

Weiterführende Untersuchungen zur Hitzeindringung bei Waldbränden in den Boden und deren Auswirkungen auf Explosivstoffe

Eine Studie für das Niedersächsische Landesamt für Bau und Liegenschaften
Leitstelle des Bundes für Kampfmittelräumung
Waterloostraße 4
30169 Hannover
Kontakt: Dr. H. Preetz

angefertigt von

Prof. Dr. H. Borg
Naturwissenschaftliche Fakultät III
Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg
06099 Halle/Saale

Mai 2024

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	IV
1. Einleitung	1
1.1 Hintergrund	1
1.2 Bisherige Arbeiten	1
2. Weiterführende Untersuchungen	4
2.1 Vergleich von Berechnungen mit dem vorhandenen eindimensionalen (1D) Computerprogramm und Messwerten aus einem Brandversuch	4
2.2 Schreiben eines Computerprogramms zur Berechnung der dreidimensionalen (3D) Wärmeausbreitung in einem Boden	4
2.3 Modellrechnungen zur Wärmeausbreitung im Boden mit dem hier auszuarbeitenden 3D-Computerprogramm unter einem flächenhaften (Wald)Brand an der Bodenoberfläche in Kombination mit einem Schwelbrand in einer Wurzel bzw. einem Wurzelstock	6
3. Ergebnisse	7
3.1 Vergleich von Berechnungen mit dem vorhandenen 1D-Computerprogramm und Messwerten aus einem Brandversuch	7
3.1.1 Kurze Beschreibung des Brandversuchs	7
3.1.2 Kurze Beschreibung der Berechnungen	9
3.1.3 Vergleichsrechnungen	11
3.1.4 Fazit	17
3.2 Computerprogramm zur Berechnung der dreidimensionalen Wärmeausbreitung in einem Boden	19
3.2.1 Herleitung der relevanten Gleichungen	19
3.2.2 Kurze Beschreibung des Lösungswegs	26
3.3 Modellrechnungen zur Wärmeausbreitung in einem Boden mit dem 3D-Computerprogramm aus Kapitel 3.2 unter einem flächenhaften (Wald)Brand an der Bodenoberfläche in Kombination mit einem Wurzelbrand im Boden	28
3.3.1 Modellaufbau	28
3.3.2 Ergebnisse	32
3.3.3 Bedeutung der Berechnungsergebnisse für das Risiko einer Explosion von Munition	41
3.4 Modellrechnungen zur Wärmeausbreitung in einem Boden mit dem 3D-Computerprogramm aus Kapitel 3.2 unter einem flächenhaften (Wald)Brand an der Bodenoberfläche in Kombination mit dem Brand eines Wurzelstocks im Boden	45
3.4.1 Modellaufbau	45
3.4.2 Ergebnisse	46

3.4.3 Bedeutung der Berechnungsergebnisse für das Risiko einer Explosion von Munition	55
4. Literaturverzeichnis	56
Anhang	
1 Verteilung der Segmentdicken im Bodenprofil für die Berechnungen in Kapitel 3.1.3 sowie die D_{th} -Werte, mit denen die Ergebnisse in den dortigen Abbildungen 4 bis 6 erzielt wurden	57
2 Thermische Diffusivität	58
3 Beispielhafte Darstellung der horizontalen Temperaturverteilung in einer Bodenschicht unter den Bedingungen der Modellrechnungen in Kapitel 3.3.1	63
4 Beispielhafte Darstellung der horizontalen Temperaturverteilung in einer Bodenschicht unter den Bedingungen der Modellrechnungen in Kapitel 3.4.1	64

Zusammenfassung

In einer vorangegangenen Studie wurde mithilfe eines eigens dafür geschriebenen Computerprogramms zur eindimensionalen (hier vertikalen) Wärmeausbreitung in einem Boden untersucht, wie tief die bei einem Waldbrand generierte Wärme in den Boden eindringt bzw. bis in welche Tiefe Temperaturen erreicht werden, die im Boden befindliche Munition zur Explosion bringen kann. Als kritische Temperatur wurden 140°C angesetzt, weil das die niedrigste Zündtemperatur unter den gängigen Sprengstoffen ist. Die Studie zeigt, dass selbst bei einem sehr heißen Waldbrand (800°C) mit langer Verweildauer an einer Stelle (1 Stunde) die größte Tiefe, in der eine Temperatur von 140°C erreicht wird, nur 13 cm beträgt.

Bevor man ein neues Computerprogramm anwendet, sollte durch einen Vergleich von damit berechneten und gemessenen Werten überprüft werden, wie gut es funktioniert. Dafür geeignete Daten waren zunächst nicht verfügbar, wurden aber vor kurzem im Rahmen einer Bachelorarbeit erhoben. Mithilfe dieser Daten konnte gezeigt werden, dass das o.g. 1D-Computerprogramm gemessene Daten gut nachvollziehen kann und daher für worst-case- und andere Simulationsrechnungen vernünftige Ergebnisse liefert.

Bei einem großflächigen Waldbrand findet die Wärmeausbreitung (außer am Rand des Brandgebiets) nur vertikal in die Tiefe statt, so dass eine eindimensionale Betrachtung ausreicht. Nun kann ein Waldbrand einen Schwelbrand in einer Wurzel auslösen, der sich dann in die Tiefe ausbreitet. Von den Wurzeln wird Wärme dann lateral, an deren unteren Ende auch noch vertikal, an den umliegenden Boden abgegeben. Dadurch können auch in Tiefen jenseits der o.g. 13 cm, je nach Länge der Wurzeln, Temperaturen $> 140^{\circ}\text{C}$ auftreten. Um das zu simulieren, braucht man ein dreidimensionales (3D) Wärmetransportprogramm, das als Bestandteil der Arbeiten hier geschrieben wurde.

Leider gibt es bisher keine gemessenen Daten mit denen man Berechnungsergebnisse aus diesem 3D-Programm vergleichen könnte. Man kann aber davon ausgehen, dass es grundsätzlich richtige Ergebnisse liefert, weil es einerseits auf dem 1D-Programm aufbaut, für das das nachgewiesen wurde, und andererseits die Physik der Wärmeausbreitung in Böden bestens erforscht, ebenso wie deren mathematische Beschreibung.

Mit dem 3D-Programm wurden Berechnungen zur Wärmeausbreitung im Boden unter einem flächenhaften (Wald)Brand an der Bodenoberfläche in Kombination mit einem Schwelbrand in einer Wurzel durchgeführt. Für die Temperatur des Waldbrands wurden wieder 800°C verwendet und für dessen Verweildauer an einer Stelle 1 Stunde. Für den Wurzelbrand wurden 500°C angesetzt, als Wurzellänge 1 m bei einer Dicke von 4 cm. Die Branddauer wurde hier über den Verlust der in der Wurzel gespeicherten Energie ermittelt und betrug 2 Stunden und 10 Minuten.

Die Ergebnisse zeigen, dass im oberen Teil des Bodenprofils die Wirkung des Oberflächenbrands durch den Wurzelbrand etwas verstärkt wird. Wesentlicher ist aber, dass durch den Brand der Wurzel bis zu einem Abstand von bis zu 6 cm um sie herum und entlang ihres ganzen Verlaufs eine Zone entsteht, in der 140°C erreicht bzw. überschritten werden. Bis 4 cm unterhalb der Wurzel werden ebenfalls 140°C erreicht. Es kann also nicht ausgeschlossen werden, dass Munition, die dicht an einer Wurzel liegt oder um die eine Wurzel herum gewachsen ist, explodiert, wenn diese Wurzel in Brand gerät. Die Wahrscheinlichkeit, dass das eintritt ist vermutlich nicht sehr hoch, aber eben nicht Null. Es sei noch angemerkt, dass man bei Betrachtung einer längeren Wurzel zum gleichen Ergebnis kommt, allerdings bis in eine größere Tiefe.

Die Berechnungen wurden noch einmal mit einer Temperatur von 250°C für den Wurzelbrand aber sonst gleichen Bedingungen durchgeführt, weil es möglich erschien, dass bei einer geringeren Brandtemperatur, die bei gleicher brennbarer Biomasse zu einer längeren Branddauer führt, die 140°C-Linie eine größere Ausdehnung erreicht. Das bestätigte sich nicht, die Ausdehnung war trotz einer Branddauer von nun 6 Stunden in alle Richtungen geringer. Das Fazit ist, dass kürzere aber heißere Wurzelbrände kritischer sind als längere aber weniger heiße.

Es wurde auch noch ein Schwelbrand in einem Wurzelstock (hier definiert als der unterirdische Teil eines Baumstumpfs) in Kombination mit einem flächenhaften (Wald)Brand an der Bodenoberfläche simuliert. Vom Modellaufbau her, ist ein Wurzelstock nichts anderes als eine sehr dicke Wurzel, die nicht besonders tief in den Boden reicht. Dementsprechend kann ein brennender Wurzelstock auf die gleiche Weise simuliert werden, also mit den gleichen Annahmen, Eingabewerten und Segmentdimensionen. Für den Wurzelstock wurde eine Tiefe von 40 cm und eine Dicke von 40 cm angenommen sowie eine Brandtemperatur von 500°C.

Wegen der deutlich größeren Biomasse brennt der Wurzelstock wesentlich länger (22 Stunden und 20 Minuten), so dass die 140°C-Linie mit 25 cm eine deutlich größere maximale laterale Entfernung vom Wurzelstock erreicht als von der vorher betrachteten Wurzel. Auch die maximal erreichte Tiefe unter dem Wurzelstock ist mit 28 cm deutlich größer.

Weil eine größere Fläche über die kritische Temperatur von 140°C erwärmt wird, ist das Risiko, dass zwischen 13 und 68 cm tief im Boden befindliche Munition zur Explosion gebracht werden könnte, bei einem Brand in einem Wurzelstock deutlich höher als bei einem Wurzelbrand. (Oberhalb von 13 cm führt der Brand an Bodenoberfläche bereits zur Umsetzung der Munition.) Allerdings kommt ein Schwelbrand in einem Wurzelstock nur selten vor, weil dieser (und der Baumstumpf über der Erde) sich nach dem Abbrechen oder Fällen des Baums recht schnell zersetzt, als Folge davon viel Wasser aufnehmen kann und

dementsprechend in der Regel sehr feucht bis nass ist. Ein Brand ist daher eher unwahrscheinlich.

Es wurde auch für den Wurzelstock bei sonst gleichen Bedingungen noch einmal mit 250°C Brandtemperatur gerechnet. Auch hier ergab sich eine geringe maximale Ausdehnung der 140°C-Linie als bei 500°C Brandtemperatur.

1. Einleitung

1.1 Hintergrund

In Deutschland liegt in einigen Waldgebieten nicht umgesetzte Munition im Boden. Sie stammt aus militärischen Übungen, Kämpfen im 2. Weltkrieg oder schlecht ausgeführter (irregulärer) Munitionsvernichtung. Wenn dort ein Waldbrand ausbricht, besteht die Gefahr, dass diese Munition durch in den Boden eindringende Hitze aus dem Brand zur Explosion gebracht wird. Aus Sicherheitsgründen ist eine Brandbekämpfung deshalb nicht oder nur unter großen Schwierigkeiten möglich.

Um dieses Problem zu lösen, muss die nicht umgesetzte Munition bis zu der Tiefe geräumt werden, in der infolge eines Waldbrandes noch Temperaturen erreicht werden können, bei denen die Munition detoniert. Diese Tiefe hängt hauptsächlich von drei Faktoren ab:

- 1) der Temperatur des Brandes an der Bodenoberfläche,
- 2) der Dauer des Brandes,
- 3) der thermischen Diffusivität (D_{th}) des Bodens.

Die Physik der Wärmeausbreitung in Böden ist bestens erforscht ist, ebenso wie deren mathematische Beschreibung. Man kann daher die Wärmeausbreitung im Boden unter einem Waldbrand unter Berücksichtigung der drei eben genannten Faktoren gut berechnen. Mit den entsprechenden Werten für diese Faktoren kann man unterschiedliche Szenarien simulieren und damit die dafür jeweils notwendige Räumungstiefe abschätzen. Am einfachsten lassen sich solche Berechnungen mit einem eigens dafür geschriebenen Computerprogramm durchführen.

1.2 Bisherige Arbeiten

Hagenau und Borg (2019) haben für die Leitstelle des Bundes für Kampfmittelräumung, angesiedelt im Niedersächsischen Landesamt für Bau und Liegenschaften, ein ein-dimensionales (1D) Computerprogramm geschrieben, mit dem die vertikale Wärmeausbreitung im Boden unter einem Waldbrand berechnet werden kann. Damit wurden Berechnungen für verschiedene Brandszenarien durchgeführt, die zu folgenden grundsätzlichen Ergebnissen führten.

- Je höher die Brandtemperatur, desto größer die Eindringtiefe der Brandwärme.
- Je länger die Branddauer, desto größer die Eindringtiefe der Brandwärme.
- Je höher D_{th} , desto größer die Eindringtiefe der Brandwärme.

- In der Abkühlungsphase, wenn der Brand an der Bodenoberfläche schon erloschen ist, kann die Temperatur in tieferen Bereichen noch ansteigen, auch wenn sich die Bodenoberfläche bereits stark abgekühlt hat.
- Da D_{th} für organische Stoffe wesentlich niedriger ist als für mineralische, reduziert eine Humusaufgabe das Eindringen der Wärme aus einem Feuer. Mit Humusaufgabe sind die Bodentemperaturen daher in jeder Tiefe geringer als ohne.
- Die Wärme aus einem Feuer kann vor allem in Sandböden zu Verdunstung von Wasser aus den oberen Bodenschichten führen. Dadurch verringert sich D_{th} . Außerdem verbraucht die Verdunstung Energie, die dann nicht mehr zur Erwärmung des Bodens zur Verfügung steht. Beides reduziert das Eindringen der Wärme aus einem Feuer. Mit Verdunstung sind die Bodentemperaturen daher in jeder Tiefe geringer als ohne. (Der Energieverbrauch durch Verdunstung wurde in den bisherigen Arbeiten nicht berücksichtigt.)
- Je nach Temperatur des Brandes an der Bodenoberfläche, dessen Dauer und den D_{th} -Werten im Bodenprofil werden in Tiefen > 30 cm, im ungünstigsten Fall > 60 cm, die Temperaturen nicht mehr nennenswert durch Wärme aus dem Brand über ihren Ausgangswert erhöht.

Es sei an dieser Stelle angemerkt, dass für ein Computerprogramm häufig der Begriff „Modell“ verwendet wird. Berechnungen damit werden landläufig als „(Computer)simulation“ oder „Modellrechnung“ bezeichnet. Diese Begriffe werden im Folgenden stellenweise benutzt.

Pretz und Borg (2023) haben das Computerprogramm von Hagenau und Borg (2019) verwendet, um die Wärmeausbreitung im Boden in einem worst-case-Szenario zu betrachten. Dafür wurden folgende Bedingungen angenommen:

- Ausgangstemperatur im Bodenprofil = 40°C an der Oberfläche und 20°C in 2 m Tiefe,
- Temperatur des Brandes an der Bodenoberfläche = 800°C ,
- Dauer des Brandes = 1 h,
- thermische Diffusivität (D_{th}) des Bodens = $0,007 \text{ cm}^2/\text{s}$
- Zündtemperatur der Munition = 140°C .

Diese Werte basieren auf Daten aus der Literatur. Die genannte Brandtemperatur ist sehr hoch, die Branddauer sehr lang. D_{th} und die Ausgangstemperatur sind ebenfalls sehr hoch angesetzt, die Zündtemperatur dagegen sehr niedrig.

Die Berechnungen zeigen, dass die größte Tiefe, in der eine Temperatur von 140°C erreicht wird, nur 13 cm beträgt. Das ist nach etwa 2 Stunden der Fall. Danach sinken die Temperaturen überall im Boden auf deutlich unter 140°C . Unterhalb von 30 cm Tiefe hat der

Brand zu keiner Zeit nennenswerte Auswirkungen. Aus diesen Ergebnissen lässt sich eine maximale notwendige Räumtiefe von 20 cm ableiten.

Aufbauend auf den bisherigen Arbeiten sollen nun weitere Dinge untersucht werden, die im Folgenden kurz beschrieben werden.

2. Weiterführende Untersuchungen

2.1 Vergleich von Berechnungen mit dem vorhandenen eindimensionalen (1D) Computerprogramm und Messwerten aus einem Brandversuch

Nachdem ein Computerprogramm fertig gestellt ist, sollten die ersten Berechnungen mit Messwerten verglichen werden, um zu sehen, wie gut das Programm funktioniert. Das setzt voraus, dass geeignete Messwerte für einen Vergleich zur Verfügung stehen. Für die Wärmeausbreitung im Boden unter einem Waldbrand braucht man dazu Daten zum Temperaturverlauf an der Bodenoberfläche und in mehreren Bodentiefen. Solche Daten waren zunächst nicht verfügbar. Folglich war ein Vergleich bisher nicht möglich.

Unter anderem auf Anregung durch die Leitstelle des Bundes für Kampfmittelräumung wurden am Institut für Bodenmechanik und Grundbau der Universität der Bundeswehr in München von Lyngbö (2023) Brandversuche zur Abschätzung des Gefahrenpotenzials von Vegetationsbränden auf kampfmittelbelasteten Flächen durchgeführt. In einem dieser Versuche wurde ein Flächenbrand an der Bodenoberfläche simuliert. Dabei wurde an der Bodenoberfläche sowie in verschiedenen Tiefen der Temperaturverlauf gemessen, wie es für einen Vergleich notwendig ist. Diese Messdaten sollen hier mit dem 1D-Computerprogramm aus Hagenau und Borg (2019) rechnerisch nachvollzogen werden, um zu sehen, wie gut das mit dem Programm gelingt.

Wie oben schon angemerkt, ist die Physik der Wärmeausbreitung in Böden bestens erforscht, ebenso wie deren mathematische Beschreibung. Das o.g. Programm ist auf diesem Wissen aufgebaut und liefert daher grundsätzlich korrekte Ergebnisse. Wie genau berechnete und gemessene Werte letztlich übereinstimmen hängt davon ab, wie genau die für die Berechnungen notwendigen Eingabeparameter sind. Dies sind:

- Ausgangstemperatur im Bodenprofil, die nicht überall gleich ist,
- Temperaturverlauf an der Bodenoberfläche über die Dauer des Brands,
- thermische Diffusivität im Bodenprofil, die ebenfalls nicht überall gleich ist.

2.2 Schreiben eines Computerprogramms zur Berechnung der dreidimensionalen (3D) Wärmeausbreitung in einem Boden

In den bisherigen Arbeiten wurde stets ein Brand mit einer großen flächenhaften Ausdehnung betrachtet. Unter diesen Umständen breitet sich die Wärme, außer an den Rändern, senkrecht in den Boden hinein aus. Dementsprechend wurde bisher nur ein ein-dimensionales (1D) Modell programmiert und verwendet.

Es kann vorkommen, dass bei einem Waldbrand ein Schwelbrand in Wurzeln entsteht, der sich in die Tiefe ausbreiten kann. Wurzeln können außerdem noch weiter brennen, wenn das Feuer an der Oberfläche bereits erloschen ist.

Entlang einer brennenden Wurzel breitet sich die Wärme überwiegend lateral aus, außer an ihrem Ende, wo auch eine vertikale Ausbreitung stattfindet. Wenn ein Wurzelbrand auftritt, hat man es also mit einer Situation zu tun, wo zu der vertikalen Wärmeausbreitung von der Bodenoberfläche in den Boden hinein noch die von der Wurzel ausgehende laterale Wärmeausbreitung kommt bzw. die vertikale an ihrem Ende. Um das zu simulieren zu, braucht man ein dreidimensionales (3D) Wärmetransportmodell. Die drei Dimensionen sind:

- horizontal nach links oder rechts (x-Richtung),
- horizontal nach vorne oder hinten (y-Richtung),
- senkrecht in die Tiefe (z-Richtung).

Nicht nur Wurzeln können bei einem Waldbrand einen Schwelbrand entwickeln, sondern auch Baumstümpfe, die ebenfalls noch weiter brennen können, wenn das Feuer an der Oberfläche ansonsten bereits erloschen ist. Baumstümpfe reichen üblicherweise auch in den Boden hinein, wenn auch nicht so tief wie Wurzeln. Dieser unterirdische Teil wird im Folgenden Wurzelstock genannt. (In der Forstwirtschaft wird das gesamte Gebilde aus ober- und unterirdischem Teil so bezeichnet.)

Entlang eines brennenden Wurzelstocks findet ebenfalls lateraler Wärmetransport statt sowie vertikaler Transport an seinem unteren Ende. Man kann ihn als daher als relativ kurze aber ziemlich dicke Wurzel ansehen. Um die Wärmeausbreitung von einer solchen Quelle zu berechnen, braucht man ebenfalls ein 3D-Modell. Ein 3D-Modell (Programm) zu schreiben ist also eine weitere Aufgabe, die hier erfüllt werden soll.

Lyngbö (2023) hat in seinen Versuchen auch die Temperaturverteilung unter einem brennenden Baumstumpf (Wurzelstock) und unter einem brennenden Ameisenhaufen untersucht. Ein Ameisenhaufen hat ebenfalls einen ober- und einen unterirdischen Teil. und kann daher auf die gleiche Weise modelliert werden wie ein brennender Wurzelstock.

Leider eignen sich seine Daten nicht für einen Vergleich mit Berechnungen mit einem 3D-Modell, weil die Bodentemperaturen nur in zwei Richtungen (hier x und z) gemessen wurden. Außerdem waren sie links und rechts des Brandherds sehr unterschiedlich. Wären sie gleich oder zumindest ähnlich gewesen, hätte man mit einiger Sicherheit annehmen können, dass sie auch davor und dahinter (also in y-Richtung) gleich oder ähnlich waren. Unter diesen Umständen hätte man einen Vergleich versuchen können, aber die Messergebnisse machen es unmöglich.

2.3 Modellrechnungen zur Wärmeausbreitung im Boden mit dem hier auszuarbeitenden 3D-Computerprogramm unter einem flächenhaften (Wald)Brand an der Bodenoberfläche in Kombination mit einem Schwelbrand in einer Wurzel bzw. einem Wurzelstock.

Mit dem hier auszuarbeitenden 3D-Modell soll anschließend die Kombination von einem flächenhaften Brand an der Bodenoberfläche mit einem Schwelbrand in einer Wurzel bzw. einem Wurzelstock untersucht werden.

Mit den Berechnungen soll ermittelt werden, unter welchen Bedingungen wann und wo eine kritische Zündtemperatur für Munition erreicht wird. Für eine Worst-Case-Abschätzung, um die es hier letztlich geht, ist nicht das gesamte Spektrum der Explosivstoffe relevant, sondern nur der Stoff mit der niedrigsten Zündtemperatur. Damit ist die mögliche Umsetzung aller anderen Stoffe auch abgedeckt. Aus Tabelle 1 in Preetz und Borg (2023) geht hervor, dass Tetrazen mit 140°C die mit Abstand niedrigste Zündtemperatur (= Verpuffungspunkt) aufweist. Daher wird dieser Wert im Folgenden als kritische Temperatur verwendet.

3. Ergebnisse

3.1 Vergleich von Berechnungen mit dem vorhandenen 1D-Computerprogramm und Messwerten aus einem Brandversuch

3.1.1 Kurze Beschreibung des Brandversuchs

Lyngbö (2023) hat in einem Versuch einen Brand an der Bodenoberfläche simuliert. Dafür wurde ein Betonring mit 100 cm Innendurchmesser und 50 cm Höhe aufgestellt und mit einem Sandboden gefüllt. An der Bodenoberfläche sowie in 5, 15 und 35 cm Tiefe wurden je drei Temperatursensoren eingebaut, je einer in der Mitte des Rings und je einer 40 cm rechts bzw. links der Mitte. Außerdem wurde in 25 cm Tiefe je ein Sensor 20 cm rechts bzw. links der Mitte platziert. Die Sensoren lagen alle auf einer senkrechten Schnittfläche durch den Ring.

Auf die Oberfläche wurde Totholz (Brennholz) gelegt und angezündet. Anschließend wurde der Temperaturverlauf an der Oberfläche alle 10 und in den o.g. Tiefen alle 2 Sekunden über einen Zeitraum von 7 Stunden 45 Minuten gemessen. Die Ergebnisse sind in den Abbildungen 1 bis 3 dargestellt. Die beiden Sensoren in 20 cm Abstand von der Mitte werden hier nicht weiter berücksichtigt, weil dort nur in einer Tiefe (25 cm) gemessen wurde. Weiterhin ist zu vermerken, dass die Sensoren in 15 cm Tiefe nur bis 125°C messen können, so dass die Temperaturkurve in Abbildung 1 dort aufhört.

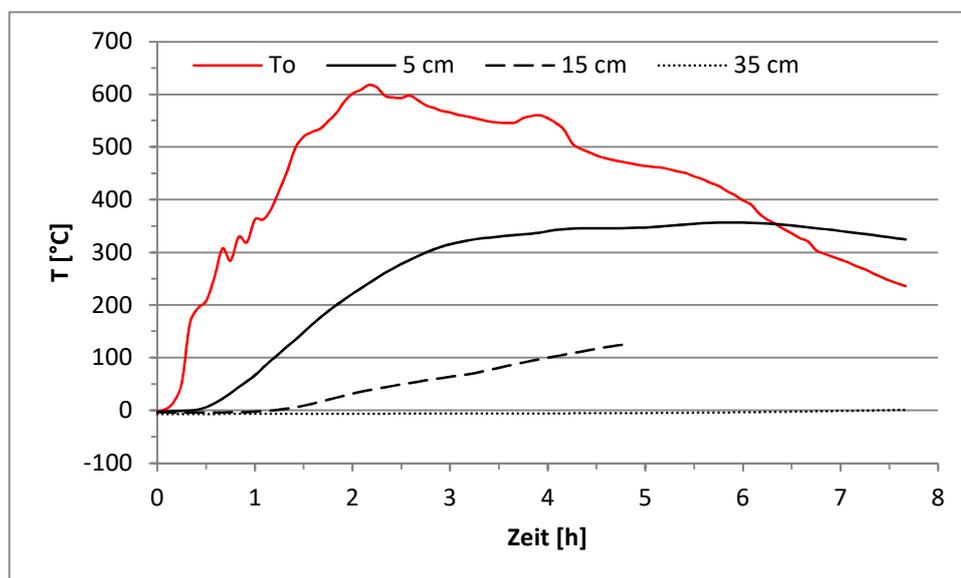


Abbildung 1: Temperaturverlauf in der Mitte des Betonrings an der Bodenoberfläche (To) sowie in 5, 15 und 35 cm Tiefe in dem Brandversuch mit Totholz von Lyngbö (2023).

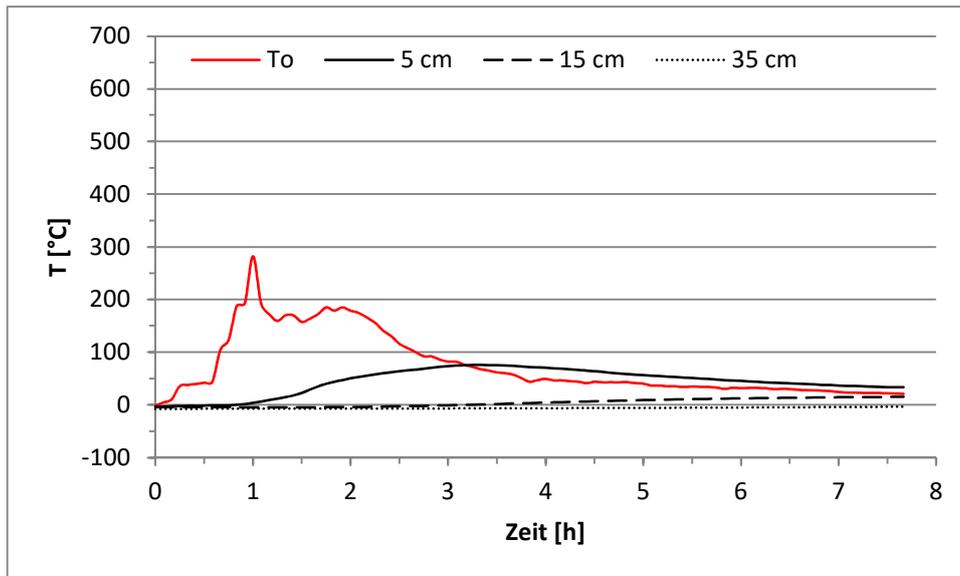


Abbildung 2: Temperaturverlauf 40 cm links von der Mitte des Betonrings an der Bodenoberfläche (To) sowie in 5, 15 und 35 cm Tiefe in dem Brandversuch mit Totholz von Lyngbö (2023).

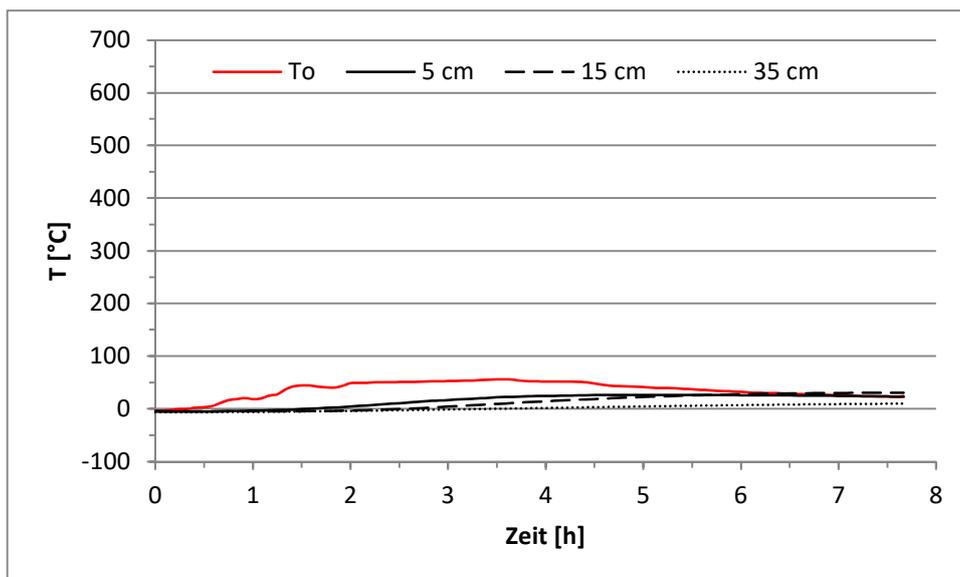


Abbildung 3: Temperaturverlauf 40 cm rechts von der Mitte des Betonrings an der Bodenoberfläche (To) sowie in 5, 15 und 35 cm Tiefe in dem Brandversuch mit Totholz von Lyngbö (2023).

Wie man in den drei Abbildungen sieht, wurden an der Oberfläche sowie in 5 und 15 cm Tiefe die mit Abstand höchsten Temperaturen jeweils in der Mitte des Betonrings registriert. Auf der linken Seite wurde es an der Oberfläche und in 15 cm Tiefe auch noch recht warm, während die rechte Seite auffallend kühl blieb. In 35 cm Tiefe hat sich an allen drei Positionen das Feuer an der Bodenoberfläche nicht bedeutend auf die Temperaturen ausgewirkt, was nach den Ergebnissen von Hagenau und Borg (2019) zu erwarten war (siehe Kapitel 1.2).

Die deutlich geringeren Temperaturen 40 cm von der Mitte des Betonrings sind zum einen darauf zurückzuführen, dass dort weniger Brennmaterial zur Verfügung stand als in der Mitte. Dementsprechend konnte die Bodenoberfläche dort nicht so heiß werden wie in der Mitte. Wenn die Temperatur an der Oberfläche geringer ist, sind folglich auch die Temperaturen tiefer im Boden geringer.

Zum anderen strömt an den 40 cm-Positionen, die nur 10 cm vom äußeren Rand der Brandfläche entfernt sind, die Wärme nicht ausschließlich senkrecht in die Tiefe, sondern auch lateral nach außen. Außerhalb der Brandfläche gibt es keinen Wärmeeintrag, so dass es dort kälter ist. Als Konsequenz fließt Wärme aus dem (warmen) Brandbereich lateral nach außen, wo es kälter ist. Dieser laterale Wärmefluss ist umso ausgeprägter, je näher man an den Rand des Brandbereichs kommt. Er ist ein weiterer Grund dafür, dass es an den 40 cm-Positionen zu einer geringeren Erwärmung des Bodens kam.

In der Mitte der Brandfläche im Betonring kann man von einem weitestgehend senkrechten Wärmefluss in den Boden ausgehen. Die Daten von dieser Position eignen sich daher für einen Vergleich mit Berechnungen mit dem 1D-Modell von Hagenau und Borg (2019) und werden dementsprechend dafür verwendet.

3.1.2 Kurze Beschreibung der Berechnungen

Wie es bei Berechnungen mit finiten Differenzen notwendig ist, wurde das Bodenprofil in Segmente geteilt, hier in insgesamt 34. Im obersten (Segment 0) und untersten Segment (Segment 33) muss die Temperatur zu jeder Zeit bekannt sein. In Segment 0 ist es die an der Bodenoberfläche gemessene Temperatur, in Segment 33 wird eine konstante Temperatur angesetzt. Damit durch diese konstante Temperatur die Berechnungen nicht verfälscht werden, muss das betrachtete Bodenprofil tiefer sein als die größte Tiefe, in die Wärme vom Brandgeschehen an der Oberfläche vordringt. Um das zu gewährleisten, wurde in den Berechnungen ein Bodenprofil von 210 cm Tiefe betrachtet.

In den oberen Segmenten finden größere und schnellere Temperaturveränderungen statt als weiter unten. Daher wurde oben die Dicke der Segmente kleiner gewählt, um eine bessere Auflösung zu erhalten. Die Verteilung der hier verwendeten Segmentdicken sowie die D_{th} -Werte, mit denen die Ergebnisse in den folgenden Abbildungen 4 bis 6 erzielt wurden, sind in Anhang 1 aufgeführt.

In den Berechnungen wird in Zeitschritten von 10 Sekunden vorgegangen, weil in diesem Intervall die Temperatur an der Bodenoberfläche gemessen wurde (siehe Kapitel 3.1.1).

Das Programm ist in Hagenau und Borg (2019) genau beschrieben. Für die Arbeiten hier wurde lediglich der Ein- und Ausgabeteil etwas abgewandelt, um im Bodenprofil Bereiche mit unterschiedlichen D_{th} -Werten verwenden zu können.

Wie oben schon erwähnt, hängt es von der Genauigkeit der für die Berechnungen notwendigen Eingabeparameter ab, wie gut berechnete und gemessene Werte übereinstimmen. Die notwendigen Parameter sind, wie oben schon erwähnt:

- Ausgangstemperatur im Bodenprofil,
- Temperaturverlauf an der Bodenoberfläche über die Dauer des Brands,
- thermische Diffusivität im Bodenprofil.

Die Ausgangstemperatur im Bodenprofil und der spätere Temperaturverlauf an der Oberfläche sowie in 5, 15 und 35 cm Tiefe wurden in den o.g. Zeitintervallen gemessen. Die thermische Diffusivität des Bodens wurde im Labor bestimmt, also nicht vor Ort im Betonring. Das ist ausführlich in Anhang 2 beschrieben.

Die thermische Diffusivität (D_{th}) hängt maßgeblich von drei Faktoren ab:

- Bodenart,
- Wassergehalt des Bodens,
- Lagerungsdichte des Bodens.

Für ihre Bestimmung im Labor wurden logischerweise Proben von dem gleichen Sandboden verwendet, der in den Betonring eingefüllt wurde. Abbildung A4 in Anhang 2 kann man D_{th} -Werte für verschiedene Wassergehalte und Lagerungsdichten entnehmen. Leider wurde weder der Wassergehalt noch die Lagerungsdichte des Bodens an irgendeiner Stelle im Versuchsgefäß gemessen. Folglich lassen sich für keine Position genaue D_{th} -Werte benennen. Ein ordnungsgemäßer Vergleich, d.h. ein Vergleich zwischen Temperaturen, die mit gemessenen D_{th} -Werten berechnet wurden, und gemessenen Temperaturen ist hier also nicht möglich. Aus diesem Grund wird wie folgt vorgegangen:

Es werden D_{th} -Werte angenommen und damit Berechnungen durchgeführt, deren Ergebnisse anschließend mit den Messwerten verglichen werden. Die zunächst angenommenen D_{th} -Werte werden dann so oft variiert, bis man die D_{th} -Werte gefunden hat, mit denen die Übereinstimmung mit den Messdaten am besten ist. Wenn diese D_{th} -Werte realistisch sind, bedeutet das, dass das Modell korrekt ist.

Je nachdem, wie der Boden vor dem Einbau gelagert und dann eingefüllt wurde, können je nach Position im Betonring sehr unterschiedliche Wassergehalte auftreten. Bei einem eingefüllten Boden muss man außerdem damit rechnen, dass die Lagerungsdichte variiert. Demzufolge variieren dann auch die D_{th} -Werte im Betonring. Gemäß Abbildung A4 in Anhang 2 können sie hier zwischen 0,17 und 0,77 mm²/s liegen (entspricht 0,0017 bzw. 0,0077 cm²/s). Das ist der Bereich, der hier zur Findung der am besten passenden D_{th} -Werte zur Verfügung steht.

3.1.3 Vergleichsrechnungen

Bereits nach wenigen Berechnungen wurde deutlich, dass mit einem gleichen D_{th} im gesamten Bodenprofil nur in jeweils einer Tiefe eine gute Übereinstimmung erzielt werden kann, in den anderen Tiefen sind die berechneten Werte dann zu warm oder nicht warm genug. Das ist beispielhaft in Abbildung 4 illustriert, wo die Übereinstimmung in 5 cm Tiefe für die ersten fünf Stunden des Brandversuchs sehr gut ist (auf das Auseinandergehen danach wird später eingegangen), während in 15 cm Tiefe die berechneten Werte deutlich und durchgängig zu niedrig und in 35 cm Tiefe nach etwa 5 Stunden zunehmend zu hoch sind. In allen weiteren Simulationsläufen (Berechnungen) wurde das Bodenprofil daher in Bereiche mit unterschiedlichen D_{th} -Werten unterteilt. Nach den Ausführungen im letzten Absatz von Kapitel 3.1.2 war zu erwarten, dass eine Unterteilung in mehrere D_{th} -Bereiche notwendig ist.

Die Daten in Abbildung 4 besagen, dass sich in den Berechnungen die vom Brand ausgehende Wärme unterhalb von 5 cm Tiefe zu langsam nach unten bewegt. Das wiederum bedeutet, dass unterhalb von dieser Tiefe die hier überall angesetzte thermische Diffusivität von $D_{th} = 0,0041 \text{ cm}^2/\text{s}$ zu gering ist. Man braucht dort einen höheren Wert, damit mehr Wärme nach unten fließen kann. Ein höheres D_{th} hat aber auch zur Folge, dass mehr Wärme von den darüber liegenden Schichten in die Tiefe abfließt. Damit in 5 cm Tiefe die Übereinstimmung weiterhin gut bleibt, muss daher auch das D_{th} in den oberen Bodenschichten angehoben werden. Unter Berücksichtigung dieser Zusammenhänge zeigt Abbildung 5 die insgesamt beste Übereinstimmung, wenn zwei D_{th} -Bereiche im Bodenprofil verwendet werden, in diesem Fall ein Bereich von 0 - 6,5 cm Tiefe mit $D_{th} = 0,0048 \text{ cm}^2/\text{s}$ und ein zweiter Bereich von > 6,5 cm Tiefe mit $D_{th} = 0,007 \text{ cm}^2/\text{s}$.

In 5 cm (abgesehen von dem Auseinanderklaffen nach fünf Stunden) und 15 cm Tiefe stimmen die Verläufe gut überein, aber in 35 cm Tiefe, wo die gemessene maximale Erwärmung bis zum Ende des Brandversuchs nur $7,8^\circ\text{C}$ beträgt, steigt der berechnete Wert nach rund 2,5 Stunden kontinuierlich über den gemessenen Wert an. Das passiert, weil der berechnete Wärmefluss unterhalb von 15 cm Tiefe zu schnell nach unten geht. Das bedeutet wiederum, dass unterhalb dieser Tiefe die hier angesetzte thermische Diffusivität von $D_{th} = 0,007 \text{ cm}^2/\text{s}$ zu hoch ist. Man braucht dort einen niedrigeren Wert, der einen geringeren Wärmefluss bewirkt. Daraus folgt, dass zur Verbesserung der Übereinstimmung mehr als zwei D_{th} -Bereiche benötigt werden.

Wenn der D_{th} -Wert unterhalb von 15 cm Tiefe verringert wird, hat das auch Auswirkungen auf die darüber liegenden Schichten. Dort wird dann der Wärmefluss nach unten geringer, so dass es wärmer wird. Damit die Übereinstimmung gut bleibt, muss daher auch in den höheren Schichten der D_{th} -Wert etwas verringert werden.

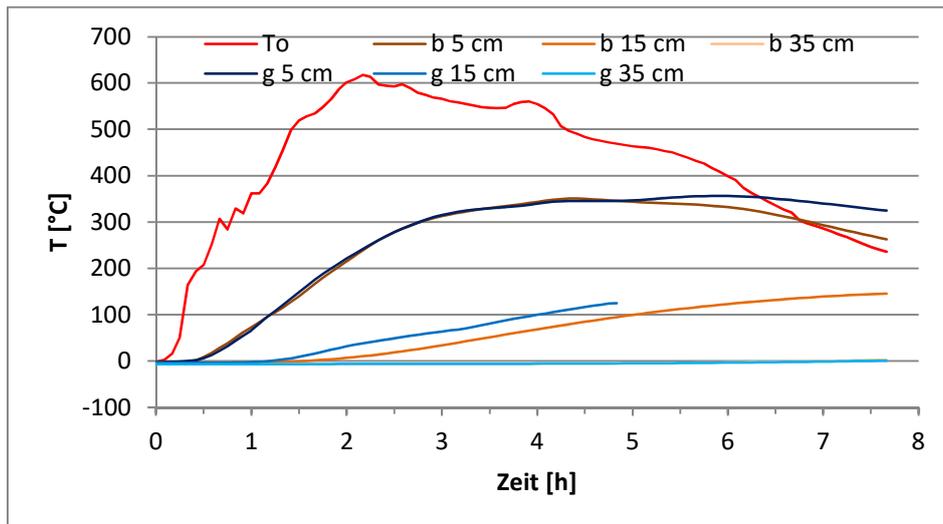


Abbildung 4a: Verlauf der berechneten und gemessenen Temperaturen in verschiedenen Bodentiefen in dem Brandversuch mit Totholz von Lyngbö (2023). In den Berechnungen wurde für die thermische Diffusivität im gesamten Bodenprofil ein Wert von $D_{th} = 0,0041 \text{ cm}^2/\text{s}$ verwendet. T_0 = Temperaturverlauf an der Bodenoberfläche (T_0), b = berechnet, g = gemessen.

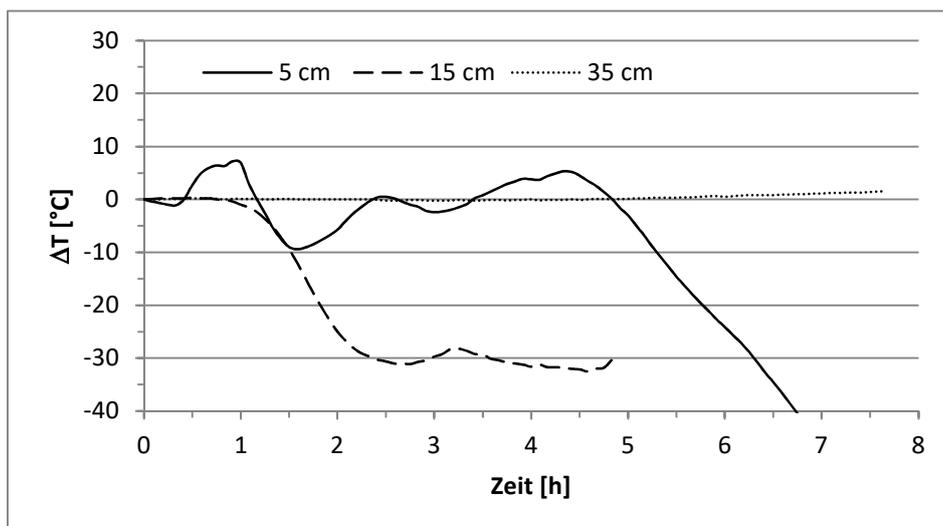


Abbildung 4b: Verlauf der Differenzen (ΔT) zwischen den berechneten und gemessenen Temperaturen in den verschiedenen Bodentiefen aus Abbildung 4a.

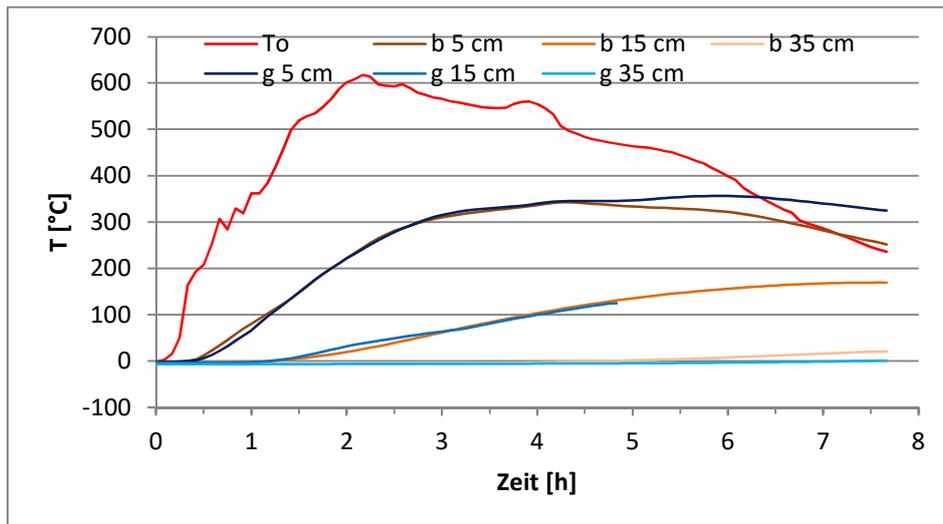


Abbildung 5a: Verlauf der berechneten und gemessenen Temperaturen in verschiedenen Bodentiefen in dem Brandversuch mit Totholz von Lyngbö (2023). In den Berechnungen hier wurde für die thermische Diffusivität in den oberen 6,5 cm des Bodenprofils ein Wert von $D_{th} = 0,0048 \text{ cm}^2/\text{s}$ verwendet, in allen Tiefen darunter von $D_{th} = 0,007 \text{ cm}^2/\text{s}$. T_0 = Temperaturverlauf an der Bodenoberfläche (T_0), b = berechnet, g = gemessen.

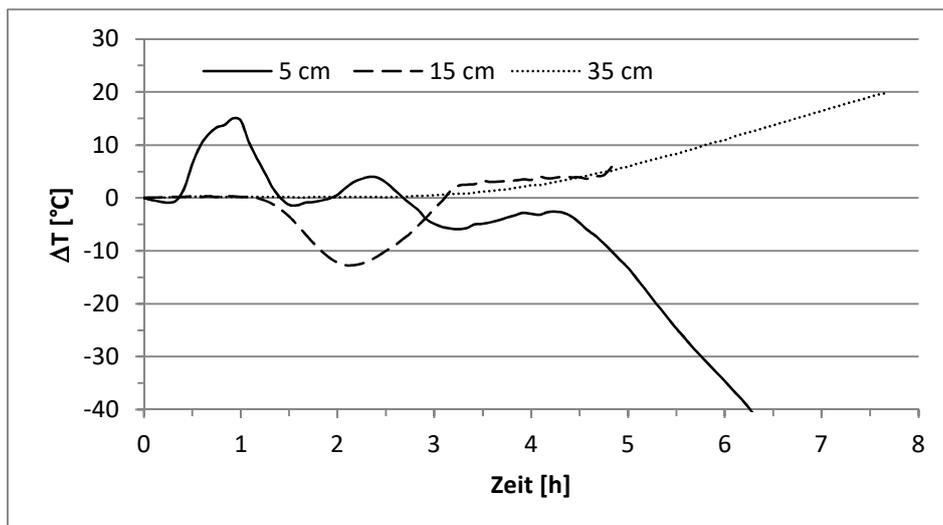


Abbildung 5b: Verlauf der Differenzen (ΔT) zwischen den berechneten und gemessenen Temperaturen in den verschiedenen Bodentiefen aus Abbildung 5a.

Nach etlichen Simulationsläufen (Vergleichsrechnungen) kristallisierte sich die Konstellation in Tabelle 1 als die heraus, die das beste Ergebnis liefert (Abbildung 6). Es sei angemerkt, dass sich mit leicht anderen Konstellationen ähnlich gute Ergebnisse erzielen lassen.

Tabelle 1: Aufteilung des Bodenprofils in dem Brandversuch mit Totholz von Lyngbö (2023) in die D_{th} -Bereiche, die die beste Übereinstimmung zwischen berechneten und gemessenen Werte erbrachte.

Bereich	Tiefe [cm]	D_{th} [cm^2/s]
1	0 - 6,5	0,0046
2	> 6,5 - 18	0,0060
3	> 18 - 37,5	0,0030
4	> 37,5	0,0050

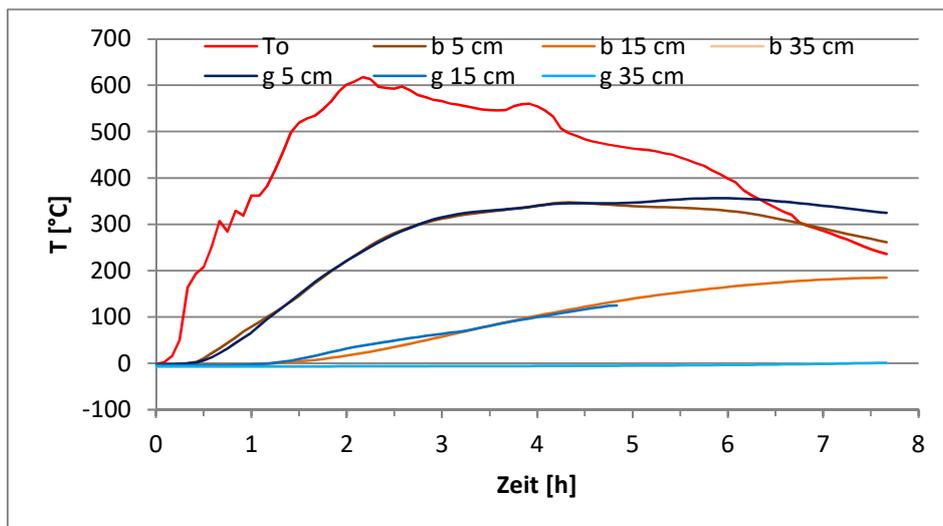


Abbildung 6a: Verlauf der berechneten und gemessenen Temperaturen in verschiedenen Bodentiefen in dem Brandversuch mit Totholz von Lyngbö (2023). In den Berechnungen wurden jetzt vier Bereiche für die thermische Diffusivität verwendet, die in Tabelle 1 angegeben sind. T_0 = Temperaturverlauf an der Bodenoberfläche (T_0), b = berechnet, g = gemessen.

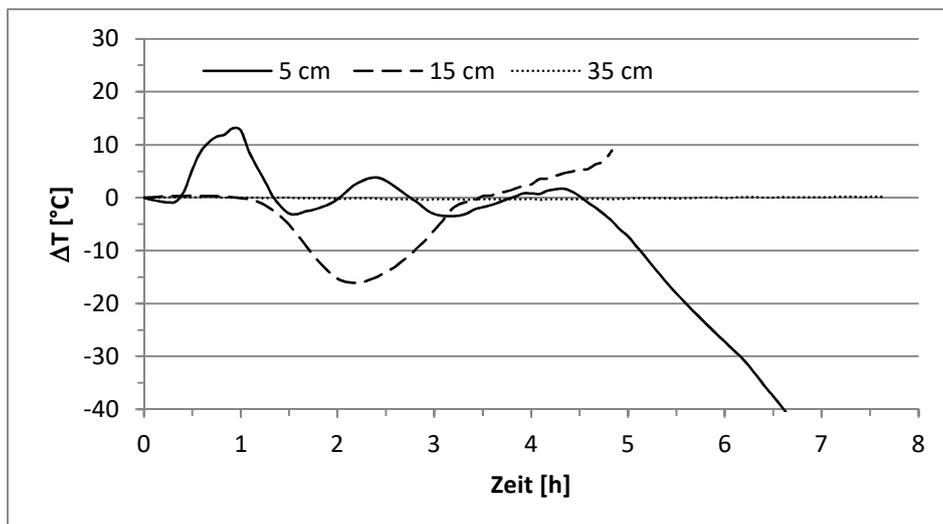


Abbildung 6b: Verlauf der Differenzen (ΔT) zwischen den berechneten und gemessenen Temperaturen in den verschiedenen Bodentiefen aus Abbildung 6a.

In 35 cm Tiefe ist die Übereinstimmung über den gesamten Zeitraum nahezu perfekt. In 15 cm Tiefe ist sie gut. Leider gibt es hier nur bis 4,75 Stunden nach Brandbeginn gemessene Daten. In 5 cm Tiefe ist die Übereinstimmung bis 4,75 Stunden nach Brandbeginn sehr gut. Danach gehen die berechneten und die gemessenen Temperaturen zunehmend auseinander. Das deutet darauf hin, dass sich im Brandversuch in den oberen Bodenschichten die thermische Diffusivität verändert hat. Das ist nicht verwunderlich, denn dort treten Temperaturen von mehreren hundert Grad auf, die zwangsläufig dazu führen, dass Bodenwasser in diesen Schichten verdunstet. Dadurch sinkt der Wassergehalt und die D_{th} -Werte werden geringer (siehe Abbildung A4 in Anhang 2). Vier Stunden nach Brandbeginn treten übrigens auch in 15 cm Tiefe Temperaturen über 100°C auf, so dass wahrscheinlich auch dort eine Verringerung der D_{th} -Werte im gemessenen Temperaturverlauf als Folge von Verdunstung zum Ausdruck gekommen wäre, wenn die Messungen hier nicht schon nach 4,75 Stunden aufgehört hätten.

Um zu überprüfen, ob ein Austrocknen der oberen Bodenschichten und die damit einhergehende Verringerung der D_{th} -Werte die richtige Erklärung für das Auseinandergehen der berechneten und gemessenen Temperaturen ist, wurde ein Simulationslauf durchgeführt, in dem die thermische Diffusivität nach 4,33 Stunden (der Zeit, wo die höchste Temperatur in 5 cm Tiefe erreicht wurde) in den obersten 6,5 cm des Bodens von $D_{th} = 0,0046 \text{ cm}^2/\text{s}$ auf $D_{th} = 0,0017 \text{ cm}^2/\text{s}$ reduziert wurde. Für den Boden im Brandversuch ist das der Wert bei 0% Wassergehalt und einer Lagerungsdichte von $L_d = 1,4 \text{ g/cm}^3$ (siehe Abbildung A4 in Anhang 2).

Das Ergebnis ist in Abbildung 7 dargestellt. Der berechnete und der gemessene Temperaturverlauf ab 4,33 Stunden nach Brandbeginn liegen nun wesentlich dichter beisammen. Das besagt, dass eine Reduzierung des D_{th} -Werts als Folge von Verdunstung durch das Brandgeschehen plausibel ist. Mit $D_{th} = 0,001 \text{ cm}^2/\text{s}$ sind die beiden Verläufe fast deckungsgleich (Abbildung 8). Dieser D_{th} -Wert liegt hier aber außerhalb des realistischen Bereichs.

In der Realität wird sich der D_{th} -Wert nicht wie hier simuliert in einem Sprung verringern. Vielmehr wird die Austrocknung an der Oberfläche beginnen und sich dann in die Tiefe ausbreiten. Wann die Austrocknung anfängt, wie schnell sie fortschreitet, wie tief sie in den Boden eindringt und wie lange sie letztlich dauert ist für den hier analysierten Brandversuch nicht bekannt, man kann darüber nur spekulieren. Deshalb wird es bei einer einzigen sprunghaften Reduzierung des D_{th} -Werts belassen und nicht versucht das Geschehen detaillierter zu simulieren.

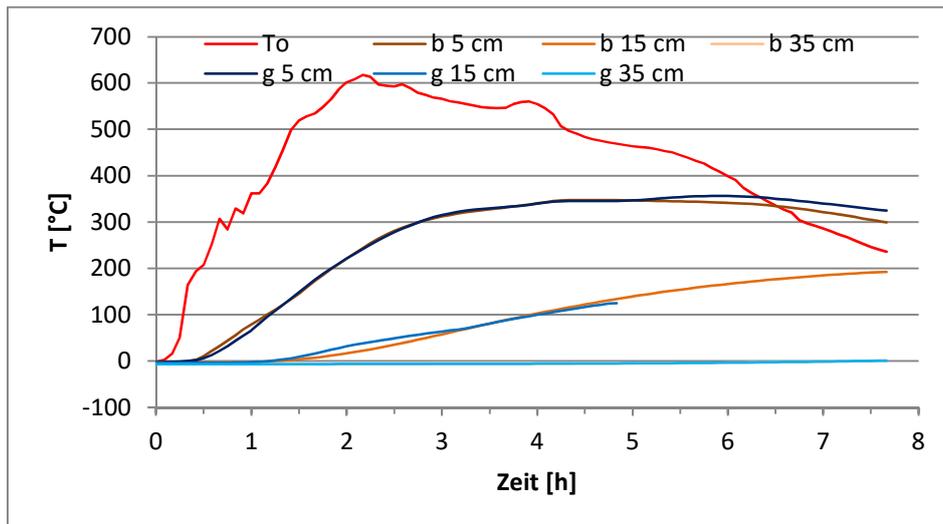


Abbildung 7a: Verlauf der berechneten und gemessenen Temperaturen in verschiedenen Bodentiefen in dem Brandversuch mit Totholz von Lyngbö (2023). In den Berechnungen wurden wieder die vier Bereiche in Tabelle 1 für die thermische Diffusivität verwendet. Hier wurde jedoch 4,33 Stunden nach Brandbeginn der D_{th} -Wert in den obersten 6,5 cm des Bodenprofils auf $0,0017 \text{ cm}^2/\text{s}$ reduziert. T_0 = Temperaturverlauf an der Bodenoberfläche (T_0), b = berechnet, g = gemessen.

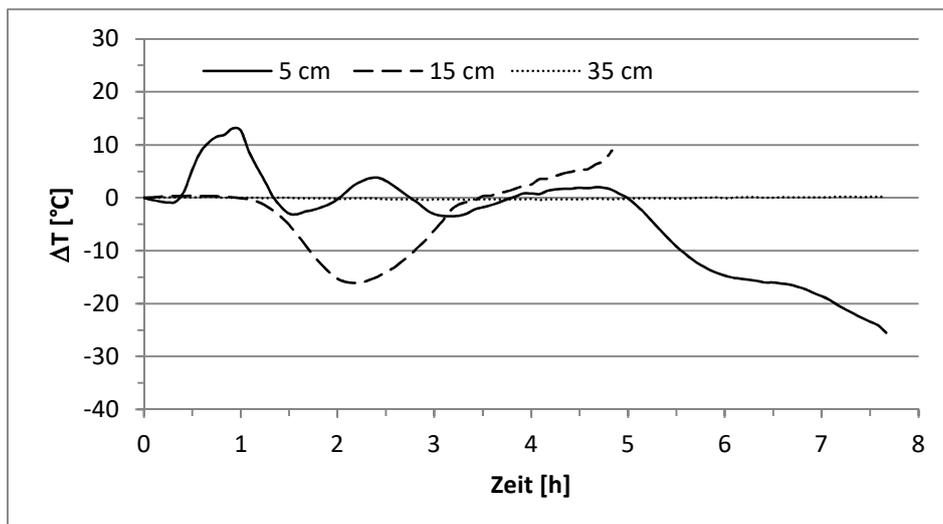


Abbildung 7b: Verlauf der Differenzen (ΔT) zwischen den berechneten und gemessenen Temperaturen in den verschiedenen Bodentiefen aus Abbildung 7a.

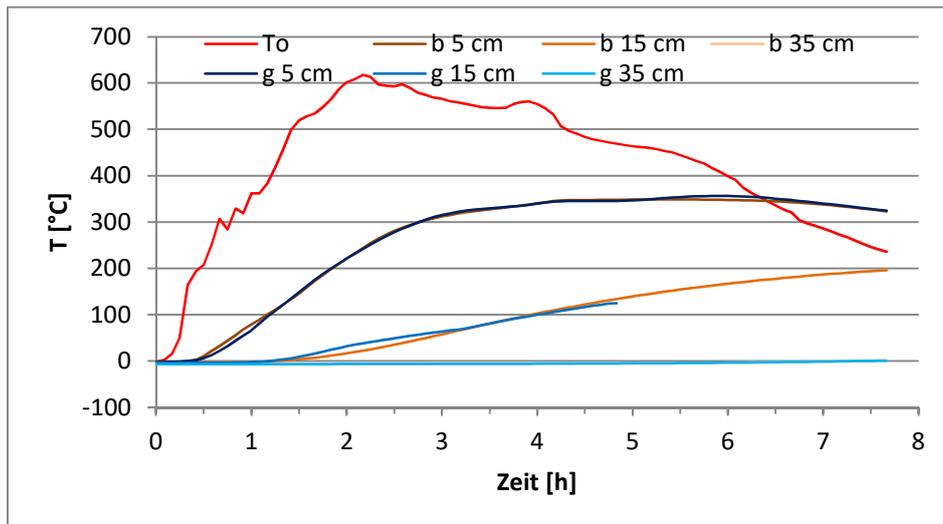


Abbildung 8a: Verlauf der berechneten und gemessenen Temperaturen in verschiedenen Bodentiefen in dem Brandversuch mit Totholz von Lyngbö (2023). In den Berechnungen wurden erneut die vier Bereiche in Tabelle 1 für die thermische Diffusivität verwendet. Diesmal wurde aber 4,33 Stunden nach Brandbeginn der D_{th} -Wert in den obersten 6,5 cm des Bodenprofils auf $0,001 \text{ cm}^2/\text{s}$ reduziert. T_0 = Temperaturverlauf an der Bodenoberfläche (T_0), b = berechnet, g = gemessen.

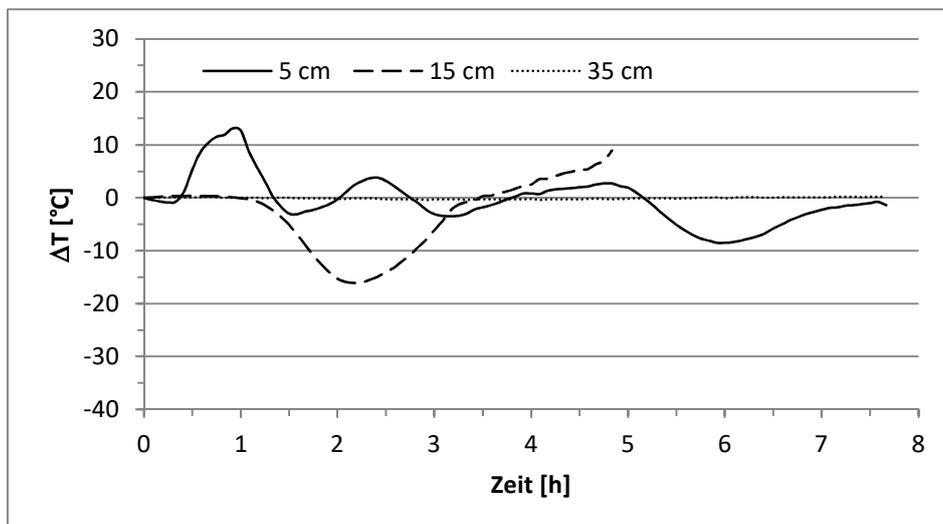


Abbildung 8b: Verlauf der Differenzen (ΔT) zwischen den berechneten und gemessenen Temperaturen in den verschiedenen Bodentiefen aus Abbildung 8a.

3.1.4 Fazit

Es konnte hier kein „ordnungsgemäßer“ Vergleich zwischen berechneten und gemessenen Temperaturverläufen durchgeführt werden, weil dazu die notwendigen Daten zur Verteilung der thermischen Diffusivität im Versuchsgefäß fehlen. Daher wurde das Bodenprofil in Bereiche mit unterschiedlichen D_{th} -Werten unterteilt und diese dann solange variiert, bis eine

gute Übereinstimmung zwischen berechneten und gemessenen Temperaturverläufen erzielt wurde (Abbildung 6). Die dafür letztlich verwendeten D_{th} -Werte sind plausibel.

Eine Besonderheit hier war das Auseinanderlaufen der berechneten und gemessenen Daten in 5 cm Tiefe ab 4,75 Stunden nach Brandbeginn, obwohl sie bis dahin unter Verwendung der angesetzten D_{th} -Werte sehr gut übereinstimmten. Eine starke Reduzierung des D_{th} -Werts in den oberen Bodenschichten ab diesem Zeitpunkt verbesserte die Übereinstimmung deutlich. Das legt nahe, dass aufgrund der hohen Temperaturen dort Wasser aus den oberen Bodenschichten verdunstet ist, was eine Reduzierung der thermischen Diffusivität zur Folge hat.

Letztlich wurde also gezeigt, dass das 1D-Computerprogramm von Hagenau und Borg (2019) gemessene Daten gut nachvollziehen kann und daher wohl auch für worst-case- und andere Simulationsrechnungen vernünftige Ergebnisse liefert.

3.2 Computerprogramm zur Berechnung der dreidimensionalen Wärmeausbreitung in einem Boden

3.2.1 Herleitung der relevanten Gleichungen

Die drei Dimensionen (Richtungen) wurden bereits in Kapitel 2.2 definiert.

Der folgende Text ist zu einem großen Teil der Herleitung des 1D-Modells in Hagenau und Borg (2019) entnommen, weil sich die Herleitung eines 3D-Modells nicht grundsätzlich davon unterscheidet.

Die Ausbreitung von Wärme in einem Boden (oder einem Festkörper im Allgemeinen) wird mit der Wärmetransportgleichung beschrieben. In drei-dimensionaler Form lautet sie:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = D_{thx} \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + D_{thy} \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + D_{thz} \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad [1]$$

T = Temperatur

t = Zeit

D_{th...} = thermische Diffusivität in x-, y- bzw. z-Richtung

∂... = Entfernung in x-, y- bzw. z-Richtung

Diese Gleichung kann man unter bestimmten Bedingungen analytisch lösen, nämlich dann, wenn die D_{th}-Werte in x-, y- und z-Richtung an jedem Punkt gleich und konstant sind, die Anfangstemperatur überall im Boden gleich ist, und der Verlauf der Temperatur an der Wärmequelle mit der Zeit mit einer eindeutigen mathematischen Beziehung beschrieben werden kann. All das schränkt die Verwendung einer analytischen Lösung stark ein. (Analytisch bedeutet, dass man T(x,y,z,t), also die Temperatur T an einer Stelle x,y,z zu einer Zeit t, direkt (ohne Iteration) ausrechnen kann. Bei unterschiedlichen D_{th} oder Ausgangstemperaturen im Bodenprofil ist eine analytische Lösung gar nicht möglich.

Die Alternative, die hier herangezogen wird, ist eine numerische Lösung mit finiten Differenzen, für die unterschiedliche D_{th}-Werte und Anfangstemperaturen in verschiedenen Bereichen eines Bodenprofils verwendet werden können und für die der Temperaturverlauf an der Bodenoberfläche jede beliebige Form annehmen kann. Die o.g. Einschränkungen bestehen für eine numerische Lösung also nicht. Aus den verschiedenen Varianten dafür wird die so genannte explizite Lösung gewählt, weil sie für Nicht-Fachleute am einfachsten zu verstehen ist

Für eine numerische Berechnung mit finiten Differenzen wird der zu betrachtende Bodenkörper (oder ein anderer Körper) zunächst in z-Richtung in mehrere übereinander liegende rechteckige Scheiben geteilt, die ihrerseits in kleinere quaderförmige Segmente unterteilt werden. Eine Scheibe muss überall die gleiche Dicke (dz) haben. Unterschiedliche Scheiben können jedoch unterschiedlich dick sein. Für ein Segment der Breite dx (von links

nach rechts) und der Länge dy (von vorne nach hinten) gilt, dass die Breite dx über die gesamte y -Ausdehnung und in allen Tiefen (z -Ausdehnung) des Bodenkörpers gleich sein muss und dass die Länge dy über die gesamte x -Ausdehnung und in allen Tiefen gleich sein muss. Unter Einhaltung dieser Bedingungen können die Dimensionen dx bzw. dy für solche „Segmentstreifen“ verschieden sein.

In die Mitte jedes Segments wird ein so genannter Knotenpunkt gesetzt, dem die thermischen Eigenschaften des Segments (D_{th} und Temperatur) zugeordnet werden. Jedes Segment erhält einen Index x,y,z .

Die Segmente an den sechs Außenseiten des Bodenkörpers (links, rechts, vorne, hinten, oben, unten) werden als Randsegmente bezeichnet, alle anderen sind so genannte innere Segmente. Die Anzahl der inneren Segmente in x -Richtung wird durch den Buchstaben k angegeben, die in y -Richtung durch m und die in z -Richtung durch n . Die Randsegmente links, vorne und oben werden als $x = 0$, $y = 0$ und $z = 0$, gekennzeichnet, rechts, hinten und unten als $x = k+1$, $y = m+1$ und $z = n+1$.

Die numerische Berechnung schreitet vom Zeitpunkt $t = 0$ bis zum Ende der Zeitspanne, die betrachtet werden soll, in Zeitschritten von Δt voran.

Zu Beginn der Berechnungen, also zum Zeitpunkt $t = 0$, müssen die Temperaturen in allen inneren Segmenten sowie die D_{th} 's zwischen allen benachbarten Segmenten bekannt sein. Das nennt man „Anfangsbedingungen“. Für die inneren Segmente wird danach in jedem Zeitschritt die Temperatur neu berechnet. (Falls man Änderungen im Bodenwassergehalt durch Verdunstung infolge der Brandwärme berücksichtigt, muss auch die thermische D_{th} neu bestimmt werden. Darauf wird hier verzichtet, weil es für worst-case-Szenarien, die in dieser Arbeit untersucht werden sollen, nicht notwendig ist.)

In den Randsegmenten muss man diese Parameter ebenfalls zum Zeitpunkt $t = 0$ kennen. Da man für die Randsegmente allerdings keine neuen Werte berechnen kann, was später noch begründet wird, müssen die Temperatur und die thermische Diffusivität für jeden Zeitpunkt vorgegeben werden, also bekannt sein. Das wird als „Randbedingungen“ bezeichnet.

Der Rechenweg wird am Ende des Kapitels näher erklärt. Zunächst werden aber die notwendigen Gleichungen zur expliziten numerischen Berechnung des drei-dimensionalen Wärmetransports hergeleitet.

Der Startpunkt für die Herleitung ist die drei-dimensionale Wärmebilanzgleichung für ein beliebiges Segment. Sie lautet:

$$\frac{\Delta W_{x,y,z}}{\Delta t} = (H_{reinx} - H_{rausx}) + (H_{reiny} - H_{rausy}) + (H_{reinz} - H_{rausz}) \quad [2]$$

$\Delta W_{x,y,z}$ = Änderung der im Element an Position x,y,z als Wärme gespeicherten Energie [J]

Δt = Zeitraum, über den sich $\Delta W_{x,y,z}$ vollzieht [s]

H_{reinx} = Wärmefluss in x-Richtung in das Element hinein [J/s]

H_{rausx} = Wärmefluss in x-Richtung aus dem Element heraus [J/s]

H_{reiny} = Wärmefluss in y-Richtung in das Element hinein [J/s]

H_{rausy} = Wärmefluss in y-Richtung aus dem Element heraus [J/s]

H_{reinz} = Wärmefluss in z-Richtung in das Element hinein [J/s]

H_{rausz} = Wärmefluss in z-Richtung aus dem Element heraus [J/s]

Das Wort „Position“ wird in diesem Text als Kurzform für „Knotenpunkt an Position ...“ benutzt.

Für die im Element als Wärme gespeicherte Energie W gilt:

$$W_{x,y,z} = \rho c_{x,y,z} \cdot V_{x,y,z} \cdot T_{x,y,z} \quad \text{bzw.} \quad \Delta W_{x,y,z} = \rho c_{x,y,z} \cdot V_{x,y,z} \cdot \Delta T_{x,y,z} \quad [3]$$

$\rho c_{x,y,z}$ = volumetrische spezifische Wärme des Segments x,y,z [J/cm³/°C]

$V_{x,y,z}$ = Volumen des Segments x,y,z [cm³]

$T_{x,y,z}$ = Temperatur des Segments x,y,z [°C]

$\Delta T_{x,y,z}$ = Änderung der Temperatur des Segments x,y,z [°C]

Der Parameter ρc gibt an wie viel Energie benötigt wird, um die Temperatur T in einem Volumen von $V = 1 \text{ cm}^3$ um 1°C zu erhöhen. Die Temperatur T ist ein Maß für die in einem Volumen V als Wärme gespeicherte Energiemenge.

Das Volumen eines Segments berechnet sich als:

$$V_{x,y,z} = dx_{x,y,z} \cdot dy_{x,y,z} \cdot dz_{x,y,z} \quad [4]$$

$dx_{x,y,z}$ = Ausdehnung des Segments x,y,z in x-Richtung [cm]

$dy_{x,y,z}$ = Ausdehnung des Segments x,y,z in y-Richtung [cm]

$dz_{x,y,z}$ = Ausdehnung des Segments x,y,z in z-Richtung [cm]

Für den Wärmefluss gilt ganz allgemein:

$$H = k_{\text{th}} \cdot A \cdot \frac{\Delta T}{\Delta L} \quad [5]$$

k_{th} = thermische Leitfähigkeit des Bodens [J/s/cm/°C]

A = Fließquerschnitt [cm²]

ΔT = Temperaturdifferenz zwischen zwei Punkten im Boden [°C]

ΔL = Distanz zwischen diesen zwei Punkten [cm]

Für den Wärmefluss in x- bzw. y- und z-Richtung gilt:

$$A_x = dy_{x,y,z} \cdot dz_{x,y,z} \quad [6a]$$

$$A_y = dx_{x,y,z} \cdot dz_{x,y,z} \quad [6b]$$

$$A_z = dx_{x,y,z} \cdot dy_{x,y,z} \quad [6c]$$

$A_{...}$ = Fließquerschnitt in x-, y- bzw. z-Richtung [cm²]

Setzt man nun [3] bis [6] mit den entsprechenden Indizes in [2] ein, erhält man:

$$\begin{aligned} \rho c_{x,y,z} \cdot dx_{x,y,z} \cdot dy_{x,y,z} \cdot dz_{x,y,z} \cdot \frac{\Delta T_{x,y,z}}{\Delta t} = \\ k_{threinx} \cdot dy_{x,y,z} \cdot dz_{x,y,z} \cdot \frac{T_{x-1,y,z} - T_{x,y,z}}{\Delta L_{reinx}} - k_{thrausx} \cdot dy_{x,y,z} \cdot dz_{x,y,z} \cdot \frac{T_{x,y,z} - T_{x+1,y,z}}{\Delta L_{rausx}} + \\ k_{threiny} \cdot dx_{x,y,z} \cdot dz_{x,y,z} \cdot \frac{T_{x,y-1,z} - T_{x,y,z}}{\Delta L_{reiny}} - k_{thrausy} \cdot dx_{x,y,z} \cdot dz_{x,y,z} \cdot \frac{T_{x,y,z} - T_{x,y+1,z}}{\Delta L_{rausy}} + \\ k_{threinz} \cdot dx_{x,y,z} \cdot dy_{x,y,z} \cdot \frac{T_{x,y,z-1} - T_{x,y,z}}{\Delta L_{reinz}} - k_{thrausz} \cdot dx_{x,y,z} \cdot dy_{x,y,z} \cdot \frac{T_{x,y,z} - T_{x,y,z+1}}{\Delta L_{rausz}} \quad [7] \end{aligned}$$

$\Delta T_{x,y,z}$ = Änderung der Temperatur in Segment x,y,z über den Zeitraum Δt [°C]

$k_{threinx}$ = thermische Leitfähigkeit in x-Richtung in das Segment hinein, also von Position x-1 nach x [J/s/cm/°C]

$k_{thrausx}$ = thermische Leitfähigkeit in x-Richtung aus dem Segment heraus, also von Position x nach x+1 [J/s/cm/°C]

$k_{threiny}$ = thermische Leitfähigkeit in y-Richtung in das Segment hinein, also von Position y-1 nach y [J/s/cm/°C]

$k_{thrausy}$ = thermische Leitfähigkeit in y-Richtung aus dem Segment heraus, also von Position y nach y+1 [J/s/cm/°C]

$k_{threinz}$ = thermische Leitfähigkeit in z-Richtung in das Segment hinein, also von Position z-1 nach z [J/s/cm/°C]

$k_{thrausz}$ = thermische Leitfähigkeit in z-Richtung aus dem Segment heraus, also von Position z nach z+1 [J/s/cm/°C]

ΔL_{reinx} = Distanz in x-Richtung zwischen Position x-1,y,z und x,y,z, [cm]

ΔL_{rausx} = Distanz in x-Richtung zwischen Position x,y,z und x+1,y,z [cm]

ΔL_{reiny} = Distanz in y-Richtung zwischen Position x,y-1,z und x,y,z [cm]

ΔL_{rausy} = Distanz in y-Richtung zwischen Position x,y,z und x,y+1,z [cm]

ΔL_{reinz} = Distanz in z-Richtung zwischen Position x,y,z-1 und x,y,z [cm]

ΔL_{rausz} = Distanz in z-Richtung zwischen Position x,y,z und x,y,z+1 [cm]

Die verschiedenen ΔL werden wie folgt berechnet:

$$\Delta L_{\text{reinx}} = \frac{dx_{x-1,y,z}}{2} + \frac{dx_{x,y,z}}{2} \quad [8a]$$

$$\Delta L_{\text{rausx}} = \frac{dx_{x,y,z}}{2} + \frac{dx_{x+1,y,z}}{2} \quad [8b]$$

$$\Delta L_{\text{reiny}} = \frac{dy_{x,y-1,z}}{2} + \frac{dy_{x,y,z}}{2} \quad [8c]$$

$$\Delta L_{\text{rausy}} = \frac{dy_{x,y,z}}{2} + \frac{dy_{x,y+1,z}}{2} \quad [8d]$$

$$\Delta L_{\text{reinz}} = \frac{dz_{x,y,z-1}}{2} + \frac{dz_{x,y,z}}{2} \quad [8e]$$

$$\Delta L_{\text{rausz}} = \frac{dz_{x,y,z}}{2} + \frac{dz_{x,y,z+1}}{2} \quad [8f]$$

Teilt man beide Seiten von [7] durch $\rho c_{x,y,z} \cdot dx_{x,y,z} \cdot dy_{x,y,z} \cdot dz_{x,y,z}$, erhält man:

$$\begin{aligned} \frac{\Delta T_{x,y,z}}{\Delta t} = & \frac{k_{\text{threinx}}}{\rho c_{x,y,z}} \cdot \frac{T_{x-1,y,z} - T_{x,y,z}}{dx_{x,y,z} \cdot \Delta L_{\text{reinx}}} - \frac{k_{\text{thrausx}}}{\rho c_{x,y,z}} \cdot \frac{T_{x,y,z} - T_{x+1,y,z}}{dx_{x,y,z} \cdot \Delta L_{\text{rausx}}} + \\ & \frac{k_{\text{threiny}}}{\rho c_{x,y,z}} \cdot \frac{T_{x,y-1,z} - T_{x,y,z}}{dy_{x,y,z} \cdot \Delta L_{\text{reiny}}} - \frac{k_{\text{thrausy}}}{\rho c_{x,y,z}} \cdot \frac{T_{x,y,z} - T_{x,y+1,z}}{dy_{x,y,z} \cdot \Delta L_{\text{rausy}}} + \\ & \frac{k_{\text{threinz}}}{\rho c_{x,y,z}} \cdot \frac{T_{x,y,z-1} - T_{x,y,z}}{dz_{x,y,z} \cdot \Delta L_{\text{reinz}}} - \frac{k_{\text{thrausz}}}{\rho c_{x,y,z}} \cdot \frac{T_{x,y,z} - T_{x,y,z+1}}{dz_{x,y,z} \cdot \Delta L_{\text{rausz}}} \end{aligned} \quad [9]$$

Man beachte, dass der Quotient $k_{\text{th}}/\rho c$, der in [9] sechsmal vorkommt, als thermische Diffusivität (D_{th}) definiert ist, also:

$$D_{\text{th}} = \frac{k_{\text{th}}}{\rho c} \quad [10]$$

Die thermische Diffusivität wird in Anhang 2 ausführlich besprochen.

Wenn man [10] mit den entsprechenden Indizes in [9] verwendet und darin außerdem Δt auf die rechte Seite schiebt und die Variablen etwas anders sammelt, ergibt sich:

$$\begin{aligned} \Delta T_{x,y,z} = & \frac{D_{\text{threinx}} \cdot \Delta t}{dx_{x,y,z} \cdot \Delta L_{\text{reinx}}} \cdot (T_{x-1,y,z} - T_{x,y,z}) - \frac{D_{\text{thrausx}} \cdot \Delta t}{dx_{x,y,z} \cdot \Delta L_{\text{rausx}}} \cdot (T_{x,y,z} - T_{x+1,y,z}) + \\ & \frac{D_{\text{threiny}} \cdot \Delta t}{dy_{x,y,z} \cdot \Delta L_{\text{reiny}}} \cdot (T_{x,y-1,z} - T_{x,y,z}) - \frac{D_{\text{thrausy}} \cdot \Delta t}{dy_{x,y,z} \cdot \Delta L_{\text{rausy}}} \cdot (T_{x,y,z} - T_{x,y+1,z}) + \\ & \frac{D_{\text{threinz}} \cdot \Delta t}{dz_{x,y,z} \cdot \Delta L_{\text{reinz}}} \cdot (T_{x,y,z-1} - T_{x,y,z}) - \frac{D_{\text{thrausz}} \cdot \Delta t}{dz_{x,y,z} \cdot \Delta L_{\text{rausz}}} \cdot (T_{x,y,z} - T_{x,y,z+1}) \end{aligned} \quad [11]$$

D_{threinx} = thermische Diffusivität in x-Richtung zwischen Position $x-1,y,z$ und x,y,z , [cm^2/s]

D_{thrausx} = thermische Diffusivität in x-Richtung zwischen Position x,y,z und $x+1,y,z$, [cm^2/s]

D_{threiny} = thermische Diffusivität in y-Richtung zwischen Position $x,y-1,z$ und x,y,z , [cm^2/s]

D_{thrausy} = thermische Diffusivität in y-Richtung zwischen Position x,y,z und $x,y+1,z$, [cm^2/s]

D_{threinz} = thermische Diffusivität in z-Richtung zwischen Position $x,y,z-1$ und x,y,z , [cm^2/s]

D_{thrausz} = thermische Diffusivität in z-Richtung zwischen Position x,y,z und $x,y,z+1$, [cm^2/s]

Der besseren Übersicht halber kann man die Brüche in [11] wie folgt definieren:

$$\lambda_{\text{reinx}} = \frac{D_{\text{threinx}} \cdot \Delta t}{dx_{x,y,z} \cdot \Delta L_{\text{reinx}}} \quad [12a]$$

$$\lambda_{\text{rausx}} = \frac{D_{\text{thrausx}} \cdot \Delta t}{dx_{x,y,z} \cdot \Delta L_{\text{rausx}}} \quad [12b]$$

$$\lambda_{\text{reiny}} = \frac{D_{\text{threiny}} \cdot \Delta t}{dy_{x,y,z} \cdot \Delta L_{\text{reiny}}} \quad [12c]$$

$$\lambda_{\text{rausy}} = \frac{D_{\text{thrausy}} \cdot \Delta t}{dy_{x,y,z} \cdot \Delta L_{\text{rausy}}} \quad [12d]$$

$$\lambda_{\text{reinz}} = \frac{D_{\text{threinz}} \cdot \Delta t}{dz_{x,y,z} \cdot \Delta L_{\text{reinz}}} \quad [12e]$$

$$\lambda_{\text{rausz}} = \frac{D_{\text{thrausz}} \cdot \Delta t}{dz_{x,y,z} \cdot \Delta L_{\text{rausz}}} \quad [12f]$$

Der Gebrauch von [12a bis f] vereinfacht [11] zu:

$$\begin{aligned} \Delta T_{x,y,z} = & \lambda_{\text{reinx}} \cdot (T_{x-1,y,z} - T_{x,y,z}) - \lambda_{\text{rausx}} \cdot (T_{x,y,z} - T_{x+1,y,z}) + \\ & \lambda_{\text{reiny}} \cdot (T_{x,y-1,z} - T_{x,y,z}) - \lambda_{\text{rausy}} \cdot (T_{x,y,z} - T_{x,y+1,z}) + \\ & \lambda_{\text{reinz}} \cdot (T_{x,y,z-1} - T_{x,y,z}) - \lambda_{\text{rausz}} \cdot (T_{x,y,z} - T_{x,y,z+1}) \end{aligned} \quad [13]$$

Nun muss ein Zeitindex t eingeführt werden. Man erinnere sich (vgl. [7]), dass das ΔT auf der linken Seite von [13] für die Änderung der Temperatur im Segment x,y,z über den Zeitraum Δt steht. Das bedeutet:

$$\Delta T_{x,y,z} = T_{x,y,z}^{t+\Delta t} - T_{x,y,z}^t \quad [14]$$

$T_{x,y,z}^{t+\Delta t}$ = Temperatur im Segment x,y,z zum Zeitpunkt $t+\Delta t$, also in der Zukunft [$^{\circ}\text{C}$]

$T_{x,y,z}^t$ = Temperatur im Segment x,y,z zum Zeitpunkt t , also in der Gegenwart [$^{\circ}\text{C}$]

Setzt man nun [14] in [13] ein und versieht gleichzeitig die T 's auf der rechten Seite mit dem Zeitindex t erhält man:

$$\begin{aligned} T_{x,y,z}^{t+\Delta t} - T_{x,y,z}^t = & \lambda_{\text{reinx}} \cdot (T_{x-1,y,z}^t - T_{x,y,z}^t) - \lambda_{\text{rausx}} \cdot (T_{x,y,z}^t - T_{x+1,y,z}^t) + \\ & \lambda_{\text{reiny}} \cdot (T_{x,y-1,z}^t - T_{x,y,z}^t) - \lambda_{\text{rausy}} \cdot (T_{x,y,z}^t - T_{x,y+1,z}^t) + \end{aligned}$$

$$\lambda_{\text{reinz}} \cdot (T_{x,y,z-1}^t - T_{x,y,z}^t) - \lambda_{\text{rausz}} \cdot (T_{x,y,z}^t - T_{x,y,z+1}^t) \quad [15]$$

Die λ 's erhalten keinen Zeitindex, da hier davon ausgegangen wird, dass sie sich während eines Brandereignisses nicht ändern (auch wenn sie das bei einem Brand stellenweise wahrscheinlich tun, weil sich D_{th} durch die Verdunstung von Bodenwasser ändert). Als nächstes werden nun die Klammern ausmultipliziert und $T_{x,y,z}^t$ auf die rechte Seite gerückt:

$$\begin{aligned} T_{x,y,z}^{t+\Delta t} = & \lambda_{\text{reinx}} \cdot T_{x-1,y,z}^t - \lambda_{\text{reinx}} \cdot T_{x,y,z}^t - \lambda_{\text{rausx}} \cdot T_{x,y,z}^t + \lambda_{\text{rausx}} \cdot T_{x+1,y,z}^t + \\ & \lambda_{\text{reiny}} \cdot T_{x,y-1,z}^t - \lambda_{\text{reiny}} \cdot T_{x,y,z}^t - \lambda_{\text{rausy}} \cdot T_{x,y,z}^t + \lambda_{\text{rausy}} \cdot T_{x,y+1,z}^t + \\ & \lambda_{\text{reinz}} \cdot T_{x,y,z-1}^t - \lambda_{\text{reinz}} \cdot T_{x,y,z}^t - \lambda_{\text{rausz}} \cdot T_{x,y,z}^t + \lambda_{\text{rausz}} \cdot T_{x,y,z+1}^t + \\ & T_{x,y,z}^t \end{aligned} \quad [16]$$

Daraus wird nach einer Umstellung schließlich die explizite numerische Lösung der dreidimensionalen Wärmetransportgleichung [1]:

$$\begin{aligned} T_{x,y,z}^{t+\Delta t} = & \lambda_{\text{reinx}} \cdot T_{x-1,y,z}^t + \lambda_{\text{rausx}} \cdot T_{x+1,y,z}^t + \lambda_{\text{reiny}} \cdot T_{x,y-1,z}^t + \lambda_{\text{rausy}} \cdot T_{x,y+1,z}^t + \lambda_{\text{reinz}} \cdot T_{x,y,z-1}^t + \lambda_{\text{rausz}} \cdot T_{x,y,z+1}^t \\ & - (\lambda_{\text{reinx}} + \lambda_{\text{rausx}} + \lambda_{\text{reiny}} + \lambda_{\text{rausy}} + \lambda_{\text{reinz}} + \lambda_{\text{rausz}} - 1) \cdot T_{x,y,z}^t \end{aligned} \quad [17]$$

Der Vollständigkeit halber sei hier noch angemerkt, dass die Gleichungen zur expliziten numerischen Berechnung eines zweidimensionalen Wärmetransports genau so hergeleitet werden wie die für einen dreidimensionalen Transport, außer dass man dabei eine Dimension (z.B. die y-Richtung) weglässt. Die analoge Gleichung zu [17] für die explizite numerische Lösung der zweidimensionalen Wärmetransportgleichung lautet somit:

$$\begin{aligned} T_{x,z}^{t+\Delta t} = & \lambda_{\text{reinx}} \cdot T_{x-1,z}^t + \lambda_{\text{rausx}} \cdot T_{x+1,z}^t + \lambda_{\text{reinz}} \cdot T_{x,z-1}^t + \lambda_{\text{rausz}} \cdot T_{x,z+1}^t \\ & - (\lambda_{\text{reinx}} + \lambda_{\text{rausx}} + \lambda_{\text{reinz}} + \lambda_{\text{rausz}} - 1) \cdot T_{x,z}^t \end{aligned} \quad [18]$$

Die darin verbliebenen λ 's werden mit [12a,b,e,f] berechnet, die in den λ 's enthaltenen Variablen mit den entsprechenden zuvor aufgeführten Gleichungen.

Wenn man außer der y- auch noch die x-Dimension in [17] weglässt, erhält man die Lösungsgleichung für den eindimensionalen Wärmetransport in die Tiefe:

$$T_z^{t+\Delta t} = \lambda_{\text{reinz}} \cdot T_{z-1}^t + \lambda_{\text{rausz}} \cdot T_{z+1}^t - (\lambda_{\text{reinz}} + \lambda_{\text{rausz}} - 1) \cdot T_z^t \quad [19a]$$

Sie wird üblicherweise etwas anders geschrieben:

$$T_z^{t+\Delta t} = \lambda_{\text{reinz}} \cdot T_{z-1}^t - (\lambda_{\text{reinz}} + \lambda_{\text{rausz}} - 1) \cdot T_z^t + \lambda_{\text{rausz}} \cdot T_{z+1}^t \quad [19b]$$

Das ist die Basis für das 1D-Modell von Hagenau und Borg (2019).]

3.2.2 Kurze Beschreibung des Lösungswegs

Explizite Lösung bedeutet, dass man die neue Temperatur in einem Segment x,y,z ($T_{x,y,z}^{t+\Delta t}$) direkt aus seiner alten Temperatur ($T_{x,y,z}^t$) und der alten Temperatur des Segments links davon ($x-1,y,z$), rechts davon ($x+1,y,z$), davor ($x,y-1,z$), dahinter ($x,y+1,z$), darüber ($x,y,z-1$) und darunter ($x,y,z+1$) sowie der thermischen Diffusivität dieser sechs Segmente, die im jeweiligen λ enthalten ist, berechnen kann.

Weil man für die Berechnung von ($T_{x,y,z}^{t+\Delta t}$) die Temperatur des Elements, rechts und links, vor und hinter sowie über und unter dem Element x,y,z braucht, kann man für die Randelemente keine neue Temperatur nach einem Zeitschritt Δt berechnen, weil am Rand, je nach Position, ein bis drei der eben angesprochenen Elemente fehlen. Man muss sie daher für jeden Zeitpunkt vorgeben, wie oben schon erwähnt.

Die grundsätzliche Vorgehensweise für die Berechnungen mit [17] ist folgende: Zunächst werden für die Scheibe $z = 1$ die neuen Temperaturen für die Zeit $t+\Delta t$ ($T_{x,y,z}^{t+\Delta t}$) auf Basis der Temperaturen zur Zeit t ($T_{x,y,z}^t$) für alle inneren Segmente berechnet. Dann wird das Gleiche für die darunter liegende Scheibe $z = 2$ gemacht usw., bis zur Scheibe $z = n$. Die gerade neu berechneten Temperaturen sind dann die Basis für die Berechnungen der Temperaturen für die Zeit $t+2\Delta t$, usw., bis zum Ende des Betrachtungszeitraums.

Bei der Simulation von Waldbränden ist eine gute Ausgangsposition für die Berechnungen, also der Ort wo zuerst eine neue Temperatur für die Zeit $t+\Delta t$ berechnet wird, die Position $x = 1, y = 1, z = 1$. Dann geht es weiter zur Position $x = 2, y = 1, z = 1$ etc. bis zur Position $x = k, y = 1, z = 1$. Als nächstes wird zur nächsten y -Reihe weitergegangen, also zu $x = 1, y = 2, z = 1$ in der dann wieder alle x -Positionen bis $x = k, y = 2, z = 1$ abgearbeitet werden. Dann folgt die nächste y -Reihe usw. bis $y = m$. Wenn eine Scheibe abgearbeitet ist, geht es zur nächsten bis $z = n$ erreicht ist. Wenn man an der letzten Position dort angekommen ist ($x = k, y = m, z = n$), ist der Durchlauf für einen Zeitschritt Δt beendet und es geht zum nächsten.

Soll zusammen mit dem Brand an der Bodenoberfläche noch eine brennende Wurzel simuliert werden (oder etwas anderes, was in den Boden hineinreicht), werden die Segmente mit Wurzel, z.B. $x = 5$ und $y = 8$ in den Scheiben $z = 1$ bis $z = 4$, wie Randsegmente behandelt. Dort müssen also die Temperatur und die thermische Diffusivität für jeden Zeitpunkt vorgegeben werden und bei einem Durchlauf wie eben beschrieben werden für diese Positionen keine neuen Temperaturen berechnet, bis das Feuer in der Wurzel

erloschen ist. Dann werden auch für die Wurzelsegmente die Temperatur bei jedem Zeitschritt neu berechnet.

Das Computerprogramm, das auf Basis der obigen Gleichungen geschrieben wurde, ist in einem separaten Text aufgelistet und erläutert.

In den folgenden Modellrechnungen wird immer von einem worst-case-Szenario ausgegangen. Zum einen erleichtert das die Berechnungen, weil man einige komplizierte Prozesse, wie z.B. die Verdunstung von Wasser aus dem Boden infolge der Brandwärme, was zu einer Verringerung der thermischen Diffusivität und damit der Temperaturlausbreitung führt, nicht berücksichtigen muss. Zum anderen ist man auf der sicheren Seite, weil die berechneten Temperaturen dann die Obergrenze des Wahrscheinlichen darstellen, was bei der Frage, ob im Boden befindliche Munition explodieren könnte, von großer Bedeutung ist.

3.3. Modellrechnungen zur Wärmeausbreitung in einem Boden mit dem 3D-Computerprogramm aus Kapitel 3.2 unter einem flächenhaften (Wald)Brand an der Bodenoberfläche in Kombination mit einem Wurzelbrand im Boden

3.3.1 Modellaufbau

Bei einem Waldbrand kann es vorkommen, dass eine Baumwurzel in Brand gesetzt wird. Dieser Brand kann sich dann entlang der Wurzel nach unten ausbreiten. Auf diese Weise kann Brandwärme in Tiefen vordringen, die von einem Brand nur an der Bodenoberfläche nicht erreicht werden würden. Hier soll nun mithilfe des 3D-Computerprogramms aus Kapitel 3.2 untersucht werden, welche Temperaturen dadurch in unterschiedlichen Tiefen erreicht werden können und ob diese hoch genug sind, um dort befindliche Munition zur Explosion zu bringen.

Für die Berechnungen wird ein Bodenprofil mit je 100 cm in x- und y-Richtung sowie 160 cm in z-Richtung verwendet, plus je 2 cm rechts, links, vorne, hinten und unten für die Randsegmente. In Probeläufen zeigte sich, dass diese Maße groß genug sind, damit die Randbedingungen die Temperatureausbreitung nicht beeinflussen. Oben wird ein Randsegment von 0,2 cm Dicke verwendet.

In x- und y-Richtung wird das Profil in gleich große Segmente von jeweils $dx = 2$ cm, und $dy = 2$ cm unterteilt. Das ergibt je 50 innere Segmente in x- und y-Richtung. In z-Richtung werden oben zunächst kleinere Segmentdicken verwendet (siehe Programmbeschreibung), um den Wärmeverlust durch Abstrahlung nach Ende des Feuers an der Bodenoberfläche präziser zu simulieren. Ab 10 cm Tiefe wird dann ebenfalls eine Segmentdicke von 2 cm angesetzt. In z-Richtung gibt es dadurch 87 innere Segmente und im Profil insgesamt $50 \times 50 \times 87 = 217.500$ innere Segmente bzw. Knotenpunkte. Jedem Segment wird die gleiche thermische Diffusivität ($D_{th} = 0,007$ cm²/s) und die gleiche Ausgangstemperatur (20°C) zugeordnet.

Weiterhin werden folgende von der Wurzel unabhängige Bedingungen festgelegt:

Lufttemperatur:	20°C
Brandtemperatur an der Oberfläche:	800°C
Branddauer an der Oberfläche:	1 h
Dauer der Simulationslaufs:	10 h
Zeitschritt (Δt):	1 s

Die Wurzel wird in die Mitte der 100 cm x 100 cm großen Fläche gesetzt, als Wurzeltiefe werden 100 cm angenommen, ausgehend von der Bodenoberfläche und senkrecht nach unten.

Im Hinblick auf die Wurzel sind noch folgende Punkte zu klären:

- Wie schnell breitet sich der Brand in der Wurzel nach unten aus?
- Wie mit welcher Temperatur brennt die Wurzel?
- Wie lange brennt die Wurzel?

Eine Wurzel beginnt nahe der Bodenoberfläche zu brennen, wonach der Brand sich dann in der Wurzel nach unten ausbreitet. Wie schnell die Ausbreitung vonstatten geht ist unklar. In der Literatur gibt es dazu keine brauchbaren Daten. Man könnte diesbezüglich theoretische Annahmen machen, aber wie realistisch sie sind ließe sich nicht mit Daten belegen. Im Sinne einer worst-case-Betrachtung ist es sinnvoller einfach davon auszugehen, dass die Wurzel ohne Zeitverzögerung von oben bis unten in Brand gerät, weil dann die Ergänzung der Wärme vom Brand an der Bodenoberfläche sofort stattfindet und nicht erst wenn der Oberflächenbrand bereits erloschen bzw. weitergezogen ist. Das wird hier so umgesetzt.

Bei dem Eindringen eines Brandes in eine Wurzel handelt es sich um einen Schmelbrand. Dieser ist allgemein durch geringe Sauerstoffzufuhr und vergleichsweise niedrige Temperaturen gekennzeichnet. Zur Frage mit welcher Temperatur eine Wurzel brennt, gibt es einige Daten aus denen man hierzu Rückschlüsse ziehen kann. Als Maximum kann man von 500°C ausgehen. Dieser Wert wird hier verwendet.

Wie lange eine Wurzel brennt hängt davon ab, wie viel Brennstoff sie enthält und wie hoch dessen Heizwert (H_w) ist. Das Produkt aus Brennstoffmenge und Heizwert ergibt die Energiemenge, die in einer Wurzel gespeichert ist. Eine Wurzel hört auf zu brennen, wenn die gesamte gespeicherte Energie an die Umgebung abgegeben wurde. Diese Energiemenge wird nun hergeleitet und letztlich in Tabelle 2 für verschiedene Wurzeldurchmesser aufgelistet.

Der Brennstoff ist Holz, dessen Menge ist die Masse bzw. das Volumen der Wurzel (Tabelle 2, Spalte 5). Der Heizwert wird von der Art des Holzes und dessen Wassergehalt bestimmt. Völlig trockenes Holz (0% Wassergehalt) hat einen Heizwert von $H_{WM} \approx 18700$ kJ/kg, wobei die Unterschiede zwischen verschiedenen Holzarten gering sind, wenn der Heizwert auf die Masse bezogen wird (H_{WM}), worauf gleich noch einmal eingegangen wird. Unter natürlichen Bedingungen gibt es allerdings kein völlig trockenes Holz, sondern maximal lufttrockenes, wo der Wassergehalt typischerweise ca. 15% beträgt. Der entsprechende Brennwert liegt dann bei $H_{WM} \approx 15200$ kJ/kg.

Eine Wurzel im Boden, auch eine abgestorbene, ist feuchter als lufttrocken, da selbst in einem sehr trockenen Boden die relative Luftfeuchtigkeit $> 95\%$ beträgt. Dennoch wird hier im Sinne einer worst-case-Betrachtung der Heizwert von lufttrockenem Holz herangezogen.

Für die folgenden Berechnungen ist es sinnvoller, den Heizwert einer Wurzel nicht pro kg Wurzelmasse (H_{WM}), sondern pro Volumen (H_{WV}) zu verwenden. Dazu muss H_{WM} mit der

Rohdichte von völlig trockenem Holz (ρ_{tr}) multipliziert werden, d.h. $H_{WV} = H_{WM} \cdot \rho_{tr}$. Die Rohdichte variiert sehr stark zwischen den verschiedenen Holzarten. Für Fichtenholz am unteren Ende der Werte ist $\rho_{tr} = 440 \text{ kg/m}^3$, für Eichenholz am oberen Ende ist $\rho_{tr} = 740 \text{ kg/m}^3$. Daraus ergibt sich für luftgetrocknetes Fichtenholz:

$$H_{WV} = 15200 \text{ kJ/kg} \cdot 440 \text{ kg/m}^3 = 6.688.000 \text{ kJ/m}^3 = 6,688 \text{ kJ/cm}^3$$

und für luftgetrocknetes Eichenholz:

$$H_{WV} = 15200 \text{ kJ/kg} \cdot 740 \text{ kg/m}^3 = 11.248.000 \text{ kJ/m}^3 = 11,248 \text{ kJ/cm}^3$$

Während der Heizwert je Masseneinheit für alle Holzarten sehr ähnlich ist, gibt es also erhebliche Unterschiede, wenn er auf das Wurzelvolumen bezogen wird. Wiederum im Sinne einer worst-case-Betrachtung wird hier der Wert für Eichenholz verwendet.

Das Produkt aus der Brennstoffmenge (Spalte 5 in Tabelle 2) und dem eben hergeleiteten Heizwert von $H_{WV} = 11,248 \text{ kJ/cm}^3$ ergibt nun die in einer luftgetrockneten Eichenwurzel gespeicherte Energie (Tabelle 2, Spalte 6).

Tabelle 2: Gespeicherte Energie für luftgetrocknete Eichenwurzeln (E_s) verschiedener Durchmesser (D) je cm Wurzellänge (L).

$$U = \text{Umfang der Wurzel} = \pi \cdot D$$

$$A_q = \text{Querschnittsfläche der Wurzel} = \pi \cdot D^2/4$$

$$A_{ea} = \text{Fläche, durch die eine Wurzel von 1 cm Länge Energie abgibt} = U \cdot L,$$

$$V = \text{Volumen der Wurzel bei 1 cm Wurzellänge} = A_q \cdot L,$$

$$E_s = V \cdot H_{WV} = \pi \cdot D^2/4 \cdot L \cdot 11,248$$

D [cm]	U [cm]	A _q [cm ²]	A _{ea} [cm]	V [cm ³]	E _s [kJ]
1	3,14	0,78	3,14	0,78	8,8
2	6,28	3,14	6,28	3,14	35,3
3	9,42	7,07	9,42	7,07	79,5
4	12,56	12,57	12,56	12,57	141,3
5	15,71	19,64	15,71	19,64	220,9

Mithilfe von Gleichung [5] aus Kapitel 3.2.1 in etwas abgewandelter Form:

$$H = k_{th} \cdot A_{ea} \cdot \frac{T_w - T_b}{\Delta L} \quad [20]$$

T_w = Temperatur, mit der die Wurzel brennt [°C]

T_b = Temperatur des angrenzenden Bodens [°C]

kann man einige grundlegende Aussagen dazu treffen, wie sich A_{ea} , E_s und T_w darauf auswirken, wie schnell die gespeicherte Energie abgegeben wird und wie lange eine Wurzel daher brennt.

Gleichung [20] besagt, dass die Energieabgabe H mit der Fläche A_{ea} , durch die Energie abgegeben wird, zunimmt. A_{ea} wiederum nimmt linear mit dem Durchmesser der Wurzel zu (siehe Legende Tabelle 2). Eine 5 cm dicke Wurzel gibt daher Energie über eine 5mal größere Fläche ab als eine Wurzel die nur 1 cm dick ist (Spalte 4). Sie verliert also die gespeicherte Energie 5mal schneller. Allerdings nimmt das Volumen einer Wurzel (Spalte 5) mit dem Quadrat ihres Durchmessers zu (siehe Legende Tabelle 2), so dass bei einer Verfünffachung des Durchmessers die gespeicherte Energiemenge um das 25fache größer ist (Spalte 6). Das bedeutet letztlich, dass eine 5 cm dicke Wurzel 5mal länger brennt als eine 1 cm dicke.

Gleichung [20] besagt außerdem, dass die Energieabgabe H mit der Differenz $T_w - T_b$ ansteigt. Je höher also die Temperatur ist mit der eine Wurzel brennt, desto kürzer ist die Branddauer. Hier ist zu bedenken, dass T_b nicht konstant bleibt, sondern in Laufe des Wurzelbands durch Abgabe von Wärme (Energie) aus der brennenden Wurzel ansteigt. Das ändert aber nichts an der grundsätzlichen Aussage, dass mit steigender Brandtemperatur die Branddauer abnimmt.

Im oberen Bereich des Bodenprofils wird die Bodentemperatur zusätzlich durch die Wärme aus dem Brand an der Bodenoberfläche erhöht, so dass dort um die Wurzel herum höhere Temperaturen vorliegen und damit ein geringeres Temperaturgefälle ($T_w - T_b$) entsteht als weiter unten im Profil, wo sich der Brand an der Bodenoberfläche nicht mehr auswirkt. Dementsprechend brennt die Wurzel oben länger.

Unten im Profil, wo die Wurzel endet, verliert sie nicht nur lateral Energie, also in x- und y-Richtung, sondern auch vertikal nach unten, also in z-Richtung. Das führt dazu, dass die Bodentemperaturen um die Wurzel herum dort niedriger sind als etwas weiter oben, wo nur ein lateraler Energieverlust stattfindet. Hier brennt die Wurzel daher weniger lang.

Da hier mit finiten Differenzen gearbeitet wird, kann das Bodenprofil nur in eckige Segmente unterteilt werden, hier meist von je 2 x 2 x 2 cm Größe. Dementsprechend muss man auch die Wurzel mit eckigen Segmenten erfassen. Im Folgenden wird angenommen, dass eine ziemlich große Wurzel mit 4 x 4 cm Kantenlänge in der Mitte des Profils in Brand gerät. Für diese ergibt sich damit $A_q = 16 \text{ cm}^2$, $A_{ea} = 16 \text{ cm}^2$ für 1 cm Wurzellänge und $E_s = 180 \text{ kJ}$, was etwa den Werten für eine runde Wurzel zwischen 4 und 5 cm Durchmesser entspricht.

Die Segmente mit Wurzel werden zunächst wie Randsegmente behandelt, d.h. ihre Temperatur bleibt konstant bei der für die Wurzel vorgegebenen Brandtemperatur. Nach jedem Zeitschritt wird mit Gleichung [20] ermittelt, wie viel Energie ein Wurzelsegment abgegeben hat bzw. wie viel noch darin gespeichert ist. Solange noch Energie vorhanden ist, behält das Segment die Brandtemperatur. Wenn die gesamte Energie aufgebraucht ist, erlischt der Brand. Das wird dadurch simuliert, dass die Wurzelsegmente dann wie innere

Segmente behandelt werden, für die in jedem Zeitschritt eine neue Temperatur aus den umliegenden Segmenten berechnet wird (siehe Gleichung [17]).

Wenn man diese Vorgehensweise strikt anwendet, ergeben sich unterschiedliche Branddauern entlang der Wurzel. Diese sind aber nur begrenzt realistisch, weil unter anderem Daten zur korrekten Modellierung der Wärmeleitung innerhalb der Wurzel fehlen. Außerdem wird mangels besserer Daten angenommen, dass die Wurzel in jeder Tiefe zur gleichen Zeit zu brennen anfängt, was nicht zutrifft. Unterschiedliche Branddauern zu berechnen führt daher nicht zu genaueren Ergebnissen. Aus diesem Grund wird hier nur die Branddauer für den Bereich ermittelt, wo sich der Brand an der Oberfläche nicht auf die Bodentemperaturen auswirkt und nur lateraler Wärmeverlust stattfindet. Diese Dauer wird dann für die Wurzelsegmente in allen Tiefen verwendet.

3.3.2 Ergebnisse

In dem hier entwickelten und verwendeten Modell kann für jedes Segment eine andere thermische Diffusivität und eine andere Ausgangstemperatur verwendet werden, aber es wurde hier jedem Segment die gleiche thermische Diffusivität und, außer an der Bodenoberfläche und in der Wurzel, die gleiche Ausgangstemperatur zugeordnet. Die Wurzel kann an jeder beliebigen x,y-Position platziert werden. In den Berechnungen hier wurde sie in die Mitte des Bodenprofils gesetzt. Diese Positionierung, gepaart mit den einheitlichen D_{th} - und Ausgangswerten für die Temperatur hat zur Folge, dass die berechneten Bodentemperaturen von der Wurzel aus gesehen nach rechts, links, vorne und hinten gleich sind. Das ist in Abbildung A5 in Anhang 3 illustriert. Wegen dieser Symmetrie genügt es, die Ergebnisse lediglich in einer Richtung von der Wurzel bis zum Rand des Bodenprofils zu zeigen, allerdings für verschiedene Bodentiefen.

In der Darstellung der Ergebnisse wird die berechnete Temperatur in den einzelnen Segmenten gezeigt, allerdings nicht für das gesamte Bodenprofil, sondern nur für den Teil, der notwendig ist, um die Auswirkungen des Brandgeschehens an der Bodenoberfläche bzw. in der Wurzel auf die Bodentemperaturen deutlich zu machen. Weiterhin werden für die oberen 10 cm des Profils, das in kleinere Segmentdicken unterteilt wurde als der Rest, nur die Werte für 1, 3, 5, 7, und 9 cm Tiefe gezeigt, damit die vertikalen Abstände durchgehend gleich sind. Die eben genannten und alle weiteren Tiefenangaben in den Abbildungen geben die Entfernung des Mittelpunkts des jeweiligen Segments von der Bodenoberfläche an.

Die farbliche Differenzierung hat folgenden Hintergrund: Bei Temperaturen $> 300^{\circ}\text{C}$ (rot) wird letztlich für alle wesentlichen Initialsprengstoffe der Verpuffungspunkt erreicht bzw. überschritten (Preetz und Borg, 2023), d.h. jegliche Munition kann explodieren. Viele Initialsprengstoffe explodieren allerdings schon im Temperaturbereich $141 - 300^{\circ}\text{C}$ (orange).

Die untere Grenze von 141°C ist hier von besonderer Bedeutung, weil sie knapp über dem Verpuffungspunkt von Tetrazen liegt, dem Initialsprengstoff mit der niedrigsten Verpuffungstemperatur (siehe Kapitel 2.3). Wichtig an dem Bereich 81 - 140 (gelb) ist der obere Wert, der genau der Verpuffungstemperatur von Tetrazen entspricht und hier als der kritische Wert behandelt wird. Man kann mit finiten Differenzen nur die Temperatur an den Knotenpunkten berechnen, aber nicht den Ort, wo eine bestimmte Temperatur (z.B. 140°C) erreicht wird. In einigen wenigen Fällen kann der für einen Knotenpunkt berechnete Wert tatsächlich 140°C betragen. In den meisten Fällen wird er aber darunter oder darüber liegen. Der Abstand von der Bodenoberfläche bzw. der Wurzel, wo 140°C erreicht werden, liegt daher zwischen dem letzten orange markierten und dem ersten gelb markierten Knotenpunkt.

Die untere Grenze des gelben Bereichs (81°C) ebenso wie die obere Grenze des nächsten Bereichs 41 - 80°C (hellblau) haben keine fachliche Bedeutung, wohl aber die untere Grenze von 41°C, weil ab dann die Temperaturen sehr kritisch für Bodenlebewesen werden.

Mit mittelblau unterlegt sind die Segmente, wo die Temperatur durch das Brandgeschehen deutlich auf 25 - 40°C angehoben wurde, aber die Werte weitgehend unkritisch sind.

In den dunkelblauen Segmenten (21 - 24°C) ist noch ein Einfluss des Brandgeschehens zu erkennen, aber er nicht bedeutend.

Alle nicht farblich markierten Segmente werden nicht vom Brandgeschehen berührt.

Abbildungen 9a zeigt die mit den o.g. Eingabewerten berechneten Bodentemperaturen nach 1 Stunde, kurz vor dem Ende des Brands an der Bodenoberfläche. Man kann fünf verschiedene Bereiche erkennen, die auch zu späteren Zeiten zumindest teilweise noch erkennbar sind:

- 1) Im oberen Teil des Bodenprofils und in einiger lateraler Entfernung von der Wurzel hat nur der Brand an der Oberfläche einen Einfluss auf die Bodentemperaturen. Dieser Bereich ist daran zu erkennen, dass sich die Temperaturen ab einer bestimmten lateraler Entfernung von der Wurzel nicht mehr ändern.
- 2) Dichter an der Wurzel im oberen Teil des Bodenprofils haben sowohl der Brand an der Oberfläche als auch der Brand der Wurzel einen Einfluss auf die Bodentemperaturen. Dieser Bereich ist daran zu erkennen, dass die Temperaturen mit lateraler Annäherung an die Wurzel ansteigen und in benachbarten Tiefen unterschiedlich sind. Mit zunehmender Tiefe setzt der Anstieg später ein.
- 3) Im Umfeld der Wurzel im mittleren Teil des Bodenprofils und hat nur der Brand der Wurzel einen Einfluss auf die Bodentemperaturen und das lediglich in lateraler Richtung. Dieser

Bereich ist daran zu erkennen, dass die Temperaturen mit lateraler Annäherung an die Wurzel ansteigen aber in benachbarten Tiefen gleich sind.

- 4) Am Ende der Wurzel weiter unten im Bodenprofil hat der Brand der Wurzel sowohl in lateraler als auch in vertikaler Richtung einen Einfluss auf die Bodentemperaturen. Dieser Bereich ist daran zu erkennen, dass die Temperaturen mit lateraler und vertikaler Annäherung an die Wurzel ansteigen.
- 5) In weiten Teilen des Bodenprofils hat weder der Brand an der Bodenoberfläche noch in der Wurzel einen Einfluss auf die Bodentemperaturen. Dieser Bereich ist daran zu erkennen, dass die Temperaturen bei der Ausgangstemperatur liegen

Nach 1 Stunde beginnt Bereich 1 ab 20 cm Entfernung von der Wurzel und reicht bis in 22 cm Tiefe. Die kritische Temperatur von 140°C wird nur bis in eine Tiefe von etwa 10 cm erreicht bzw. überschritten.

Bereich 2 erstreckt sich 19 cm um die Wurzel herum bis in eine Tiefe von 27 cm. Durch die zusätzliche Energie aus dem Wurzelbrand werden 140°C bis in 16 cm Tiefe erreicht, dort allerdings nur bis 6 cm von der Wurzel entfernt, weiter oben (11 cm Tiefe) bis 10 cm entfernt.

Bereich 3 reicht von 29 bis 87 cm Tiefe und 19 cm um die Wurzel herum. 140°C werden allerdings nur bis etwa 4 cm von der Wurzel erreicht bzw. überschritten.

Bereich 4 erstreckt sich von 89 bis 117 cm Tiefe sowie maximal 17 cm in lateraler Richtung. 140°C werden durch den vertikalen Wärmetransport durch das Ende der Wurzel bis in 102 cm Tiefe erreicht.

Ab 25 cm Tiefe ist von dem Oberflächenbrand ab 119 cm von dem Wurzelbrand nichts mehr zu spüren (Bereich 5).

Etwa 1 Stunde 40 Minuten nach Beginn des Brandgeschehens hat sich der obere Bereich des Profils durch Wärmeabstrahlung inzwischen deutlich abgekühlt. Gleichzeitig erreicht die 140°C-Linie mit rund 12 cm nun ihre größte vertikale Entfernung von der Bodenoberfläche als Folge des Brands dort (Abbildung 9b). Wo sowohl der Oberflächen- als auch der Wurzelbrand wirken, werden 29 cm Tiefe erreicht. Darunter, wo nur der Wurzelbrand wirkt, beträgt die maximale laterale Ausdehnung jetzt etwa 6 cm und nimmt in der Nähe des Wurzelendes ab. Unterhalb der Wurzel erreicht die 140°C-Linie nun 104 cm.

Abbildung 9c zeigt die Temperaturen nach 2 Stunden 20 Minuten, kurz bevor der Wurzelbrand erlischt. Von der obersten Schicht bis in 9 cm Tiefe nimmt der Abstand der 140°C-Linie von der Wurzel bis auf 25 cm zu, danach bis in 27 cm Tiefe auf 7 cm ab. Bis kurz vor das Ende der Wurzel liegt er dann zwischen 5 und 7 cm. Darunter wird er deutlich geringer. Unterhalb der Wurzel liegt die 140°C-Linie weiterhin bei 104 cm.

Abbildung 9d zeigt die Temperaturen nach 2 Stunden 40 Minuten, also einige Minuten nach Ende des Wurzelbrands. Zu diesem Zeitpunkt ist die Wurzel durch Wärmeableitung an den umgebenden Boden bereits deutlich abgekühlt. Auch die Temperaturen im Bodenprofil sind in den meisten Segmenten infolge der Wärmeabstrahlung an der Bodenoberfläche, einer Weiterverteilung von Wärme innerhalb des Profils durch Wärmeleitung oder einer Kombination der beiden Prozesse weiter abgekühlt. Trotz der vorherrschenden Abkühlung hat sich die durch den Wurzelbrand bedingte 140°C-Linie sowohl lateral als auch vertikal stellenweise noch einmal leicht ausgedehnt, nämlich bis auf 7 cm Abstand in 31 cm Tiefe. Im unteren Bereich bzw. unterhalb der Wurzel hat sie sich jedoch zurückgezogen.

Nach 5 Stunden liegen die Temperaturen überall im Bodenprofil unter deutlich 140°C (Abbildung 9e).

Abbildung 9b: Temperaturverteilung im Boden nach 1 h 40 min, zur Zeit der größten Tiefe der 140°C-Grenze ohne Wärme aus dem Wurzelbrand. Wu = Wurzel.

Abstand von der Wurzel [cm]

	Wu	1	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21	23	25	27	29	31	33	35	37	39	41
0	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35
1	500	165	105	90	84	82	80	79	78	78	77	77	77	77	77	77	77	77	77	77	77	77
3	500	307	228	195	179	171	166	163	160	159	158	158	157	157	157	157	157	157	157	157	157	157
5	500	365	295	259	238	226	218	213	209	207	205	205	204	204	204	204	204	204	204	204	204	204
7	500	386	323	284	260	245	234	227	222	219	217	216	215	215	215	215	214	214	214	214	214	214
9	500	387	322	280	252	232	219	210	204	200	197	196	195	195	194	194	194	194	194	194	194	194
11	500	379	308	262	230	208	193	183	176	171	169	167	166	166	165	165	165	165	165	165	165	165
13	500	367	288	236	201	176	159	148	140	135	132	130	129	128	128	128	128	128	128	128	128	128
15	500	355	269	213	174	147	128	116	108	102	99	97	96	95	95	95	95	95	95	95	95	95
17	500	345	254	194	153	124	104	91	82	77	73	71	70	69	69	69	69	69	69	69	69	69
19	500	338	243	180	137	108	87	73	64	58	55	53	51	51	50	50	50	50	50	50	50	50
21	500	334	235	171	127	97	76	61	52	46	42	40	39	38	38	38	38	38	38	38	38	38
23	500	331	231	166	121	90	68	54	45	39	35	33	31	31	30	30	30	30	30	30	30	30
25	500	329	228	162	117	86	64	50	40	34	30	28	27	26	26	26	25	25	25	25	25	25
27	500	328	227	160	115	83	62	47	38	32	28	26	24	24	23	23	23	23	23	23	23	23
29	500	328	226	159	114	82	61	46	36	30	26	24	23	22	22	22	21	21	21	21	21	21
31	500	327	225	159	113	82	60	45	36	29	26	23	22	21	21	21	21	21	21	21	21	21
33	500	327	225	159	113	81	60	45	35	29	25	23	22	21	21	20	20	20	20	20	20	20
35	500	327	225	158	113	81	59	45	35	29	25	23	22	21	21	20	20	20	20	20	20	20
37	500	327	225	158	113	81	59	45	35	29	25	23	22	21	20	20	20	20	20	20	20	20
39	500	327	225	158	113	81	59	45	35	29	25	23	22	21	20	20	20	20	20	20	20	20
41	500	327	225	158	113	81	59	45	35	29	25	23	21	21	20	20	20	20	20	20	20	20
43	500	327	225	158	113	81	59	45	35	29	25	23	21	21	20	20	20	20	20	20	20	20
45	500	327	225	158	113	81	59	45	35	29	25	23	21	21	20	20	20	20	20	20	20	20
47	500	327	225	158	113	81	59	45	35	29	25	23	21	21	20	20	20	20	20	20	20	20
49	500	327	225	158	113	81	59	45	35	29	25	23	21	21	20	20	20	20	20	20	20	20
51	500	327	225	158	113	81	59	45	35	29	25	23	21	21	20	20	20	20	20	20	20	20
53	500	327	225	158	113	81	59	45	35	29	25	23	21	21	20	20	20	20	20	20	20	20
55	500	327	225	158	113	81	59	45	35	29	25	23	21	21	20	20	20	20	20	20	20	20
57	500	327	225	158	113	81	59	45	35	29	25	23	21	21	20	20	20	20	20	20	20	20
59	500	327	225	158	113	81	59	45	35	29	25	23	21	21	20	20	20	20	20	20	20	20
61	500	327	225	158	113	81	59	45	35	29	25	23	21	21	20	20	20	20	20	20	20	20
63	500	327	225	158	113	81	59	45	35	29	25	23	21	21	20	20	20	20	20	20	20	20
65	500	327	225	158	113	81	59	45	35	29	25	23	21	21	20	20	20	20	20	20	20	20
67	500	327	225	158	113	81	59	45	35	29	25	23	21	21	20	20	20	20	20	20	20	20
69	500	327	225	158	113	81	59	45	35	29	25	23	21	21	20	20	20	20	20	20	20	20
71	500	327	225	158	113	81	59	45	35	29	25	23	21	21	20	20	20	20	20	20	20	20
73	500	327	225	158	113	81	59	45	35	29	25	23	21	21	20	20	20	20	20	20	20	20
75	500	327	225	158	113	81	59	45	35	29	25	23	21	21	20	20	20	20	20	20	20	20
77	500	327	225	158	113	81	59	45	35	29	25	23	21	21	20	20	20	20	20	20	20	20
79	500	327	225	158	113	81	59	45	35	29	25	23	21	21	20	20	20	20	20	20	20	20
81	500	327	225	158	112	81	59	44	35	29	25	23	21	21	20	20	20	20	20	20	20	20
83	500	327	225	158	112	81	59	44	35	29	25	23	21	21	20	20	20	20	20	20	20	20
85	500	327	224	157	112	80	59	44	35	29	25	23	21	21	20	20	20	20	20	20	20	20
87	500	326	223	156	111	80	58	44	34	28	25	23	21	21	20	20	20	20	20	20	20	20
89	500	325	222	155	110	79	57	43	34	28	25	23	21	21	20	20	20	20	20	20	20	20
91	500	323	219	153	108	77	56	42	34	28	24	22	21	21	20	20	20	20	20	20	20	20
93	500	320	215	148	104	74	55	41	33	27	24	22	21	21	20	20	20	20	20	20	20	20
95	500	314	208	142	99	71	52	40	32	27	24	22	21	21	20	20	20	20	20	20	20	20
97	500	301	194	132	92	66	49	38	31	26	24	22	21	21	20	20	20	20	20	20	20	20
99	500	272	171	116	82	60	45	35	29	25	23	22	21	20	20	20	20	20	20	20	20	20
101	255	187	133	95	70	52	41	33	28	25	23	21	21	20	20	20	20	20	20	20	20	20
103	149	125	98	75	58	45	36	30	26	24	22	21	21	20	20	20	20	20	20	20	20	20
105	96	86	72	58	47	38	32	28	25	23	22	21	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
107	65	61	53	46	39	33	29	26	23	22	21	21	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
109	47	45	41	37	32	29	26	24	22	21	21	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
111	36	35	33	30	28	26	24	23	22	21	21	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
113	30	29	28	26	25	24	22	22	21	21	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
115	26	25	25	24	23	22	21	21	21	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
117	23	23	23	22	22	21	21	21	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
119	22	22	21	21	21	21	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
121	21	21	21	21	21	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
123	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
125	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
127	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
129	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
131	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
133	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
135	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
137	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
139	20	20	20																			

Wie oben angedeutet, ist es denkbar, dass sich bei einer längeren Branddauer die Wärme weiter ausbreitet als bei einer kürzeren. Um das zu überprüfen wurde außer mit der o.g. maximalen Temperatur in der brennenden Wurzel von $T_w = 500^\circ\text{C}$ noch mit $T_w = 250^\circ\text{C}$ gerechnet. Alle anderen Parameter wurden beibehalten. Abbildung 10a zeigt die Berechnungsergebnisse 1 Stunde 40 Minuten nach Beginn des Brandgeschehens, wo auch hier die größte vertikale Entfernung von der Bodenoberfläche als Folge des Brands dort erreicht wird. In einiger Entfernung von der Wurzel, wo sich nur der Oberflächenbrand auswirkt, sind die gleichen Temperaturen zu sehen wie in Abbildung 9b. Die zusätzliche Temperaturerhöhung durch den Wurzelbrand fällt jetzt wegen der niedrigeren Brandtemperatur aber geringer aus.

Dort, wo nur der Wurzelbrand wirkt, breitet sich die 140°C -Linie maximal nur bis etwa 4 cm lateral von der Wurzel aus. Dieses Maximum wird nach 6 Stunden erreicht, wenige Minuten nach Ende des Wurzelbrands (Abbildung 10b). Das Fazit ist, dass kürzere aber heißere Wurzelbrände kritischer sind als längere aber weniger heiße. Auf eine umfassendere Ergebnisdarstellung wird daher verzichtet.

3.3.3 Bedeutung der Berechnungsergebnisse für das Risiko einer Explosion von Munition

In Preetz und Borg (2023) wurde gezeigt, dass bei einem 800°C heißen Feuer an der Bodenoberfläche die kritischen 140°C nur bis in 13 cm Tiefe erreicht werden. Das deckt sich praktisch mit den Ergebnissen hier, wo die maximale Tiefe bei 12 cm liegt, wenn nur die Auswirkungen des Oberflächenbrands mit 800°C betrachtet werden. (Der kleine Unterschied ergibt sich daraus, dass hier nicht die genau gleichen Segmentdicken verwendet wurden, diese aber die Ergebnisse leicht beeinflussen.) Die zusätzliche Energiezufuhr durch den Wurzelbrand mit 500°C verstärkt die Wirkung des Oberflächenbrands so, dass die 140°C -Linie letztlich 13 bis 32 cm Tiefe erreicht, allerdings nur 14 bzw. 7 cm von der Wurzel entfernt. Dieser Verstärkungseffekt hält sich also in Grenzen.

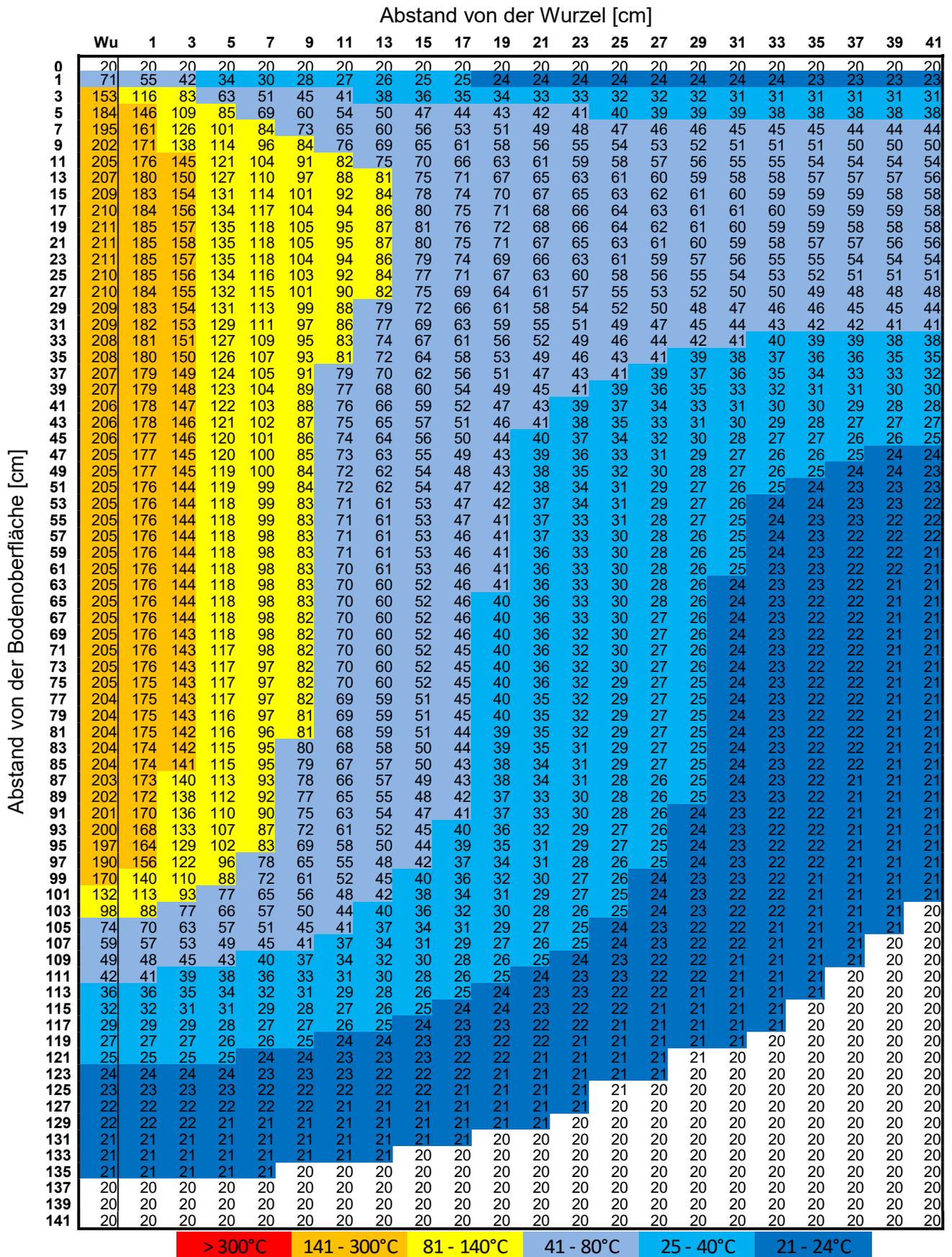
Wesentlich bedeutender ist, was außerhalb des Einflussbereichs des Oberflächenbrands bzw. des Bereichs wo beide Brandherde wirken geschieht: Durch den Brand der Wurzel entsteht bis zu einem Abstand von 6 cm um sie herum und entlang ihres ganzen Verlaufs eine Zone, in der 140°C erreicht bzw. überschritten werden. Bis einige cm unterhalb der Wurzel werden ebenfalls 140°C erreicht. Es kann also nicht ausgeschlossen werden, dass Munition, die dicht an einer Wurzel liegt oder um die eine Wurzel herum gewachsen ist, explodiert, wenn diese Wurzel in Brand gerät. Die Wahrscheinlichkeit, dass das eintritt ist vermutlich nicht sehr hoch, aber eben nicht Null.

Hier wurde eine Wurzel von 1 m Länge betrachtet. Wie man in Abbildung 9 sieht, wurden unterhalb des Einflussbereichs des Oberflächenbrands entlang der Wurzel für jede Tiefe bis

kurz vor das Ende der Wurzel die gleichen Temperaturen berechnet. Für eine längere Wurzel hätten sich die gleichen Temperaturen ergeben, nur eben über eine größere Tiefe. Die berechneten Werte im unteren Bereich und unter der Wurzel wären ebenfalls gleich. Für die Frage, was mit Munition geschieht, die tiefer liegt als die hier betrachtete Wurzel von 1 m Länge, müssen daher keine gesonderten Berechnungen durchgeführt werden.

Mangels geeigneter Daten wurde hier angenommen, dass der Brand der Wurzel an der Bodenoberfläche beginnt und ohne Zeitverzögerung ihr Ende erreicht. Das ist in der Realität nicht so. Wie groß die Zeitverzögerung ist, war der Literatur nicht eindeutig zu entnehmen. Es könnte Stunden oder gar Tage dauern. Die Konsequenz einer Zeitverzögerung für das Risiko einer Explosion von Munition ist, dass in der Nähe einer Wurzel in der Tiefe, wo die Munition liegt, die kritische Temperatur erst erreicht wird, nachdem an der Oberfläche von erhöhten Temperaturen durch einen Brand schon längere Zeit nichts mehr zu spüren ist. Einerseits könnte eine solche Zeitverzögerung dafür sorgen, dass die Brandbekämpfung an der Oberfläche abgeschlossen ist und alle Beteiligten wieder in sicheren Gefilden sind, bevor die Situation tiefer im Boden kritisch werden könnte. Andererseits können Menschen, die den Bereich nach dem Brand unbefugt betreten oder sich der Sachlage nicht bewusst sind, in Gefahr geraten.

Abbildung 10b: Temperaturverteilung im Boden nach 6 h, zur Zeit der größten lateralen Ausdehnung der 140°C-Grenze entlang der Wurzel. Wu = Wurzel.



3.4 Modellrechnungen zur Wärmeausbreitung in einem Boden mit dem 3D-Computerprogramm aus Kapitel 3.2 unter einem flächenhaften (Wald)Brand an der Bodenoberfläche in Kombination mit dem Brand eines Wurzelstocks im Boden

3.4.1 Modellaufbau

Wenn ein Baum abbricht oder gefällt wird, bleibt meist der untere Teil des Baumstamms stehen. Im Zuge eines Waldbrands kann dieser in Brand geraten. Je nach Baumart endet der Stamm an der Bodenoberfläche oder er kann als hier so definierter Wurzelstock (siehe Kapitel 2.2) bis zu 40 cm in den Boden hineinreichen. Ein Brand im oberirdischen Teil eines Baumstamms wirkt sich nicht auf die Bodentemperaturen aus, wohl aber ein Schwelbrand im Wurzelstock.

Wie oben gezeigt, werden bei einem 800°C heißen Feuer an der Bodenoberfläche, das eine Stunde brennt, 140°C nur bis in etwa 12 cm Tiefe erreicht. Wenn ein schwelender Wurzelstock tiefer in den Boden reicht und ausreichend heiß wird hat das zur Folge, dass die 140°C-Grenze tiefer in den Boden geschoben wird, genau wie bei einem Wurzelbrand. Das soll hier mit dem 3D-Model mit Zahlen unterlegt werden.

Um wiederum eine worst-case-Situation zu simulieren, wird ein Wurzelstock mit einer Ausdehnung von 40 cm in x- und y-Richtung betrachtet, der 40 cm tief in den Boden reicht. In der Draufsicht wird der Wurzelstock dadurch als Quadrat simuliert. (Man könnte dieses Quadrat auch „abrunden“, in dem man zu den Ecken hin einige Segmente als Bodensegmente deklariert. Allerdings erhöht das den Programmieraufwand für die Festlegung der Wurzelsegmente erheblich. Deshalb wird es hier bei einem quadratischen Wurzelstock belassen.)

Was den Modelaufbau angeht, ist ein Wurzelstock nichts anderes als eine sehr dicke Wurzel, die nicht besonders tief in den Boden reicht. Dementsprechend kann ein schwelender Wurzelstock auf die gleiche Weise simuliert werden wie die schwelende Wurzel in Kapitel 3.3, also mit den gleichen Annahmen, Eingabewerten und Segmentdimensionen. Im Fall des Wurzelstocks wird das betrachtete Bodenprofil allerdings auf 180 cm in x- und y-Richtung ausgedehnt, wovon der Wurzelstock je 40 cm vereinnahmt, sowie 160 cm in z-Richtung. Das ist notwendig, weil durch die zu erwartende lange Branddauer nun ein größeres Bodenvolumen beeinflusst wird.

Mit den o.g. Dimensionen und $H_{WV} = 11,248 \text{ kJ/cm}^3$ (siehe Kapitel 3.3.1) beträgt die je cm Wurzelstock gespeicherte Energie $40 \text{ cm} \times 40 \text{ cm} \times 1 \text{ cm} \times 11,25 \text{ kJ/cm}^3 \approx 18.000 \text{ kJ}$. Das ist 100mal mehr als für die oben betrachtete Wurzel. Allerdings gibt der Wurzelstock Energie über eine größere Fläche ab, nämlich $(40 \text{ cm} + 40 \text{ cm} + 40 \text{ cm} + 40 \text{ cm}) \times 1 \text{ cm} = 160 \text{ cm}^2$, was 10mal mehr ist als bei der Wurzel. Der hier betrachtete Wurzelstock brennt somit 10mal länger.

Die Dauer des Schwelbrands im Wurzelstock wird hier ähnlich abgeschätzt, wie es im oben für die Wurzel beschrieben wurde. Im Fall der dort betrachteten Wurzel ist jedes der vier Wurzelsegmente in einer Schicht ein Ecksegment und gibt daher Energie gleichermaßen in x- und in y-Richtung ab, am unteren Ende der Wurzel auch noch in z-Richtung. Beim Wurzelstock gibt es je Schicht auch vier Ecksegmente, aber zwischen den Ecken liegen noch jeweils acht Segmente. Nähert man sich der Mitte zwischen zwei Ecken, wird Energie zunehmend nur in x- oder y-Richtung abgegeben und somit in einen kleineren Bereich, was dort zu höheren Temperaturen führt.

Um eine konservative Schätzung zu erhalten, was im Sinne einer worst-case-Betrachtung ist, wird die Branddauer hier anhand eines Segments am Rand des Wurzelstocks mittig zwischen zwei Ecken und in 27 cm Tiefe ermittelt, wo sich der Oberflächenbrand nicht nennenswert auswirkt.

3.4.2 Ergebnisse

Die Darstellung der Ergebnisse entspricht der im vorigen Kapitel mit dem Unterschied, dass hier ein größeres Bodenvolumen abgebildet wird und der Schnitt durch die Mitte des Wurzelstocks geht, von dessen Außenseite nur in eine Richtung Energie abgegeben wird. Dementsprechend sind die Temperaturen in einer gegebenen lateralen Entfernung vom Wurzelstock höher als bei der Wurzel (siehe oben). Das ist in Abbildung A6 in Anhang 4 veranschaulicht. Darin ist außerdem zu sehen, dass die Temperaturverteilung symmetrisch ist, aus den gleichen Gründen wie beim Wurzelbrand.

Abbildung 11a zeigt die berechneten Bodentemperaturen 1 Stunde nach Brandbeginn, kurz vorm Erlöschen des Oberflächenbrands. In einiger Entfernung vom Wurzelstock, wo sich nur der Oberflächenbrand auswirkt, erscheinen erwartungsgemäß wieder die gleichen Temperaturen wie in Abbildung 9a mit einer Tiefe der 140°C-Linie von 10 cm. Auch die fünf Bereiche, die im Zusammenhang mit der Wurzel oben definiert wurden, sind wieder zu erkennen, wobei der dritte Bereich wegen der geringen Wurzelstocktiefe allerdings nicht so deutlich ausgeprägt ist.

In der Nähe des Wurzelstocks sind die Temperaturen aus dem o.g. Grund höher als im Fall der Wurzel. Im Einflussbereich beider Brände schiebt das den Verlauf der 140°C-Linie bis auf 12 cm Entfernung vom Wurzelstock (in 11 cm Tiefe). Wo nur der Brand im Wurzelstock wirkt, verläuft diese Linie nun in rund 10 cm Entfernung. In Folge des vertikalen Wärmetransports durch das Ende des Wurzelstock werden 140°C bis in eine Tiefe von etwas mehr als 47 cm erreicht.

Die maximale Tiefe der 140°-Linie, die nur auf den Oberflächenbrand zurückzuführen ist (12 cm), wird wie beim Wurzelbrand nach 1 Stunde 40 Minuten erreicht (Abbildung 11b). Die

Temperaturen im ausschließlichen Einflussbereich des Oberflächenbrands sind in beiden Fällen gleich (vgl. Abbildung 9b). Im Einflussbereich des Schwelbrands im Wurzelstock sind sie wieder höher und die 140°C-Linie reicht bis 19 cm um den Wurzelstock herum (in 13 cm Tiefe). Je weiter man in die Tiefe geht, desto näher liegt sie am Wurzelstock. Direkt unter dem Wurzelstock werden 140°C bis in rund 50 cm Tiefe erreicht.

Während die oben betrachtete Wurzel etwa 2 Stunden und 20 Minuten brannte, sind es bei dem Wurzelstock hier über 22 Stunden (siehe unten). Fünf Stunden nach Brandbeginn lagen im Fall der Wurzel die Temperaturen überall im Bodenprofil unter 140 C (Abbildung 9d). Im Fall des Wurzelstocks hat sich der Boden nahe der Oberfläche zwar schon stark abgekühlt, aber um ihn herum gibt es in einer Tiefe von 13 bis 27 cm Temperaturen $\geq 140^\circ\text{C}$ bis maximal etwa 18 cm Entfernung (Abbildung 11c). Höher und tiefer liegt die 140°C-Linie dichter am Wurzelstock. Unter ihm reicht sie bis in 56 cm Tiefe.

Abbildung 11d präsentiert die Temperaturverteilung im Boden nach 22 Stunden und 20 Minuten, kurz vor dem Ende des Schwelbrands im Wurzelstock. Der $\geq 140^\circ\text{C}$ -Bereich hat sich bis dahin noch ausgeweitet und reicht jetzt bis maximal etwas mehr als 25 cm in lateraler Entfernung vom Wurzelstock sowie bis 28 cm tief unter ihn.

Die maximale Ausdehnung des $\geq 140^\circ\text{C}$ -Bereichs um den Wurzelstock herum und unter ihm wird nach 24 Stunden und 20 Minuten erreicht (Abbildung 11e), unterscheidet sich aber kaum von der Ausdehnung nach 22 Stunden und 20 Minuten.

Erst 41 Stunden und 30 Minuten nach Brandbeginn bzw. 40 Stunden und 30 Minuten nach Ende des Brands an der Bodenoberfläche und 19 Stunden und 10 Minuten nach Ende des Schwelbrands im Wurzelstock fällt überall im Bodenprofil die Temperatur unter 140°C (Abbildung 11f).

Auch für den Wurzelstock wurden die Berechnungen bei sonst gleichen Bedingungen noch einmal mit einer Brandtemperatur von 250°C durchgeführt. Der Schwelbrand im Wurzelstock dauert rund 60 Stunden, aber wegen der niedrigeren Brandtemperatur sind die resultierenden Temperaturen im umliegenden Boden jetzt geringer. Zu dieser Zeit erreicht die 140°C-Linie mit nur etwa 14 cm auch ihre maximale laterale Entfernung vom Wurzelstock sowie ihre maximale vertikale Entfernung von nur etwa 18 cm (Abbildung 12). Bei der Schwelbrandtemperatur von 500°C waren es etwas über 25 cm bzw. 28 cm. Das Fazit ist das gleiche wie beim vorher betrachteten Wurzelbrand, nämlich dass kürzere aber heißere Brände kritischer sind als längere aber weniger heiße.

Abbildung 11b: Temperaturverteilung im Boden nach 1 h 40 min, zur Zeit der größten Tiefe der 140°C-Grenze ohne Wärme aus dem Brand im Wurzelstock.

Abstand vom Zentrum des Wurzelstock (Sx) bzw. von dessen äußerem Rand (x) [cm]

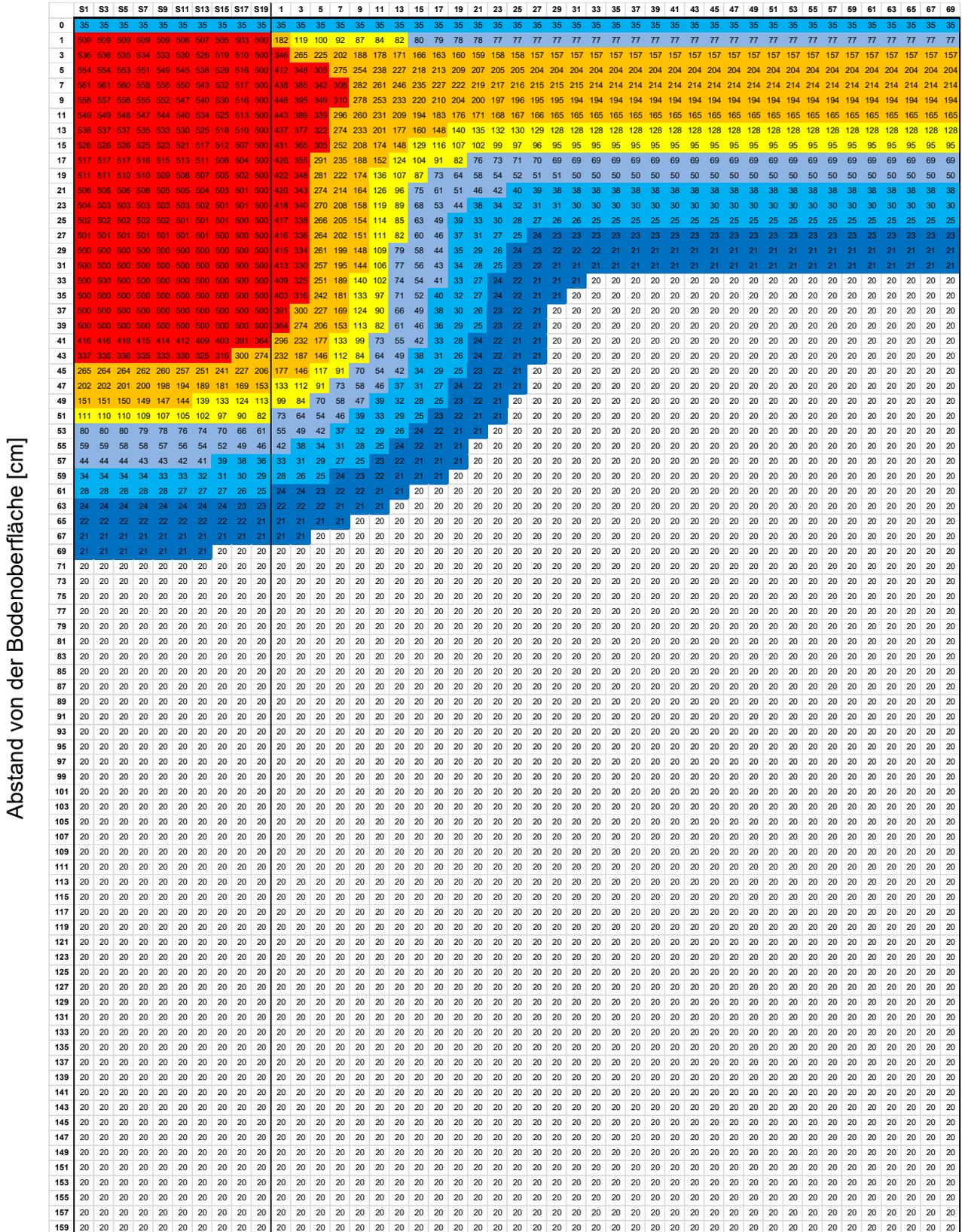
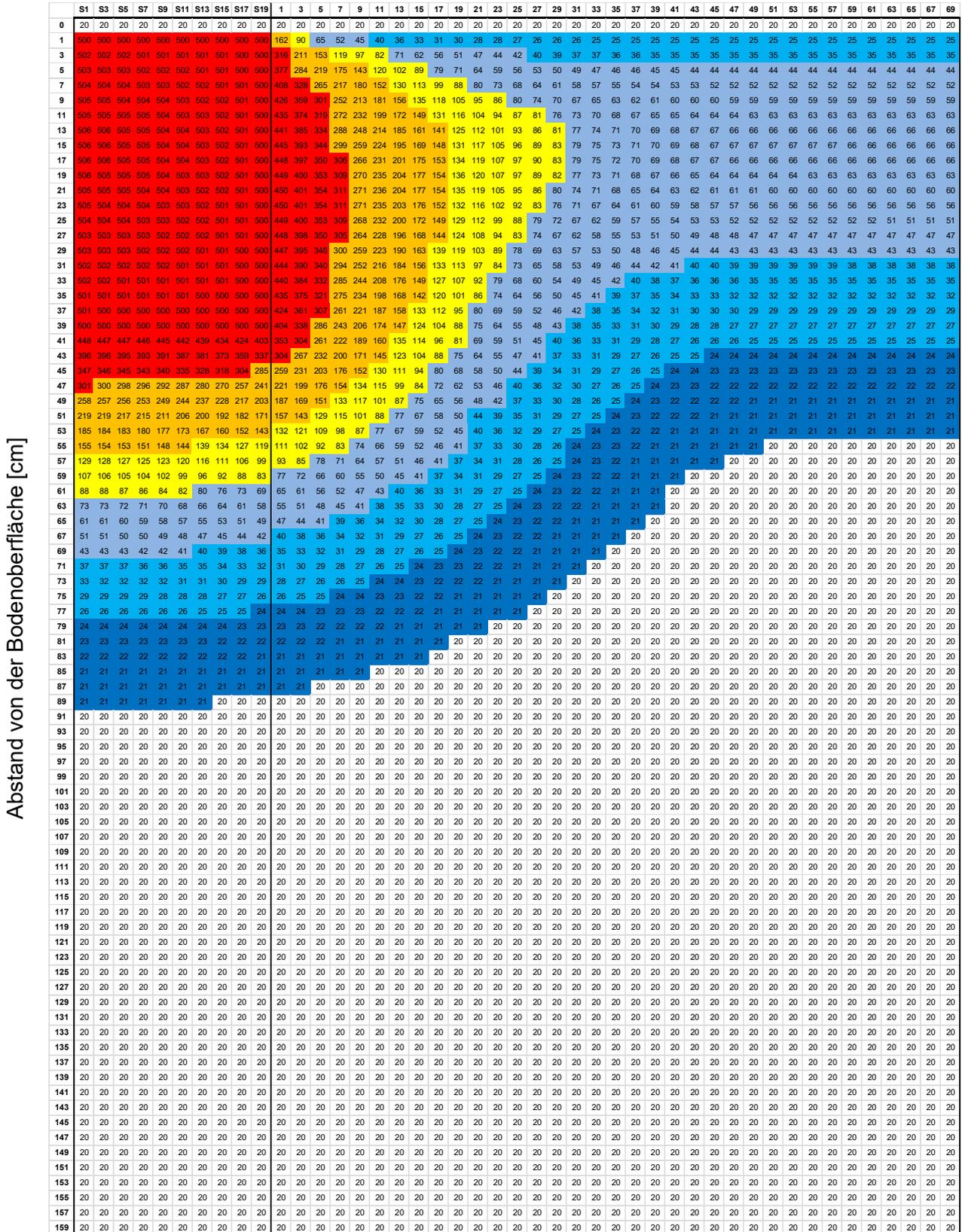


Abbildung 11c: Temperaturverteilung im Boden 5 h nach Brandbeginn

Abstand vom Zentrum des Wurzelstok (Sx) bzw. von dessen äußerem Rand (x) [cm]



> 300°C 141 - 300°C 81 - 140°C 41 - 80°C 25 - 40°C 21 - 24°C

Abbildung 11e: Temperaturverteilung im Boden nach 24 h 20 min, zur Zeit der größten Ausbreitung der 140°C-Grenze.

Abstand vom Zentrum des Wurzelstock (Sx) bzw. von dessen äußerem Rand (x) [cm]

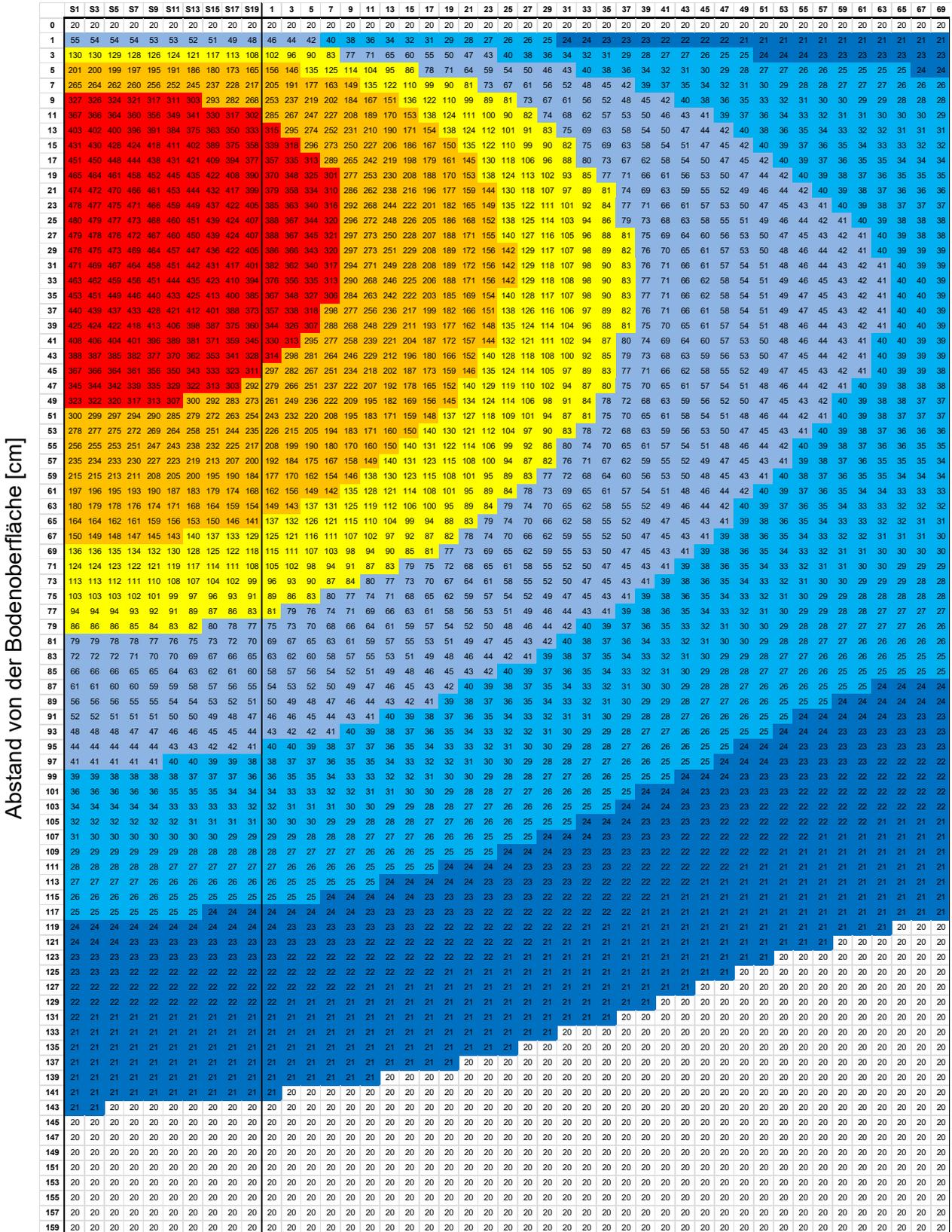


Abbildung 11f: Temperaturverteilung im Boden nach 44 Stunden, als erstmals überall im Profil die Temperatur < 140°C ist.

Abstand vom Zentrum des Wurzelstock (Sx) bzw. von dessen äußerem Rand (x) [cm]

Abstand von der Bodenoberfläche [cm]

	S1	S3	S5	S7	S9	S11	S13	S15	S17	S19	1	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21	23	25	27	29	31	33	35	37	39	41	43	45	47	49	51	53	55	57	59	61	63	65	67	69							
0	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20						
1	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	23	23	23	23	23	23	23	23	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21				
3	34	34	34	33	33	33	33	33	33	32	32	32	31	31	30	30	29	29	28	28	28	27	27	27	26	26	26	25	25	25	25	25	24	24	24	24	24	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23				
5	43	43	43	43	42	42	42	42	41	41	40	40	39	39	38	37	37	36	36	35	34	34	33	32	32	31	31	30	29	29	28	28	27	27	26	26	26	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25				
7	52	52	52	52	51	51	51	50	50	49	48	48	47	46	45	44	44	43	42	41	40	39	38	37	36	36	35	34	33	33	32	31	31	30	29	29	28	28	28	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27			
9	62	62	62	62	61	61	60	59	59	58	57	56	55	54	53	52	51	50	49	47	46	45	44	43	42	40	39	38	37	36	36	35	34	33	33	32	31	31	30	30	30	29	29	29	29	29	29	29	29			
11	70	70	69	69	68	67	67	66	65	64	63	62	60	59	58	56	55	54	52	51	49	48	47	45	44	43	42	41	39	38	37	36	36	35	34	33	33	32	32	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31			
13	78	78	78	77	77	76	75	74	73	72	71	70	68	67	66	64	61	59	58	56	54	53	51	50	48	47	45	44	43	41	40	39	38	37	36	36	35	34	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33		
15	86	86	85	85	84	84	83	82	81	79	78	77	75	73	72	70	68	65	63	61	59	57	56	54	52	50	49	47	46	44	43	42	41	40	39	38	37	36	36	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35		
17	93	93	93	92	92	91	90	89	88	86	85	83	81	80	78	76	74	72	70	68	66	64	62	60	58	56	54	52	50	49	47	46	44	43	42	41	40	39	38	38	37	37	36	36	36	36	36	36	36	36	36	
19	100	100	100	99	99	98	97	95	94	92	91	89	87	85	83	81	79	77	75	72	70	68	66	63	61	59	57	55	53	52	50	48	47	45	44	43	42	41	40	39	39	38	38	38	38	38	38	38	38	38	38	
21	107	107	106	106	105	104	103	101	100	98	97	95	93	91	88	86	84	81	79	77	74	72	69	67	65	62	60	58	56	54	52	51	49	47	46	45	44	43	42	41	40	40	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39
23	113	113	112	112	111	110	108	107	105	104	102	100	98	95	93	91	88	86	83	80	78	75	73	70	68	65	63	61	59	57	55	53	51	49	48	47	45	44	43	42	41	41	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40
25	118	118	117	117	116	115	114	112	110	109	107	104	102	100	97	95	92	89	87	84	81	78	76	73	71	68	66	63	61	59	57	55	53	51	50	48	47	46	45	44	43	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	
27	123	123	122	122	121	119	118	116	115	114	111	108	106	104	101	98	96	93	90	87	84	81	79	76	73	70	68	65	63	61	58	56	55	53	51	50	48	47	46	45	44	44	44	44	44	44	44	44	44	44	44	44
29	127	127	126	126	125	123	122	120	119	117	114	112	110	107	104	102	99	96	93	90	87	84	81	78	75	72	67	65	62	60	58	56	54	52	51	49	48	47	46	45	44	44	44	44	44	44	44	44	44	44	44	44
31	131	130	130	129	128	127	125	124	122	119	117	115	113	110	107	104	101	98	95	92	89	86	83	80	77	74	72	69	66	64	62	59	57	55	54	52	50	49	48	47	46	45	44	44	44	44	44	44	44	44	44	44
33	134	133	133	132	131	130	128	126	125	122	120	118	115	112	109	106	103	100	97	94	91	88	85	82	79	76	73	70	68	65	63	60	58	56	55	53	51	50	49	48	47	46	46	46	46	46	46	46	46	46	46	46
35	136	136	135	134	133	132	130	129	127	125	122	120	117	114	111	108	105	102	99	96	93	89	86	83	80	77	74	71	69	66	64	61	59	57	55	54	52	51	50	49	48	47	46	46	46	46	46	46	46	46	46	46
37	137	137	137	136	135	134	132	130	128	126	124	121	118	116	113	110	107	103	100	97	94	91	88	85	82	79	76	73	70	68	65	63	61	59	57	55	54	52	51	50	49	48	47	46	46	46	46	46	46	46	46	46
39	139	138	138	137	136	135	133	131	129	127	125	122	119	117	114	111	107	104	101	98	94	91	88	85	82	79	76	73	70	67	65	63	60	58	56	55	53	52	51	49	48	47	46	46	46	46	46	46	46	46	46	46
41	139	139	138	138	136	135	134	132	130	128	125	123	120	117	114	111	108	105	101	98	95	92	88	85	82	79	76	73	70	68	65	63	61	59	57	55	53	52	51	50	49	48	47	46	46	46	46	46	46	46	46	46
43	139	139	138	138	136	135	134	132	130	128	125	123	120	117	114	111	108	105	101	98	95	92	88	85	82	79	76	73	71	68	65	63	61	59	57	55	54	52	51	50	49	48	47	46	46	46	46	46	46	46	46	46
45	139	138	138	137	136	135	133	131	129	127	125	122	120	117	114	111	108	104	101	98	95	91	88	85	82	79	76	73	70	68	65	63	61	59	57	55	54	52	51	50	49	48	47	46	46	46	46	46	46	46	46	46
47	138	137	137	136	135	134	132	130	128	126	124	121	119	116	113	110	107	104	101	97	94	91	88	85	82	79	76	73	70	68	65	63	61	59	57	55	53	52	51	50	49	48	47	46	46	46	46	46	46	46	46	46
49	136	136	135	135	134	132	131	129	127	125	123	120	118	115	112	109	106	103	100	96	93	90	87	84	81	78	75	72	70	67	65	62	60	58	56	55	53	52	51	49	48	47	46	46	46	46	46	46	46	46	46	46
51	134	134	133	133	132	130	129	127	125	123	121	119	116	113	110	108	105	102	98	95	92	88	85	82	79	76	73	71	68	66	64	62	60	58	56	54	53	51	50	49	48	47	46	46	46	46	46	46	46	46	46	46
53	132	132	131	130	130	128	127	125	123	121	119	117	114	112	109	106	103	100	97	94	91	88	85	82	79	76	73	71	68	66	63	61	59	57	55	54	52	51	50	49	48	47	46	46	46	46	46	46	46	46	46	46
55	129	129	129	128	127	126	124	123	121	119	117	114	112	109	107	104	101	98	95	92	89	86	83	81	78	75	72	70	67	65	62	60	58	56	55	53	52	50	49	48	47	46	46	46	46	46	46	46	46	46	46	46
57	126	126	126	125	124	123	122	120	118	116	114	112	110	107	105	102	99	96	93	90	88	85	82	79	76	74	71	68	66	64	61	59	57	55	54	52	51	50	49	48	47	46	46	46	46	46	46	46	46	46	46	
59	123	123	123	122	121	120	119	117	115	114	111	109	107	105	102	99	97	94	91	88	86	83	80	77	75	72	70	67	65	63	61	59	57	55	54	52	50	49	48	47	46	46	46	46	46	46	46	46	46	46	46	46
61	120	120	119	119	118	117	115	114	112	110	109																																									

Abbildung 12: Temperaturverteilung im Boden nach 60 h, zur Zeit der größten Ausbreitung der 140°C-Grenze bei einer Brandtemperatur von 250°C im Wurzelstock.

Abstand vom Zentrum des Wurzelstock (Sx) bzw. von dessen äußerem Rand (x) [cm]

Abstand von der Bodenoberfläche [cm]

	S1	S3	S5	S7	S9	S11	S13	S15	S17	S19	1	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21	23	25	27	29	31	33	35	37	39	41	43	45	47	49	51	53	55	57	59	61	63	65	67	69										
0	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20							
1	55	54	54	54	53	53	52	51	49	48	46	44	42	40	38	36	34	32	31	29	28	27	26	26	25	24	24	23	23	23	22	22	22	22	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21				
3	130	130	129	128	126	124	121	117	113	108	102	96	90	83	77	71	65	60	55	50	47	43	40	38	36	34	32	31	29	28	27	27	26	25	25	24	24	24	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23					
5	201	200	199	197	195	191	186	180	173	165	156	146	135	125	114	104	95	86	78	71	64	59	54	50	46	43	40	38	36	34	32	31	30	29	28	27	27	26	26	25	25	25	25	25	24	24	24	24	24	24					
7	265	264	262	260	256	252	245	237	228	217	205	191	177	163	149	135	122	110	99	90	81	73	67	61	56	52	48	45	42	39	37	35	34	32	31	30	29	28	28	27	27	27	26	26	26	26	26	26	26	26	26				
9	327	326	324	321	317	311	303	293	282	268	253	237	219	202	184	167	151	136	122	110	99	89	81	73	67	61	56	52	48	45	42	40	38	36	35	33	32	31	30	29	29	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28				
11	367	366	364	360	356	349	341	330	317	302	285	267	247	227	208	189	170	153	138	124	111	100	90	82	74	68	62	57	53	50	46	43	41	39	37	36	34	33	32	31	31	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30				
13	403	402	400	396	391	384	375	363	350	333	316	295	274	252	231	210	190	171	154	138	124	112	101	91	83	75	69	63	58	54	50	47	44	42	40	38	36	35	34	33	32	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31		
15	431	430	428	424	418	411	402	389	375	358	339	318	296	273	250	227	206	186	167	150	135	122	110	99	90	82	75	69	63	58	54	51	47	45	42	40	39	37	36	35	34	33	32	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31		
17	451	450	448	444	438	431	421	409	394	377	357	335	313	289	265	242	219	198	179	161	145	130	118	106	96	88	80	73	67	62	58	54	50	47	45	42	40	39	37	36	35	35	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34		
19	465	464	461	458	452	445	435	422	408	390	370	348	325	301	277	253	230	208	187	170	153	138	124	113	102	93	85	77	71	66	61	56	53	50	47	44	42	40	39	38	37	36	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35		
21	474	472	470	466	461	453	444	432	417	398	379	358	334	310	286	262	238	216	196	177	159	144	130	118	107	97	89	81	74	69	63	59	55	52	49	46	44	42	40	39	38	37	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36		
23	478	477	475	471	466	459	449	437	422	405	385	363	340	316	292	268	244	222	201	182	165	149	135	122	111	101	92	84	77	71	66	61	57	53	50	47	45	43	41	40	39	38	37	37	37	37	37	37	37	37	37	37			
25	480	479	477	473	468	460	451	439	424	407	388	367	344	320	296	272	248	226	205	186	168	152	138	125	114	103	94	86	79	73	68	63	58	55	51	49	46	44	42	41	40	39	38	38	38	38	38	38	38	38	38	38	38		
27	479	478	476	472	467	460	450	439	424	407	388	367	345	321	297	273	250	228	207	188	171	155	140	127	116	105	96	88	81	75	69	64	60	56	53	50	47	45	43	42	41	40	39	38	38	38	38	38	38	38	38	38	38		
29	476	475	473	469	464	457	447	436	422	405	386	366	343	320	297	273	251	229	208	189	172	156	142	129	117	107	98	89	82	76	70	65	61	57	53	50	48	46	44	42	41	40	39	38	37	37	37	37	37	37	37	37	37		
31	471	469	467	464	458	451	442	431	417	401	382	362	340	317	294	271	249	228	208	189	172	156	142	129	118	107	98	89	82	76	71	66	61	57	54	51	48	46	44	43	42	41	40	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39		
33	463	462	459	456	451	444	435	423	410	394	376	356	335	313	290	268	246	225	206	188	171	156	142	129	118	108	98	90	83	77	71	66	62	58	54	51	49	46	45	43	42	41	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40		
35	453	451	449	446	440	433	425	413	400	385	367	348	327	305	284	263	242	222	203	185	169	154	140	128	117	107	98	90	83	77	71	66	62	58	54	51	49	47	45	43	42	41	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	
37	440	439	437	433	428	421	412	401	388	373	357	338	318	298	277	256	236	217	199	182	166	151	138	126	116	106	97	89	82	76	71	66	61	58	54	51	49	47	45	43	42	41	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	
39	425	424	422	418	413	406	398	387	375	360	344	326	307	288	268	248	229	211	193	177	162	148	135	124	114	104	96	88	81	75	70	65	61	57	54	51	48	46	44	43	42	41	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	
41	408	406	404	401	396	389	381	371	359	345	330	313	295	277	258	239	221	204	187	172	157	144	132	121	111	102	94	87	80	74	69	64	60	57	53	50	48	46	44	43	41	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	
43	388	387	385	382	377	370	362	353	341	328	314	298	281	264	246	229	212	196	180	166	152	140	128	118	108	100	92	85	79	73	68	63	59	56	53	50	47	45	44	42	41	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	
45	367	366	364	361	356	350	343	333	323	311	297	282	267	251	234	218	202	187	173	159	146	135	124	114	105	97	89	83	77	71	66	62	58	55	52	49	47	45	43	42	41	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	
47	345	344	342	339	335	329	322	313	303	292	279	266	251	237	222	207	192	178	165	152	140	129	119	110	102	94	87	80	75	70	65	61	57	54	51	48	46	44	42	41	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	
49	323	322	320	317	313	307	300	292	283	273	261	249	236	222	209	195	182	169	156	145	134	124	114	106	98	91	84	78	72	68	63	59	56	52	50	47	45	43	42	41	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	
51	300	299	297	294	290	285	279	272	263	254	243	232	220	208	195	183	171	159	148	137	127	118	109	101	94	87	81	75	70	65	61	58	54	51	48	46	44	42	41	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	
53	278	277	275	272	269	264	258	251	244	235	226	215	205	194	183	171	160	150	140	130	121	112	104	97	90	83	78	72	68	63	59	56	53	50	47	45	43	41	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	
55	256	255	253	251	247	243	238	232	225	217	208	199	190	180	170	160	150	140	131	122	114	106	99	92	86	80	74	70	65	61	57	54	51	48	46	44	42	41	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40
57	235	234	233	230	227	223	219	213	207	200	192	184	175	167	158	149	140</																																						

3.4.3 Bedeutung der Berechnungsergebnisse für das Risiko einer Explosion von Munition

Für den Brand eines Wurzelstocks gelten die gleichen grundsätzlichen Schlüsse wie für einen Wurzelbrand. Der wesentliche Unterschied besteht darin, dass der Brand im hier betrachteten Wurzelstock wesentlich länger dauert als der vorher betrachtete Wurzelbrand. Dadurch hat die Wärme mehr Zeit sich auszubreiten. Lateral beträgt die Ausbreitung beim Wurzelstock maximal 25 cm gegenüber meist nur 6 cm bei der Wurzel. Die maximale vertikale Ausbreitung unter dem Ende des Wurzelstocks bzw. der Wurzel beträgt 28 bzw. 4 cm.

Weil also eine größere Fläche über die kritische Temperatur von 140°C erwärmt wird, ist das Risiko, dass zwischen 13 und 68 cm tief im Boden befindliche Munition zur Explosion gebracht werden könnte, bei einem Brand in einem Wurzelstock deutlich höher als bei einem Wurzelbrand. (Oberhalb von 13 cm führt der Brand an Bodenoberfläche bereits zur Umsetzung der Munition.) Allerdings kommt ein Schwelbrand in einem Wurzelstock nur selten vor, weil dieser (und der Baumstumpf über der Erde) sich nach dem Abbrechen oder Fällen des Baums recht schnell zersetzt, als Folge davon viel Wasser aufnehmen kann und dementsprechend in der Regel sehr feucht bis nass ist. Ein Brand ist daher eher unwahrscheinlich.

Weil der Wurzelstock eine geringere Tiefe hat als die Wurzel, erreicht die 140°C-Grenze bei einem Wurzelbrand letztlich eine größere Tiefe, vorausgesetzt die Wurzel ist entsprechend länger als ein Wurzelstock. Für tiefer im Boden liegende Munition ist somit ein Wurzelbrand kritischer einzuschätzen.

4. Literaturverzeichnis

Hagenau, J. & H. Borg 2019: In welchem Maße bringen Waldbrände Gefahren aufgrund von Kampfmitteln im Boden mit sich? - Berechnung der Temperaturverteilung in einem Bodenprofil während des Verlaufs von Brandereignissen und in der nachfolgenden Abkühlungsphase.- Gutachten im Auftrag des Niedersächsischen Landesamts für Bau und Liegenschaften, 45 S.

Lyngbö, E. 2023: Brandversuche zur Abschätzung des Gefahrenpotenzials von Vegetationsbränden auf kampfmittelbelasteten Flächen. - Bachelorarbeit am Institut für Bodenmechanik und Grundbau der Universität der Bundeswehr München, 146 S.

Pretz, H. & H. Borg 2023: In welchem Maße bringen Waldbrände Gefahren aufgrund von Kampfmitteln im Boden mit sich? - Altlastenspektrum 01/2023: 5 - 12.

Anhang 1: Verteilung der Segmentdicken im Bodenprofil für die Berechnungen in Kapitel 3.1.3 sowie die D_{th} -Werte, mit denen die Ergebnisse in den dortigen Abbildungen 4 bis 6 erzielt wurden.

Segment Nr.	Dicke des Segments [cm]	Tiefe der Segmentmitte [cm]	Tiefe der Segmentunterkante [cm]	Dth-Werte für Abb. 4 [cm ² /s]	Dth-Werte für Abb. 5 [cm ² /s]	Dth-Werte für Abb. 6 [cm ² /s]
0	0,2	0,10	0,2	0,0041	0,0048	0,0046
1	0,5	0,45	0,7	0,0041	0,0048	0,0046
2	0,5	0,95	1,2	0,0041	0,0048	0,0046
3	0,5	1,45	1,7	0,0041	0,0048	0,0046
4	0,5	1,95	2,2	0,0041	0,0048	0,0046
5	0,6	2,50	2,8	0,0041	0,0048	0,0046
6	0,7	3,15	3,5	0,0041	0,0048	0,0046
7	1,0	4,00	4,5	0,0041	0,0048	0,0046
8	1,0	5,00	5,5	0,0041	0,0048	0,0046
9	1,0	6,00	6,5	0,0041	0,0048	0,0046
10	1,5	7,25	8,0	0,0041	0,0070	0,0060
11	2,0	9,00	10,0	0,0041	0,0070	0,0060
12	2,0	11,00	12,0	0,0041	0,0070	0,0060
13	2,0	13,00	14,0	0,0041	0,0070	0,0060
14	2,0	15,00	16,0	0,0041	0,0070	0,0060
15	2,0	17,00	18,0	0,0041	0,0070	0,0060
16	2,5	19,25	20,5	0,0041	0,0070	0,0030
17	3,0	22,00	23,5	0,0041	0,0070	0,0030
18	4,0	25,50	27,5	0,0041	0,0070	0,0030
19	5,0	30,00	32,5	0,0041	0,0070	0,0030
20	5,0	35,00	37,5	0,0041	0,0070	0,0030
21	5,0	40,00	42,5	0,0041	0,0070	0,0050
22	5,0	45,00	47,5	0,0041	0,0070	0,0050
23	7,5	51,25	55,0	0,0041	0,0070	0,0050
24	10,0	60,00	65,0	0,0041	0,0070	0,0050
25	10,0	70,00	75,0	0,0041	0,0070	0,0050
26	10,0	80,00	85,0	0,0041	0,0070	0,0050
27	10,0	90,00	95,0	0,0041	0,0070	0,0050
28	15,0	102,50	110,0	0,0041	0,0070	0,0050
29	20,0	120,00	130,0	0,0041	0,0070	0,0050
30	20,0	140,00	150,0	0,0041	0,0070	0,0050
31	20,0	160,00	170,0	0,0041	0,0070	0,0050
32	20,0	180,00	190,0	0,0041	0,0070	0,0050
33	20,0	200,00	210,0	0,0041	0,0070	0,0050

Anhang 2: Thermische Diffusivität

Eine Aufgabe hier ist es, die Wärmeausbreitung im Boden bei den Brandversuchen von Lyngbö (2023) rechnerisch nachzuvollziehen. Um Wärmetransport in einem natürlichen Boden (oder irgendeinem anderen Substrat) zu berechnen, sind Daten zu seiner thermischen Diffusivität unumgänglich. Sie ist der Quotient aus der thermischen Leitfähigkeit und der volumetrischen spezifischen Wärmekapazität des Bodens. Somit gilt:

$$D_{\text{th}} = \frac{k_{\text{th}}}{\rho_b c_b} \quad [\text{A1}]$$

k_{th} = thermische Leitfähigkeit des Bodens [J/s/m/K]

$\rho_b c_b$ = volumetrische spezifische Wärmekapazität des Bodens [J/m³/K].

Die thermische Leitfähigkeit des Sandbodens in den Versuchen von Lyngbö (2023) wurde im Bodenphysik-Labor des Instituts für Ökologie der Technischen Universität Berlin zweifach experimentell bestimmt. Die gemessenen Daten und deren Mittelwert sind in Abbildung A1 in Abhängigkeit vom Wassergehalt des Bodens dargestellt, weil dieser von allen möglichen Faktoren den größten Einfluss auf die thermische Leitfähigkeit hat. Aus physikalischen Gründen steigt sie immer mit dem Wassergehalt des Bodens an.

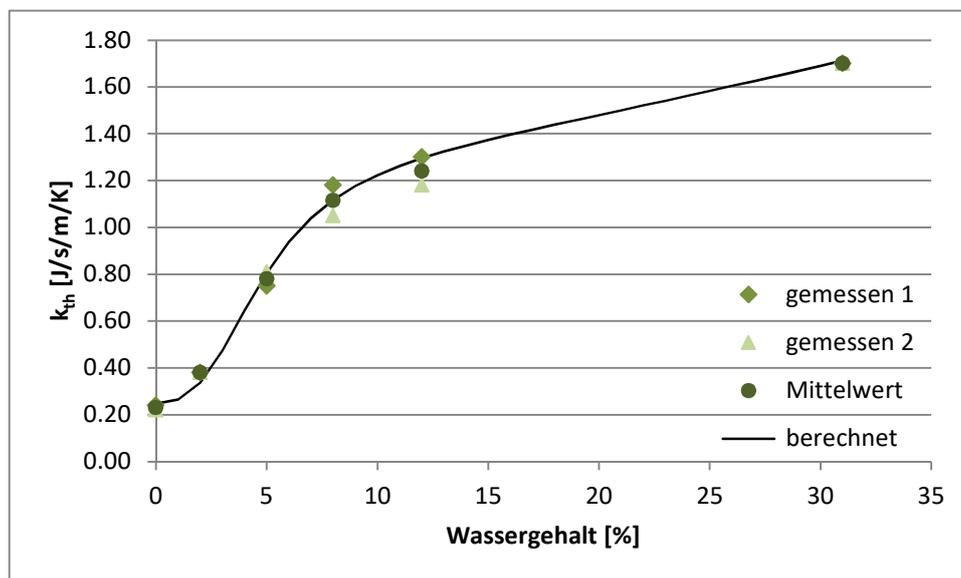


Abbildung A1: Thermische Leitfähigkeit (k_{th}) des Bodens in den Versuchen von Lyngbö (2023) in Abhängigkeit vom Wassergehalt.

Die thermische Leitfähigkeit kann man auch aus den relevanten Eigenschaften des fraglichen Bodens berechnen (Kapitel 8.3 in Campbell und Norman, 1998), von denen einige allerdings nur schwer zu bestimmen sind. Sie lassen sich jedoch recht gut schätzen, so dass man damit weitgehend realistische, wenn auch nicht ganz exakte Werte erhält. Die berechneten Werte sind ebenfalls in Abbildung A1 aufgeführt. Das ist sinnvoll, weil auch

gemessene Daten Fehler enthalten können. Sie werden erkennbar, wenn gemessene und berechnete Daten schlecht übereinstimmen.

Die gemessenen und berechneten Daten liegen hier dicht beieinander. Das bedeutet, dass die gemessenen Daten zuverlässig sind.

Die Berechnung der thermischen Leitfähigkeit ist kompliziert und wird daher hier nicht näher beschrieben. Es ist einfacher sie zu messen, wenn man die dafür nötigen Geräte zur Verfügung hat. Wie eben gezeigt, sind berechnete Daten zur Qualitätskontrolle jedoch sehr nützlich. Umgekehrt sind korrekte Messwerte auch hilfreich, um Berechnungen anzupassen.

Parallel zur thermischen Leitfähigkeit wurde auch die volumetrische spezifische Wärmekapazität des Bodens in den Versuchen von Lyngbö (2023) im Bodenphysik-Labor der TU Berlin zweimal bestimmt. Die Ergebnisse sind in Abbildung A2 dargestellt. Die gepunktete Linie ist die Regressionsgerade für die Mittelwerte.

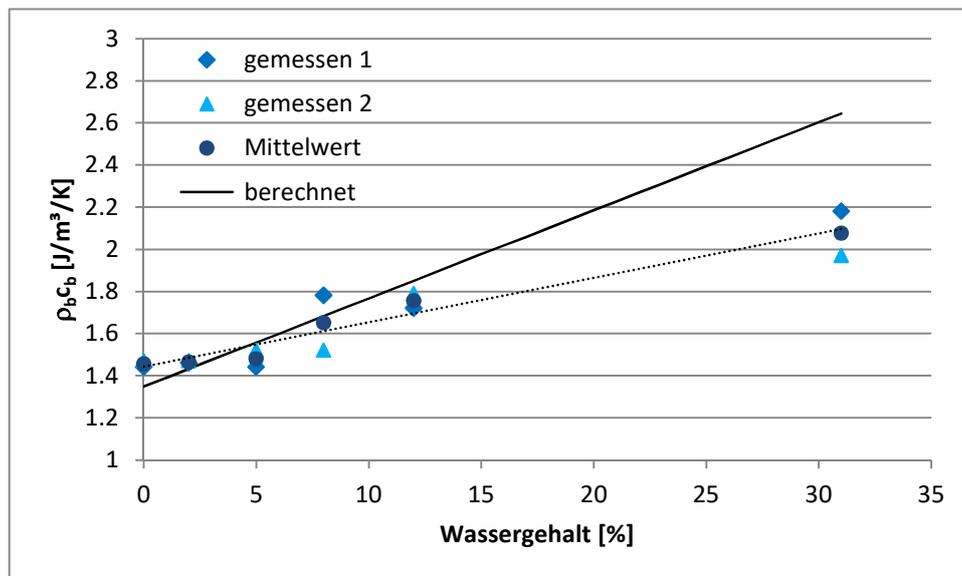


Abbildung A2: Volumetrische spezifische Wärmekapazität ($\rho_b c_b$) des Bodens in den Versuchen von Lyngbö (2023) in Abhängigkeit vom Wassergehalt. Die gepunktete Linie ist die Regressionsgerade für die Mittelwerte.

Auch die volumetrische spezifische Wärmekapazität eines Bodens kann man berechnen (Kapitel 8.2 in Campbell und Norman, 1998). Im Gegensatz zur thermischen Leitfähigkeit ist der Rechenweg hierfür sehr einfach:

$$\rho_b c_b = f_m \rho_m c_m + f_o \rho_o c_o + f_w \rho_w c_w \quad [A2]$$

$f_{m,o,w}$ = Volumenanteil der mineralischen (m) und organischen (o) Komponenten im Boden, sowie des Wassers (w)

$\rho_{m,o,w}$ = Dichte [kg/m³] der mineralischen (m) und organischen (o) Komponenten im Boden, sowie des Wassers (w)

$c_{m,o,w}$ = spezifische Wärmekapazität [J/kg/K] der mineralischen (m) und organischen (o) Komponenten im Boden, sowie des Wassers (w)

Diese Gleichung besagt, dass in Abwesenheit von Wasser ($f_w = 0$) die volumetrische spezifische Wärmekapazität eines Bodens ($\rho_b c_b$) ausschließlich von seinen festen Bestandteilen bestimmt wird. Mit steigendem Wassergehalt (f_w) steigt $\rho_b c_b$ dann linear an. Dieser Anstieg ist in allen Böden genau gleich, nur dessen Ausgangspunkt unterscheidet sich, weil in Böden $f_m \rho_m c_m$ und $f_o \rho_o c_o$ nicht immer gleich sind.

Die Parameter $f_{m,o}$ und $\rho_{m,o}$ wurden für den Versuchsboden im Labor ermittelt. Verlässliche Werte für $c_{m,o,w}$ wurden der Fachliteratur entnommen. Damit konnten mittels Gleichung [A2] sehr genaue Werte für $\rho_b c_b$ berechnet werden, die in Abbildung A2 eingetragen wurden.

Wie eben ausgeführt, ist der Anstieg in $\rho_b c_b$ mit dem Wassergehalt linear und für alle Böden gleich. Außerdem ist der mit Gleichung [A2] berechnete Anstieg (und hier auch der Ausgangspunkt) der physikalisch richtige. Der Anstieg der Regressionsgeraden durch die gemessenen Werte ist dagegen viel flacher (Abbildung A2). Das bedeutet, dass die gemessenen Werte zumindest teilweise fehlerhaft sind. Das gilt auf jeden Fall für den Wert bei 31% Wassergehalt, der deutlich zu niedrig ist. Bei Wassergehalten $\leq 12\%$, die für Sand in der Natur die Regel sind, stimmen die gemessenen Werte noch einigermaßen mit den korrekten berechneten Werten überein.

Während es bei der thermischen Leitfähigkeit meist einfacher und genauer ist sie experimentell zu bestimmen, ist es bei der volumetrischen spezifischen Wärmekapazität meist einfacher und genauer sie zu berechnen.

Abbildung A3 zeigt nun die thermische Diffusivität für die gemessenen und berechneten Daten gemäß Gleichung [A1], also die Daten aus Abbildung A1 geteilt durch die Daten aus Abbildung A2. Für Wassergehalte $\leq 12\%$ stimmen die gemessenen und berechneten Werte ziemlich gut überein, weil die thermische Leitfähigkeit und die volumetrische spezifische Wärmekapazität in diesem Bereich sehr gut bzw. einigermaßen übereinstimmen, wie oben beschrieben.

Der bei 31% Wassergehalt gemessene D_{th} -Wert ist falsch. Er liegt deutlich über dem berechneten, weil die gemessene Wärmekapazität viel zu niedrig ist (Abbildung 2) während die gemessene Leitfähigkeit mit der berechneten übereinstimmt (Abbildung 1). Um die Ergebnisse aus den Brandversuchen von Lyngbö (2023) rechnerisch nachzuvollziehen ist das kein Problem, weil dort die Wassergehalte stets $< 12\%$ waren. Sollte man dennoch D_{th} -Werte für höhere Wassergehalte benötigen, kann man dafür bedenkenlos die berechneten Werte verwenden, weil die gemessenen und berechneten thermischen Leitfähigkeiten über den gesamten betrachteten Wassergehaltsbereich gut zusammenpassen und die

berechneten Wärmekapazitäten zuverlässig sind, so dass die berechneten Diffusivitäten thermischen korrekt sind.

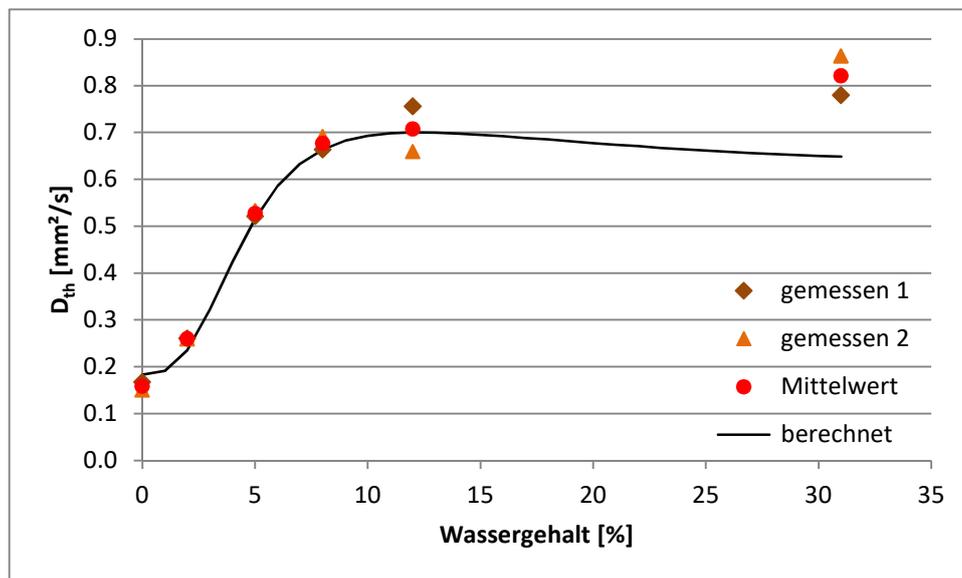


Abbildung A3: Thermische Diffusivität (D_{th}) des Bodens in den Versuchen von Lyngbö (2023) in Abhängigkeit vom Wassergehalt.

Die eben vorgestellten Daten wurden bei einer Trockendichte des Bodens (Lagerungsdichte) von 1,55 g/cm³ ermittelt. Dies ist ein typischer Wert für Sandboden in seiner natürlichen Lagerung im Gelände.

Die Brandversuche von Lyngbö (2023) wurden nicht im Gelände durchgeführt, sondern in einem Betonring von 100 cm Durchmesser und 50 cm Tiefe. Dazu wurde die erforderliche Menge des o.g. Boden im Gelände entnommen und in den Betonring gefüllt. Das hat zur Folge, dass die Lagerungsdichte des eingefüllten Bodens sehr heterogen sein kann, also nicht überall gleich ist, und außerdem erheblich von 1,55 g/cm³ abweichen kann. (Im Gelände ist die Lagerungsdichte auch nicht unbedingt an jeder Stelle gleich.) Das ist von Bedeutung, weil die thermische Diffusivität nicht nur vom Wassergehalt abhängig ist, sondern auch von der Lagerungsdichte.

Abbildung A4 zeigt die D_{th} -Werte für die höchste ($L_d = 1,70$ g/cm³) und niedrigste Lagerungsdichte ($L_d = 1,40$ g/cm³), die für diesen Boden plausibel ist, wenn er in den Betonring eingefüllt wird. Ebenfalls aufgeführt sind die Werte für seine natürliche Lagerungsdichte ($L_d = 1,55$ g/cm³).

Zur Erstellung dieser Abbildung wurden zunächst k_{th} und $\rho_b c_b$ für diese drei Lagerungsdichten bei verschiedenen Wassergehalten berechnet. Anschließend wurden mit diesen Daten gemäß Gleichung [A1] die D_{th} -Werte ermittelt.

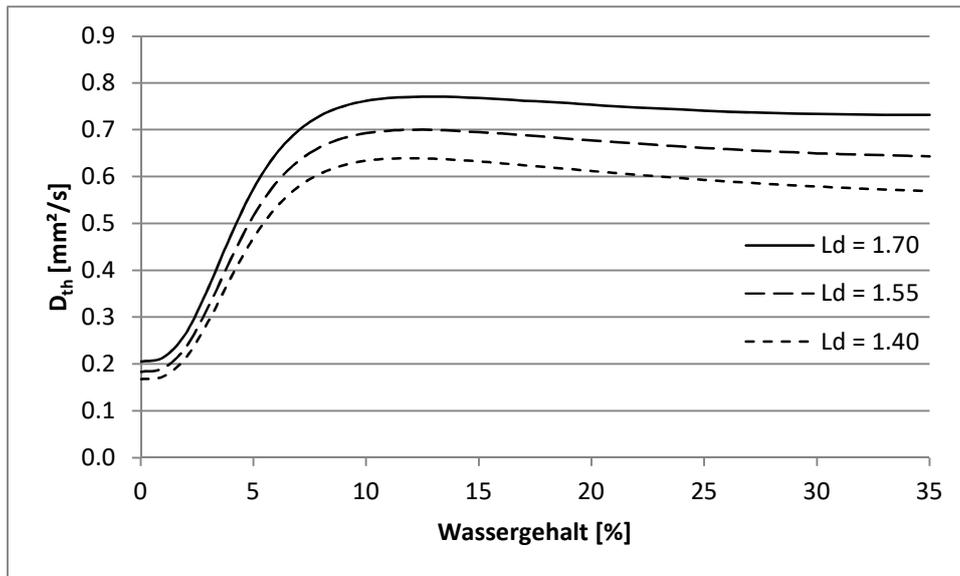


Abbildung A4: Berechnete thermische Diffusivität (D_{th}) des Bodens in den Versuchen von Lyngbö (2023) für drei Lagerungsdichten (L_d in g/cm^3) in Abhängigkeit vom Wassergehalt.

Anhang 3: Beispielhafte Darstellung der horizontalen Temperaturverteilung in einer Bodenschicht unter den Bedingungen der Modellrechnungen in Kapitel 3.3.1

Abbildung A5 zeigt die horizontale Temperaturverteilung in 37 cm Tiefe 1 Stunde und 40 Minuten nach Beginn des Brands. Wie man sieht, sind die Werte in x- und y-Richtung gleich. Das gilt auch für zwei beliebige Diagonalen, die sich in einem Winkel von 90° kreuzen. Die Temperaturverteilung ist also absolut symmetrisch. Das ist auch für alle anderen Bodenschichten der Fall. Legt man einen Schnitt in x- oder y-Richtung durch die Wurzel, so liegen darauf die gleichen Werte wie in der entsprechenden Tiefe in Abbildung 9b.

Abbildung A5: Horizontale Temperaturverteilung in 37 cm Bodentiefe 1 h 40 min nach Beginn des Brands unter den Bedingungen der Modellrechnungen in Kapitel 3.3.1. Wu = Wurzel.

