluftsee. Die hier gemessenen niedrigsten Oberflächentemperaturen sind darauf zurückzuführen, dass die Fläche selbst Kaltluft produziert und zusätzlich Kaltluft vom Hang anströmt und sich dort sammelt. Die vegetationsfreien Oberflächen mit dunklen unbewachsenen Oberflächen kühlen zwar nur langsam aus, sie passen sich aber nach einigen Stunden den Oberflächentemperaturen der Hänge an, wie TIR₁ und TIR₂ gegen 21:30 MEZ belegen (Abb. 7 und 8). Die SW-Seite allerdings erhielt aufgrund der Abendsonne noch so viel

Strahlungsinput, sodass sie über diesen Zeitpunkt hinaus überwärmt ist. Solange diese Bereiche überwärmt sind, werden sie zur Kaltluftproduktion nicht beitragen.

5.2 Kaltluftbildung, Kaltluftabfluss und Kühlungspotential der Halde Rungenberg

Kaltluftabfluss und Kaltluftsee

Die Lufttemperaturmessungen (Abb. 9) ergaben, dass sich auf der Pyramide am Messtag 14.9.2020 eine Bodeninversion allenfalls nach 21:20 MEZ ausbildet. Somit wurde auf diesem Bereich der Halde im vorausgegangenen Messzeitraum keine Kaltluft produziert. Einen ähnlichen Effekt dürften die Warmbereiche brennender Halden besitzen. Wie weit sie bei gleichen Oberflächenbedingungen (Relief und Oberflächenbedeckung) die Kaltluftproduktion verlangsamen, kann erst geklärt werden, wenn in späteren Analysen die Warmbereiche den Analysen zur Kaltluft räumlich überlagert werden. Die LST der Satellitenmessungen geben keine Hinweise auf Warmbereiche an der Oberfläche zur Vormittagssituation und die in situ-Oberflächentemperatur-Messungen während der nächtlichen Abkühlung ebenfalls nicht.

An allen anderen Standorten zeigen sich erwartbare Lufttemperatur-Verteilungen mit bodennahen Inversionen. Die Höhe der Inversionsgrenze an den einzelnen Standorten H1-H4 ist bei dem vorliegenden Mess-Setup nicht festzustellen. Die bodennahe Inversion ist der Indikator für Kaltluftbildung. Der Nachweis für den Kaltluftfluss ist die hangabwärts gerichtete bodennahe Strömung mit sehr geringen Windgeschwindigkeiten von < 1 m/s, die an diesem Tag um 19:30 MEZ am Westhang und um 21:20 MEZ am west- und ostexponierten Hang gemessen wurden. Damit steht in Einklang, dass während des gesamten Messzeitraums an den beiden Standorten T1 und T3 (Abb. 10) eine Bodeninversion vorlag.

Die Lufttemperaturschwankungen an allen vier Sensoren am Osthang in den zwei Messhöhen an T1 und T3 (Abb. 10) deuten auf das Abfließen, das Vorbeiströmen kleinerer Kaltluftpakete im Messzeitraum 21./22.4.2019 hin. Das passt zur Messung der Logger, die ab etwa 20:16 MEZ eine Inversion bis über die maximale Messhöhe von 1,40 m hinaus erfassten (Abb. 10). Es ist davon auszugehen, dass zum Zeitpunkt des maximalen Kaltluftflusses die Mächtigkeit der Kaltluftschicht größer war als der nach Briggs (1979) berechnete mittlere Wert von 1,6 m.

Der auffällige Verlauf der Lufttemperaturkurven am Standort T3 nach 21:09 MEZ lässt sich mit den Eigenschaften des Kaltluftsees am Haldenfuß (Standort T3) begründen. Die Lufttemperaturen sinken an dieser Stelle recht schnell unter die des Standortes am Oberhang. Am Haldenfuß bildet sich durch vermehrt einfließende Kaltluft im Verlauf des Abends ein Kaltluftsee aus, der im Zeitraum zwischen 21:20 MEZ und 22:00 MEZ stabil ist. Die Lufttemperaturunterschiede zum oberen Hangbereich und zwischen den beiden Messhöhen an T3 nehmen zu. Bei extrem gering turbulenter Situation schichtet sich die Kaltluft innerhalb des Kaltluftsees mit nochmals relativ tieferen Lufttemperaturen nahe am Boden, ein Phänomen, das auch andernorts beobachtet wurde (u. a. GRUDZIELANEK 2013, 103 ff.).

Kaltluftstau und klimatische Ausgleichsfunktion

Hindernisse in Kaltluftabflussbahnen können den thermischen Ausgleich unterbinden oder abschwächen. Mulden und Täler halten die Kaltluft durch die Schwerkraft an Ort und Stelle. Unter diesem Aspekt sind die Prozesse am Hangfuß im Übergang zu der Siedlung Schüngelberg zu betrachten. Die Kaltluft am Hangfuß kann nicht abströmen und bildet kurz nach dem Beginn der Kaltluftproduktion einen Kaltluftsee (Abb. 11 und 12a)), bezogen auf den Sonnenstand im Monat April. Die Kaltluft sammelt sich in der Mulde westlich der Mauer (siehe Punkt C in Abb. 11), zudem stellen Bäume und Mauer Strömungshindernisse dar. Der Kaltluftsee füllt sich, erkennbar ist dies an den relativ tieferen Oberflächentemperaturen am Hangfuß (Abb. 11).

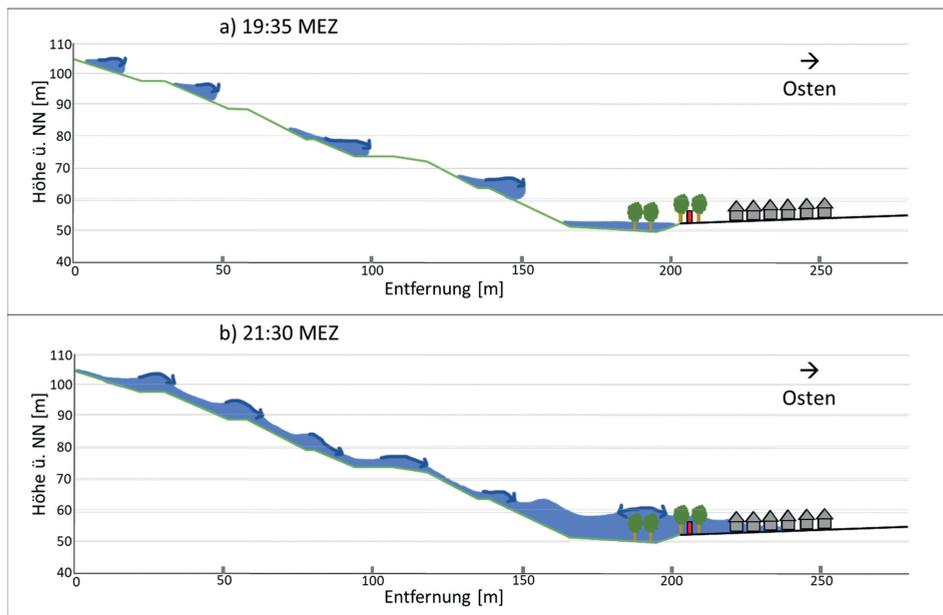


Abb. 12: Schematische Skizze zweier Kaltluftsituationen am nordöstlichen Hang der Halde Rungenberg um a) 19:35 MEZ und b) 21:35 MEZ am 21.4.2019. In Blau sind Kaltluftpakete, Kaltluftflussrichtung (Pfeile) und Kaltluftakkumulation dargestellt. Die im Text erwähnte Mauer ist in Rot dargestellt. Höhenangaben und Entfernungen längentreu. Eigene Darstellung.

Die Wiese in der Schüngelbergsiedlung produziert ebenfalls Kaltluft (siehe Punkt D in Abb. 11). Um 21:00 MEZ weist ihre Oberflächentemperatur ähnlich tiefe Werte wie der Kaltluftsee auf. Dieses kalte Wiesenareal ist räumlich vom Kaltluftsee getrennt. Die 3,5 m hohe Mauer (siehe Abb. 2 und Punkt A in Abb. 11) stellt zunächst ein Strömungshindernis dar. Die einzelstehenden belaubten Bäume geben als annähernd vertikales Oberflächentemperatur-Profil einen Hinweis auf das Niveau der Bodeninversionsgrenze. So stehen um 21:28 MEZ auch die Gipfel der Baumkronen der die Mauer überragenden Bäume komplett in der Kaltluft (Bäume zwischen Punkten C und D in Abb. 11, Abb. 12b). Die nach Briggs (1979) berechnete Kaltluftmächtigkeit (1,6 m) ist ein Mittelwert

über die gesamte Hanglänge und berücksichtigt keine Akkumulation durch Stau. Es ist realistisch, anzunehmen, dass die Akkumulation der Kaltluft hinter dem stauenden Hindernis einen Kaltluftsee von > 3,5 m Mächtigkeit hat entstehen lassen, aus dem die Kaltluft über die 3,5 m hohen Mauer abgeflossen ist. Die Lufttemperaturmessungen an den Messpunkten T4-6 untermauern diese Interpretation. Die Kaltluft ist in die Straße der Schüngelbergsiedlung vorgedrungen. Die Eindringtiefe der kühlenden Luft war gering und die kühlende Wirkung schwach: am Messpunkt T4 um 2 Kelvin, an den Messpunkten T5 und T6 um 0,8 Kelvin. Die Messdaten erlauben keine Klärung, ob der Kaltluftsee entweder langsam mächtig genug wurde, sodass die Kaltluft langsam über die Mauer floss, oder ob ein großes, vom Hang in den See einfließendes Kaltluftpaket dem Kaltluftsee einen Bewegungsimpuls zum *sloshing* („Schwappen“) gab (LEHNER et al. 2016, 233). Würde die Mauer am Fuß des nordöstlichen Hanges der Halde Runenberg entfernt oder durch einen luftdurchlässigen Zaun ersetzt, würde die Kühlwirkung der Halde auf die Schüngelbergsiedlung an Intensität und Reichweite zunehmen.

6 Fazit: Cold spots oder hot spots?

Beides stimmt! Halden stellen *cold spots* wegen des nachgewiesenen Kaltluftfluss und des Kühlungspotentials für ihre Umgebung dar. Als *hot spots* zeigen sie sich, weil die Kaltluft von den Gipfeln abfließt und/oder Bereiche mit dunklen vegetationsarmen Oberflächen vorhanden sind, die sich verstärkt aufheizen und die Wärme relativ lange in den Abend oder bis in die Nacht hinein speichern.

Diese Arbeit bestätigte, dass für Halden grundsätzlich gleiche Annahmen in Bezug auf die thermischen Muster gelten wie für andere Vollformen bzw. gegliedertes Gelände mit differenzierter Bodenbedeckung und Hang-Exposition. Voraussetzung für die Kaltluftproduktion bei Strahlungswetterlagen ist die Existenz ausreichend großer Plateauflächen oder gering geneigter Hänge in West-, Nord-, oder Ost-Exposition mit möglichst kurz gehaltener Grasbedeckung, die sich tagsüber während Strahlungswetterlagen nicht stark aufheizen. Sonnenexponierte Hänge haben demgegenüber einen Standortnachteil, weil bei nächtlicher Ausstrahlung zunächst die stärkere Aufheizung kompensiert werden muss. Gleiches gilt für dunkle Haldenoberflächen, wie Teilflächen der Halde Runenberg exemplarisch zeigen. Sie sind auf den Halden warme Inseln. Je nach Material und seinen Eigenschaften sowie Hangneigung variieren die Intensität und die Dauer der Überwärmung zwischen den Halden individuell. Unter Berücksichtigung dieser Unterschiede lässt sich diese Erkenntnis auf alle Halden mit entsprechenden dunklen und vegetationsfreien Oberflächen übertragen.

Klimatische Ausgleichwirkungen können die Kaltluftproduktionsräume nur entfalten, wenn die Kaltluft abfließen kann. Unsere Messungen bestätigen, dass stark geneigte Hänge von Halden mit kurz gehaltener Grasdecke hierfür geeignet sind. Sie belegen auch, dass selbst relativ kleine Hindernisse, wie 3 m hohe Mauern, die Kaltluft stauen und sie im günstigen Fall umlenken, wenn die Kaltluftbahn nicht vollständig blockiert ist.

Auch wenn jede Halde mit ihren eigenen physikalischen Strahlungseigenschaften eine individuelle Kaltluftproduktionsrate aufweist, zeigt unsere Analyse klar, dass den Bergehalden im Ruhrgebiet durchaus eine wichtige Rolle für eine klimatische Ausgleichsfunktion zugesprochen werden kann. Daher ist im Grundsatz die Zuordnung von Halden zu Geländeformen mit Kaltluftproduktion und -fluss in einschlägigen Fachbeiträgen für die Planung (LANUV 2018, 41; RVR 2021a) gerechtfertigt. Allerdings wäre an jeder einzelnen Halde zu prüfen, ob die Haldenhänge günstig ausgerichtet sind, und vor allem im Haldenfußbereich muss geklärt werden, ob die Bedingung für eine Kaltluftakkumulation ausreichen. Und schließlich erfüllt die Kaltluft ihre besonders erwünschte Wirkung besonders dann, wenn sie in eine Wohnsiedlung übertreten kann.

Unsere Ergebnisse erlauben weitergehende Schlussfolgerungen für die Beurteilung und Planung von Halden und ähnlichen Aufschüttungen (z. B. Hochdeponien) in urbanen Landschaften unter dem Aspekt ihrer klimatischen Ausgleichsfunktion. So wird es möglich sein, die in Klimawandel-Anpassungskonzepten und Stadtklimaanalysen bereits enthaltenen Einschätzungen von Halden (z. B. KUTTLER et al. 2012; STEINRÜCKE et al. 2012) und ihrem städtischen Umfeld zu differenzieren und zu konkretisieren. Statt den Halden insgesamt ein „Haldenklimatop“ zuzuweisen, ist es nun möglich, einzelne geländeklimatologisch unterschiedliche Teilbereiche von Halden zu lokalisieren. Dies sind zum Beispiel die in KUTTLER et al. (2012, 42) in allgemeiner Form angesprochenen Hangfußbereiche als Luftleitbahnen mit einer Vernetzung zu klimatischen Last- und Ungunsträumen. Für die zukünftige Gestaltung von Halden und Deponien, die vor dem Abschluss stehen, erlauben unsere Erkenntnisse Hinweise auf Kubaturen und Oberflächenbedeckungen, die für einen thermischen Ausgleich und für die thermische Entlastung für die Umgebung von Halden förderlich sind. Die Pflegekonzepte existierender Halden wären unter geländeklimatologischen Gesichtspunkten zu prüfen.

Zahlreiche Halden im Ruhrgebiet liegen nicht benachbart zu dichter Wohnbebauung, sodass ihre Kühlwirkung auf die Umgebung u.U. als nicht relevant angesehen werden könnte. In Hinblick auf die weitere Klimaerwärmung und die projizierte Zunahme der städtischen Wärmeinsel (Ausdehnung und Intensität) kann die direkte Haldenumgebung für die Ausweisung zukünftiger Baugebiete mit größerer Klima-Resilienz höchst interessant werden.

Literatur

- BENDIX, J. 2004: Geländeklimatologie. Berlin, Stuttgart.
- BERKE, W. 2016: Über alle Berge. Haldenführer Ruhrgebiet 2.0. Essen.
- BEZIRKSREGIERUNG ARNSBERG 2018: Brennende Bergehalden. Antwort auf Nachfrage durch BUND NRW vom 8.8.2018. URL: https://www.bund-nrw.de/fileadmin/nrw/dokumente/Energie_und_Klima/2018_o8_28_Antwort_auf_Anfrage_BUND_zu_brennenden_Bergehalden_web.pdf (letzter Zugriff 26.01.2023).
- BREIMANN, L., J. H. FRIEDMAN, R. A. OLSHEN & C. J. STONE 1984: CART: Classification and Regression Trees. Belmont (Wadsworth).
- BREIMANN, L. 1996: Bagging predictors. In: Machine Learning 24, S. 123-140.
- BRIGGS, G. A. 1979: Analytic modelling of drainage flows. Washington.
- DAVIN, E.L. & N. DE NOBLET-DUCOUDRÉ 2010: Climatic impact of global-scale deforestation: radiative versus nonradiative processes. In: Journal of Climate 23 (1): 97-112.
- DORNINGER, M., C.D. WHITEMAN, B. BICA, S. EISENBACH, B. POSPICHAL & R. STEINACKER 2011: Meteorological events affecting cold-air pools in a small basin. In: Journal of Applied Meteorology and Climatology. 50, 11, S. 2223-2234.
- FOKEN, T. 2006: Angewandte Meteorologie. Mikrometeorologische Methoden. 2. Aufl. Heidelberg, Berlin.
- GEIGER, R. 1942: Das Klima der bodennahen Luftschicht. 2. Auflage. Wiesbaden.
- GEOBASIS NRW (2022): Digitale topographische Karte (S/W). <https://www.tim-online.nrw.de/tim-online2/> 28.12.2022)
- GRUDZIELANEK, A. M. 2013: Thermographische Erfassung und Analyse katabatischer Strömungen. Doktorarbeit, Ruhr-Universität Bochum. URL: <https://hss-opus.ub.ruhr-uni-bochum.de/opus4/frontdoor/index/index/docId/3721> (letzter Zugriff 26.01.2023).
- GRUDZIELANEK, A. M. & CERMAK, J. 2015: Capturing cold-air flow using thermal imaging. In: *Boundary-Layer Meteorology*. 157, S. 321-332.
- GRUDZIELANEK, A. M. & CERMAK, J. 2018: Temporal patterns and vertical temperature gradients in micro-scale drainage flow observed using thermal imaging. In: *Atmosphere*. 9, 12, S. 498.
- HELLMANN, S. 2018: Die Halde Rungenberg in Gelsenkirchen. URL: <https://www.halden.ruhr/halde-rungenberg.html> (letzter Zugriff 26.01.2023).
- HOBERT, M. & SCHÄPEL, C. 1986: Klimatische Untersuchungen an Bergehalden im Ruhrgebiet. In: Arbeitshefte Ruhrgebiet 30. Essen
- KOMMISSION REINHALTUNG DER LUFT IM VDI UND DIN - NORMENAUSSCHUSS KRDL (2003): VDI-RICHTLINIE 3787 2003. Umweltmeteorologie - Lokale Kaltluft, Berlin. Beuth Verlag GmbH.
- KUTTLER, W., M. MERSMANN & A.-B. BARLAG 2011: Gesamtstädtische Klimaanalyse Gelsenkirchen. Darstellung und Bewertung der klimatischen und lufthygienischen Situation unter zusätzlicher Berücksichtigung des globalen Klimawandels - Abschlussbericht. Durchgeführt im Auftrag der Stadt Gelsenkirchen, Referat Umwelt. URL: https://www.gelsenkirchen.de/de/infrastruktur/umwelt/klima/stadtklima/_doc/stadtklimaanalyse_ge_2011_abschlussbericht_optimiert.pdf (letzter Zugriff 26.01.2023).
- KUTTLER, W., D. DÜTEMAYER & A.-B. BARLAG 2012: Erstellung eines Konzeptes zur städtebaulichen Anpassung an den Klimawandel in Gelsenkirchen. Stufe III: Handlungsstrategien und Maßnahmenkatalog zur Mitigation und Adaptation möglicher Auswirkungen des Klimawandels auf das Stadtklima Gelsenkirchens. Durchgeführt im Auftrag der Stadt Gelsenkirchen, Referat Umwelt. URL: https://www.gelsenkirchen.de/de/infrastruktur/umwelt/klima/klimawandel/_doc/handlungsleitfaeden_klimaanpassung_webopt.pdf (letzter Zugriff 26.01.2023).
- LANUV NRW (Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen) (Hg.) 2016: Klimawandel und Klimafolgen in Nordrhein-Westfalen: Ergebnisse aus den Monitoringprogrammen 2016. Stand April 2017. LANUV-Fachberichte 74. Recklinghausen.

- LANUV NRW (Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen) (Hg.) 2018: Klimaanalyse Nordrhein-Westfalen. LANUV-Fachberichte 86. Recklinghausen.
- LAREAU, N. P. & J. D. HOREL 2015: Dynamically induced displacements of a persistent cold-air pool. In: *Boundary-Layer Meteorology*. 154, S. 291–316.
- LEHNER, M., C.D. WHITEMAN, S.W. HOCH, E.T. CROSMAN, M.E. JEGNUM, N.W. CHERUKURU, R. CALHOUN, B. ADLER, N. KALTHOFF, R. ROTUNNO, T.W. HORST, S. SEMMER, W.O.J. BROWN, S.P. ONCLEY, R. VOGT, A.M. GRUDZIELANEK, J. CERMAK, N.J. FONTEYNE, C. BERNHOFER, A. PITACCO & P. KLEIN 2016: The METCRAX II field experiment - A study of downslope windstorm-type flows in Arizona's Meteor Crater. In: *Bulletin of the American Meteorological Society*. 97, 2, S. 217–235.
- LEE, X., M.L. GOULDEN, D.Y. HOLLINGER, A. BARR, T.A. BLACK, G. BOHRER, R. BRACHO, B. DRAKE, A. GOLDSTEIN, L. GU, G. KATUL, T. KOLB, B.L. LAW, H. MARGOLIS, T. MEYERS, R. MONSON, W. MUNGER, R. OREN, U. KYAW THA PAW, A.D. RICHARDSON, H.P. SCHMID, R. STAEBLER, S. WOFYSY & L. ZHAO (2011): Observed increase in local cooling effect of deforestation at higher latitudes. *Nature* 479: 384–387.
- LEMOINE-RODRÍGUEZ, R. & J.-F. MAS 2020. LSTtools: An R package to process thermal data derived from Landsat and MODIS images. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.4010732> (letzter Zugriff 26.01.2023).
- MKULNV (Ministerium für Klimaschutz Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen) 2011: Handbuch Stadtklima. Maßnahmen und Handlungskonzepte für Städte und Ballungsräume zur Anpassung an den Klimawandel, Düsseldorf.
- OKE, T. 1987: *Boundary layer climates*. 2. Aufl. Methuen, London, New York.
- R CORE TEAM 2020: R: A language and environment for statistical computing. Vienna
- RVR (REGIONALVERBAND RUHR) (Hg.) 2013: Fachbeitrag zum Regionalplan der Metropole Ruhr „Klimaanpassung“. URL: https://www.rvr.ruhr/fileadmin/user_upload/01_RVR_Home/02_Themen/Regionalplanung_Entwicklung/Regionalplan_Ruhr/04_Fachbeitraege/Fachbeitrag_Klimaanpassung.pdf (letzter Zugriff 26.01.2023).
- RVR (REGIONALVERBAND RUHR) (Hg.) 2021a: Klimakarten. Geobasis NRW 2016. URL: <https://klima.geoportal.ruhr/> (letzter Zugriff 26.01.2023)
- RVR (REGIONALVERBAND RUHR) (Hg.) 2021b: Luftbild der Halde Rungenberg in Gelsenkirchen aus dem Jahr 2020. URL: <https://luftbilder.geoportal.ruhr/> (letzter Zugriff 26.01.2023)
- SCHIRMER, H., W. KUTTLER, J. LOBEL & K. WEBER (2013): *Lufthygiene und Klima: Ein Handbuch zur Stadt- und Regionalplanung*. Herausgegeben von der Kommission Reinhaltung der Luft im VDI und DIN. Berlin, Heidelberg.
- STEINRÜCKE, M. (2012): *Klimaanpassungskonzept der Stadt Bochum*. Bochum. URL: <https://geodatenportal.bochum.de/bogeo/web/61/doku/klimaanpassungskonzept.pdf> (letzter Zugriff 26.01.2023)
- USGS. (2019): *Landsat 8 data users handbook version 4*. USGS Earth Resources Observation and Science (EROS). Sioux Falls, South Dakota. USA. 106.
- WHITEMAN, C. D., S.W. HOCH, M. LEHNER & T. HAIDEN 2010: Nocturnal cold-air intrusions into a closed basin: Observational evidence and conceptual model. In: *Journal of Applied Meteorology and Climatology*. 49, 9, S. 1894–1905.

Autor*innen

DR. ANJA MARTINA GRUDZIELANEK

Geographisches Institut der Ruhr-Universität Bochum, Lehrstuhl Landschaftsökologie und Biogeographie, Universitätsstr. 150, 44801 Bochum, martina.grudzielanek@rub.de

DR. RICHARD LEMOINE-RODRIGUEZ

Geolinguual Studies, Julius-Maximilians-Universität Würzburg (JMU), Am Hubland 97074, Würzburg
Deutsches Fernerkundungsdatenzentrum, Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), 82234, Oberpfaffenhofen
richard.lemoine-rodriguez@uni-wuerzburg.de

PATRICIA GLOCKE

Geographisches Institut der Ruhr-Universität Bochum, Lehrstuhl Landschaftsökologie und Biogeographie, Universitätsstr. 150, 44801 Bochum, patricia.glocke@rub.de

DR. TOBIAS SCHOLZ

Geographisches Institut der Ruhr-Universität Bochum, Lehrstuhl Landschaftsökologie und Biogeographie, Universitätsstr. 150, 44801 Bochum, tobias.Scholz-ksi@ruhr-uni-bochum.de

PROF. DR. HARALD ZEPP

Geographisches Institut der Ruhr-Universität Bochum, Lehrstuhl Angewandte Physische Geographie, Universitätsstr. 150, 44801 Bochum, harald.zepp@rub.de