



Lehrstuhl für Thermoprozesstechnik

Masterarbeit

Entwicklung einer quantitativen Methode  
zur Brandrisikoabschätzung von  
Abfallschüttungen

Matthias Grimm, BSc

September 2022

## Masterarbeit

# Entwicklung einer quantitativen Methode zur Brandrisikoabschätzung von Abfallschüttungen

erstellt am

**Lehrstuhl für Thermoprozesstechnik**

**Vorgelegt von:**

Matthias Grimm, BSc

m01535083

**Betreuer:**

Dipl.-Ing. Michael Hohenberger

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Harald Raupenstrauch

Leoben, 26.09.2022



**EIDESSTÄTLICHE ERKLÄRUNG**

Ich erkläre an Eides statt, dass ich diese Arbeit selbständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt, und mich auch sonst keiner unerlaubten Hilfsmittel bedient habe.

Ich erkläre, dass ich die Richtlinien des Senats der Montanuniversität Leoben zu "Gute wissenschaftliche Praxis" gelesen, verstanden und befolgt habe.

Weiters erkläre ich, dass die elektronische und gedruckte Version der eingereichten wissenschaftlichen Abschlussarbeit formal und inhaltlich identisch sind.

Datum 16.09.2022



---

Unterschrift Verfasser/in  
Matthias Grimm

## **Danksagung**

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen bedanken, die mich während der Verfassung dieser Masterarbeit und im Studium unterstützt haben.

Für die Möglichkeit, diese Arbeit am Lehrstuhl für Thermoprozesstechnik durchführen zu können, bedanke ich mich bei Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Harald Raupenstrauch.

Zu besonderem Dank bin ich Dipl.-Ing. Michael Hohenberger verpflichtet, der mir durch sein Fachwissen und die vielen anregenden Gespräche immer wieder sehr geholfen hat.

Der allergrößte Dank gilt meinen Eltern und meinen Schwestern für ihre Unterstützung in jeder Situation. Ohne euch hätte ich nichts geschafft!

## **Kurzfassung**

Trotz umfangreicher Schutzmaßnahmen stellen Brände in abfallwirtschaftlichen Lagerungen ein großes Problem dar und führen zu teils erheblichen Schäden an Infrastruktur und Umwelt. Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Erarbeitung einer Methode, um das Brandrisiko derartiger Lager vorab einzuschätzen und daraus präventive Maßnahmen ableiten zu können.

Zu Anfang wurden bestehende Konzepte des Risikomanagements und des industriellen Brandschutzes erörtert. Des Weiteren wurde eine Darstellung des Standes der Forschung gegeben, welcher dem tiefergehenden Verständnis für die Entstehung und die Auswirkung von Bränden dient.

Basierend auf diesen Grundlagen konnte eine systematische Brandrisikoabschätzung, welche ein hohes Maß an Einfachheit und Flexibilität in der Durchführung gewährleistet, entwickelt werden. Die Umsetzung erfolgte über eine quantitative Szenarioanalyse und der Ermittlung von Relativwerten aus facheinschlägigen Literaturen mit anschließender Darstellung in einer Risikomatrix.

Anhand der Untersuchung eines realen Abfalllagers im Rahmen einer Case Study konnte die Methode bestätigt sowie Verbesserungspotentiale aufgezeigt werden.

## **Abstract**

Despite extensive protective actions, fires in waste storage facilities are a considerable problem and can cause significant damage to infrastructure and the environment. This thesis deals with the development of a method for preliminary fire risk assessment of such storage facilities as well as preventive actions.

As an introduction, the existing concepts of risk management and industrial fire protection were discussed. Furthermore, the current state of research on the topic was given to provide a deeper understanding of the origins and effects of fires.

Based on these principles, a systematic fire risk assessment that ensures a high degree of simplicity and flexibility in execution was developed. The implementation was carried out using a quantitative scenario analysis and the determination of relative values from relevant literature with subsequent presentation in a risk matrix.

By examining a real waste storage facility in the context of a case study, the method could be validated and potential for further improvement was identified.

---

# Inhaltsverzeichnis

|   |           |
|---|-----------|
| <b>Inhaltsverzeichnis .....</b>                 | <b>II</b> |
| <b>Akronyme.....</b>                            | <b>IV</b> |
| <b>Abbildungsverzeichnis .....</b>              | <b>VI</b> |
| <b>Tabellenverzeichnis .....</b>                | <b>IX</b> |
| <b>1 Einleitung .....</b>                       | <b>10</b> |
| 1.1 Problemstellung.....                        | 10        |
| 1.2 Zielsetzung .....                           | 11        |
| <b>2 Konzepte der Gefahrenabschätzung .....</b> | <b>13</b> |
| 2.1 Risikoanalyse .....                         | 13        |
| 2.2 Technische Regelwerke.....                  | 15        |
| <b>3 Brände in Schüttungen .....</b>            | <b>22</b> |
| 3.1 Fremdentzündung.....                        | 24        |
| 3.2 Selbstentzündung.....                       | 25        |
| 3.3 Brandwärme .....                            | 33        |
| 3.4 Brandrauch.....                             | 39        |
| <b>4 Methodenentwicklung .....</b>              | <b>41</b> |
| 4.1 Modellgrenzen .....                         | 41        |
| 4.2 Berechnungsablauf.....                      | 45        |
| 4.3 Gegenmaßnahmen.....                         | 65        |
| <b>5 Umsetzung und Anwendung .....</b>          | <b>69</b> |

|          |   |            |
|----------|---|------------|
| 5.1      | Umsetzung der Risikobewertungsmethode.....  | 69         |
| 5.2      | Anwendung der Risikobewertungsmethode ..... | 78         |
| <b>6</b> | <b>Ergebnisse und Diskussion.....</b>       | <b>81</b>  |
| 6.1      | Ergebnisse der Validierung.....             | 81         |
| 6.2      | Ergebnisse der Case Study .....             | 82         |
| 6.3      | Diskussion des Berechnungsmethodik .....    | 86         |
| <b>7</b> | <b>Schlussfolgerung und Ausblick.....</b>   | <b>89</b>  |
|          | <b>Literaturverzeichnis .....</b>           | <b>90</b>  |
|          | <b>Anhang I – informativ.....</b>           | <b>97</b>  |
|          | <b>Anhang II – Diagramme .....</b>          | <b>99</b>  |
|          | <b>Anhang III – Ergebnisse.....</b>         | <b>119</b> |

## Akronyme

|                         |  |
|-------------------------|--|
| TPT                     | Lehrstuhl für Thermoprozesstechnik                                   |
| AbER                    | Abfall-, Entsorgungs- und Recyclingwirtschaft                        |
| OIB                     | Österreichisches Institut für Bautechnik                             |
| M%                      | Einheit Massenprozent  |
| V%                      | Einheit Volumsprozent  |
| $S_v$                   | volumenbezogene spezifische Oberfläche [ $\text{mm}^2/\text{mm}^3$ ] |
| w                       | Wassergehalt [M% bzw. -]   |
| f                       | freier Luftraum [-]  |
| $\alpha$                | Böschungswinkel [°]  |
| H                       | Schüttungshöhe [m]   |
| h                       | Überdeckungshöhe [m]   |
| v                       | Windgeschwindigkeit [m/s]  |
| $H_l$                   | Heizwert (auch unterer Heizwert) [kJ/kg bzw. MJ/kg]                  |
| TRP                     | Thermal Response Parameter [ $\text{kWs}^{1/2}/\text{m}^2$ ]         |
| $\epsilon_{\text{ges}}$ | Gesamtporosität [-]  |
| k                       | Kontinuität [-]  |
| o                       | Oberflächenverhältnis [-]  |
| $y_s$                   | Smoke Yield [g/g]  |

|      |   |
|------|---|
| EW   | Entzündungswahrscheinlichkeit [-]               |
| BA   | Brandauswirkung [-]                             |
| usw. | und so weiter                                   |
| TRVB | Technische Richtlinien Vorbeugender Brandschutz |

## Abbildungsverzeichnis

|  |    |
|--|----|
| Abbildung 1: Erfasste Anzahl der Brandereignisse in der österreichischen Abfall-, Entsorgungs- und Ressourcenwirtschaft [2]..... | 11 |
| Abbildung 2: Risikomanagementprozess nach ÖNORM D 4901 [7].....  | 14 |
| Abbildung 3: Bestimmung des Materialfaktors nach der Zusammensetzung des Lagergutes nach ÖNORM EN 12845 [10].....                | 16 |
| Abbildung 4: Graphische Darstellung des Ablaufs der Brandrisikoabschätzung nach der Entscheidungsbaummethode nach [13].....      | 19 |
| Abbildung 5: Ergebnisdiagramm mit extrapolierte Linie ("Arrhenius-Diagramm") nach ÖNORM EN 15188 [14].....                       | 21 |
| Abbildung 6: Die Bedrohungen der Schutzziele zusammengefasst als Möglichkeiten der Entzündung und der Auswirkung [2][7][19]..... | 23 |
| Abbildung 7: Relevante Einflussparameter auf die Selbstentzündung [13].....  | 25 |
| Abbildung 8: Grafische Darstellung der Theorie des Wärmestaus für ein Volumenelement („Semenov-Diagramm“) [24].....              | 26 |
| Abbildung 9: Schematische Darstellung der Prozesse der Selbsterwärmung [15].....   | 26 |
| Abbildung 10: Relevante Einflussparameter für die Selbstentzündung [21][34][35][39].....   | 32 |
| Abbildung 11: Mechanismus der Verbrennung eines festen Brennstoffes nach [46], eigene Darstellung.....                           | 36 |
| Abbildung 12: Relevante Einflussparameter für die Brandwärme [19][45][47].....   | 38 |

|  |    |
|--|----|
| Abbildung 13: Relevante Einflussparameter für die Brandrauchbildung [52][53] .....   | 40 |
| Abbildung 14: Schematische Darstellung des Berechnungsablaufes .....   | 46 |
| Abbildung 15: Reduzierte Einflussparameter für die Fremdentzündung .....   | 47 |
| Abbildung 16: Reduzierte Einflussparameter für die Selbstentzündung .....  | 51 |
| Abbildung 17: Reduzierte Einflussparameter für die Brandwärme .....  | 55 |
| Abbildung 18: Reduzierte Einflussparameter für den Brandrauch .....  | 57 |
| Abbildung 19: Einfluss des Wassergehaltes auf die relative<br>Brandausbreitungsgeschwindigkeit (Brandwärme) für verschiedene Stoffe .....  | 58 |
| Abbildung 20: Einfluss der spezifischen Oberfläche auf die relative<br>Brandausbreitungsgeschwindigkeit (Brandwärme) für verschiedene Stoffe .....   | 58 |
| Abbildung 21: Abhängigkeit des Relativwertes für den Wassergehalt des mikrobiellen<br>Wachstums (Parameter der Selbstentzündung).....  | 59 |
| Abbildung 22: Abhängigkeit es Relativwertes für den Einfluss des Wassergehaltes auf die<br>Brandausbreitung (Parameter der Brandwärme) .....   | 60 |
| Abbildung 23: Abhängigkeit des Relativwertes für den Einfluss der spezifischen Oberfläche<br>auf die Brandausbreitung (Parameter der Brandwärme).....  | 60 |
| Abbildung 24: Normierte Einflusskurve für den Einfluss des Wassergehaltes auf die<br>Brandausbreitung (Brandwärme).....  | 62 |
| Abbildung 25: Normierte Einflusskurve für den Einfluss der spezifischen Oberfläche auf die<br>Brandausbreitung (Brandwärme).....   | 62 |
| Abbildung 26: Ergebnismatrix der Brandrisikoabschätzung .....  | 65 |
| Abbildung 27: Spezifische Löschwasserraten mit 0,95-Quantil [79] .....   | 68 |
| Abbildung 28: Formular 1 des Berechnungsprogramms mit Eingabe der Abfallart, der<br>Gesamtmasse, der Lagerform, der Überdeckungshöhe (wenn vorhanden), den<br>Lagerdauern und dem Windeinfluss ..... | 70 |
| Abbildung 29: Formular 2 des Berechnungsprogramms mit Eingabe der Grundformen und<br>Abmessungen der einzelnen Fraktionen.....   | 71 |
| Abbildung 30: Formular 3 des Berechnungsprogramms mit Eingabe der Abmessungen der<br>gesamten Schüttung.....   | 72 |

---

|  |    |
|--|----|
| Abbildung 31: Berechnungsblatt 1 zur Berechnung der weiterverwendeten Massen- und Volumenanteile.....                      | 73 |
| Abbildung 32: Berechnungsblatt 2 mit Berechnung des gesamten Heizwertes und Ausgabe des geringsten TRP der Schüttung ..... | 74 |
| Abbildung 33: Berechnungsblatt 3 mit Berechnung der gesamten spezifischen Oberfläche der Partikel in der Schüttung.....    | 75 |
| Abbildung 34: Beiblatt der Gewichtungsfaktoren.....  | 76 |
| Abbildung 35: Ergebnisblatt 1 zur Darstellung der Entzündungswahrscheinlichkeit .....                                      | 77 |
| Abbildung 36: Ergebnisblatt 2 zur Darstellung der Brandauswirkung .....  | 77 |
| Abbildung 37: Abmessungen des Abfalllagers der Case Study-Berechnungen.....  | 80 |
| Abbildung 38: Ergebnismatrix der Modellvalidierung mit Hackgut .....   | 82 |
| Abbildung 39: Risikomatrix der Ergebnisse aller Durchgänge der Case Study .....  | 84 |
| Abbildung 40: Vergleich des Risikomanagementprozesses mit der Methodenentwicklung .....                                    | 87 |

# Tabellenverzeichnis

|  |    |
|--|----|
| Tabelle 1: Lagerkategorie in Abhängigkeit der Lagerkonfiguration nach ÖNORM EN 12845 [10] .....                  | 16 |
| Tabelle 2: Technische Brandschutzmaßnahmen nach der OIB Richtlinie [11] .....                                    | 17 |
| Tabelle 3: Beschreibung der Einflussfaktoren nach TRVB 100 A [12] .....  | 18 |
| Tabelle 4: Ergebnisse der Entscheidungsbaummethode nach [13] .....   | 20 |
| Tabelle 5: Erklärung der Terme der Bilanzgleichung .....   | 42 |
| Tabelle 6: Interpretation der Entzündungswahrscheinlichkeit basierend auf [6][73] .....                          | 63 |
| Tabelle 7: Interpretation der Brandauswirkung basierend auf [6] .....  | 64 |
| Tabelle 8: Vorbeugende Brandschutzmaßnahmen für Schüttungen .....  | 66 |
| Tabelle 9: Abfallfraktionen der Case Study .....   | 79 |
| Tabelle 10: Ergebnisse für Entzündungswahrscheinlichkeit und Brandauswirkung der Abfälle in der Case Study ..... | 83 |

# 1 Einleitung

Die Abfallwirtschaft ist seit jeher einem stetigen Wandel unterzogen. Jeder einzelne Prozessschritt, beginnend mit der Sammlung, über den Transport und die Aufbereitung bis hin zur Verwertung oder Beseitigung wird ständig optimiert und verbessert. Zwischenzeitlich muss das gehandhabte Gut gelagert werden, da ein Überführen in den anschließenden Schritt zum Beispiel wegen Kapazitätsengpässen oder Wartezeiten nicht sofort möglich ist. Diese Lager werden auch Zwischenlager genannt und müssen teils große Mengen Abfall über unterschiedlich lange Zeiträume aufnehmen sowie sicher lagern können. Besonders gut lässt sich dies am Beispiel von gemischten Kunststoffabfällen zeigen, von denen 2019 in Österreich 197.550 t der Aufbereitung zugeführt wurden. Demgegenüber stehen 177.730 t stofflich sortierte Kunststoffabfälle als Output der Aufbereitung. Die Differenz von 19.820 t wurde zwischengelagert. [1]

## 1.1 Problemstellung

Nach wie vor kommt es zu häufigen Bränden in Zwischenlagern, welche mit teilweise erheblichen Zerstörungen von Infrastruktur und Freisetzung von gesundheitsschädigenden Brandprodukten sowie der damit verbundenen Gefährdung von Mensch und Umwelt einhergehen.

Einzelne Statistiken zeigen sogar einen Anstieg bei Brandereignissen in der österreichischen Abfallwirtschaft über die letzten Jahre (Abbildung 1). Erschwerend kommt hinzu, dass die Art des brennenden Abfalls und die Brandursache häufig nicht eindeutig bestimmbar sind. [2]

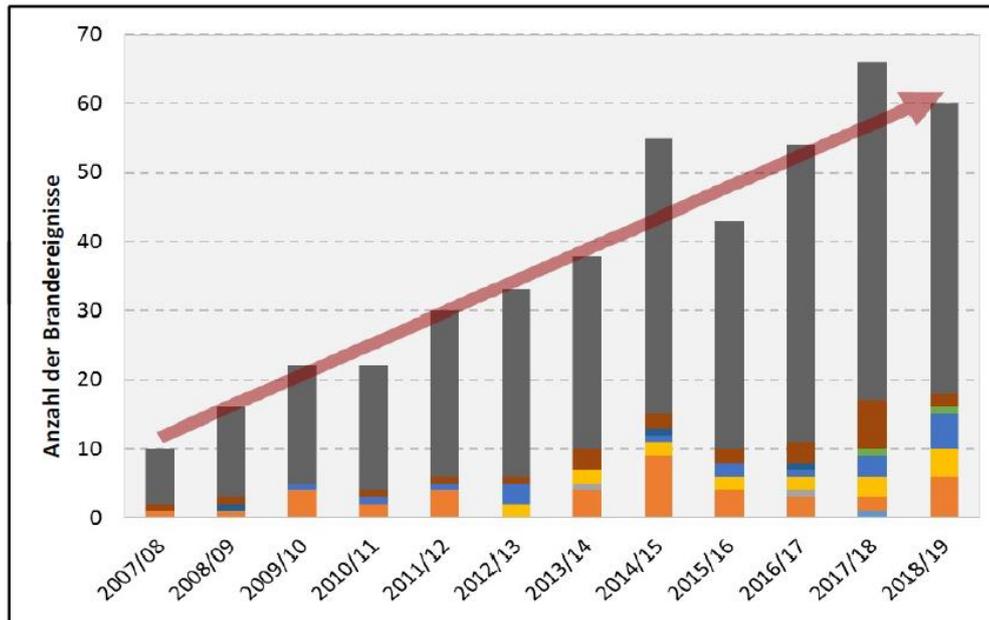


Abbildung 1: Erfasste Anzahl der Brandereignisse in der österreichischen Abfall-, Entsorgungs- und Ressourcenwirtschaft [2]

Die Betreiber und Versicherungen sind durchaus daran interessiert, derartige Brände möglichst zu verhindern beziehungsweise geeignete Maßnahmen zur Unterdrückung und Bekämpfung ergreifen zu können. Unglücklicherweise helfen die immer häufiger installierten automatisierten Maßnahmen, welche einerseits eine Entzündung verhindern und andererseits die Auswirkung begrenzen sollen, nicht im gewünschten Ausmaß.

Problematisch ist hierbei, dass die Zusammensetzung der Abfälle systembedingt einer großen Schwankungsbreite unterliegt und brandschutztechnische Regelwerke aus diesem Grund spärlich vorhanden und teilweise nur bedingt anwendbar sind. Zusätzlich führen Zündquellen (Spraydosen, Akkus, usw.) in Kombination mit Selbsterwärmungseffekten und oftmals unterschätzten hohen Brandlasten der Materialien zu erschwerten Bedingungen bei der Bemessung von präventiven als auch abwehrenden Brandschutzmaßnahmen. [3]

## 1.2 Zielsetzung

Die wichtigsten Einflussgrößen sowohl für die Entzündung eines Abfallhaufens als auch für die damit verbundenen Auswirkungen eines Brandes sind im Großen und Ganzen bekannt. Außerdem können die meisten Betriebe auf eine mehr oder weniger hohe Anzahl an Erfahrungswerten zurückgreifen.

Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung einer Methode zur Risikoabschätzung von Brandereignissen von Abfallschüttungen über grundlegende Zusammenhänge, um dem Anlagenbetreiber eine rasche Möglichkeit der Abschätzung des Ausmaßes der Brandgefahr als auch der Gegenmaßnahmen, um die Gefahren auf ein tolerierbares Maß zu beschränken.

Die Dateneingabe, der Berechnungsablauf und die Ergebnisse sollen dabei möglichst einfach, anpassbar und nachvollziehbar sein, um eine hohe Anwenderfreundlichkeit und Praxistauglichkeit zu erzielen.

## 2 Konzepte der Gefahrenabschätzung

Die Ermittlung der Eintrittswahrscheinlichkeit und die Auswirkungsbetrachtung sind im Allgemeinen Teil einer Risikoanalyse, welche in der Folge näher erläutert wird. Anschließend werden bestehende technische Regelwerke für Industrien, u. a. Brandschutzkonzepte, die grundsätzlich einen einfachen und allgemeinen Einsatz ermöglichen, dargestellt.

### 2.1 Risikoanalyse

Obwohl im allgemeinen Sprachgebrauch gerne verwendet, handelt es sich bei genauerer Betrachtung um einen durchaus vielfältigen Begriff mit unterschiedlichen Definitionen. Beispielsweise nennt die ISO 31000 die Auswirkung von Unsicherheit auf Ziele Risiko, wo hingegen nach ÖNORM D 4900 eine Kombination von Wahrscheinlichkeit und Auswirkung als Risiko bezeichnet wird. [4][5]

Die Auswirkungen können die Ziele sowohl positiv (Chance) als auch negativ (Bedrohung) beeinflussen. [5]

Die Unsicherheit lässt sich über Wahrscheinlichkeiten abschätzen, welche Möglichkeiten des Eintritts eines bestimmten Ereignisses darstellen. Überdies muss zwischen der objektiven und der subjektiven Wahrscheinlichkeit unterschieden werden. Objektive Wahrscheinlichkeit ist eine mathematische Herangehensweise zum Beispiel unter Zuhilfenahme von Statistiken. [4] Subjektive Wahrscheinlichkeit basiert auf persönlichen Erfahrungen und Überzeugungen, weshalb mit größerer Ungenauigkeit zu rechnen ist. [6]

Zur gezielten Koordinierung von Risiken wird das Risikomanagement verwendet, welches wie in Abbildung 2 ersichtlich, als geschlossener Prozess aufgebaut ist. [4]

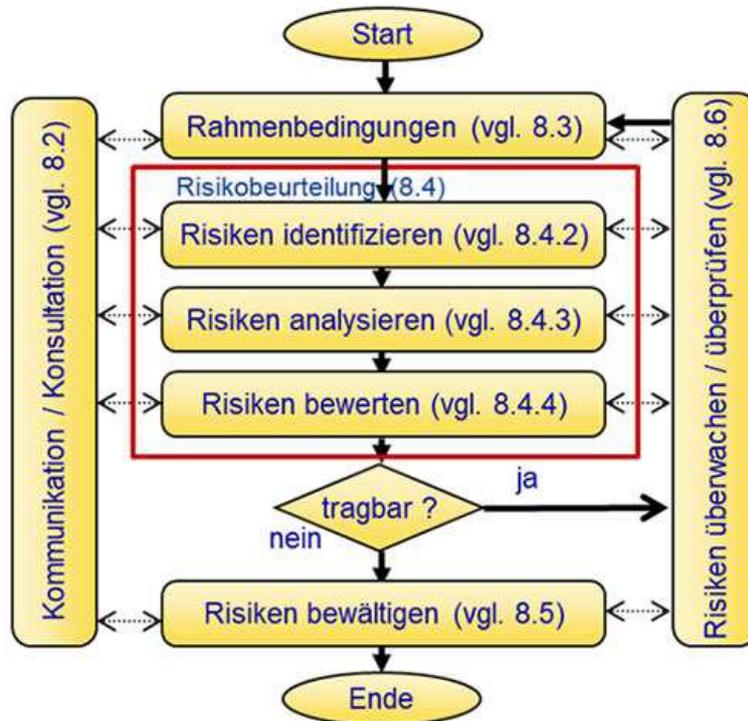


Abbildung 2: Risikomanagementprozess nach ÖNORM D 4901 [7]

Die einzelnen Schritte aus Abbildung 2 sind nachfolgend erklärt [7]:

- Kommunikation/Konsultation: alle relevanten Parteien müssen über alle Aspekte der jeweiligen Risiken informiert werden und einen Beitrag zur Einstufung dieser leisten.
- Rahmenbedingungen: das Risikomanagement muss den jeweiligen Gegebenheiten der Anwendung angepasst werden.
- Risiken identifizieren: es sollten möglichst alle Risiken im Anwendungsbereich erfasst und sichtbar gemacht werden.
- Risiken analysieren: Ursachen und Auswirkungen müssen bestimmt werden.
- Risiken bewerten: erfolgt nach der Definition des schlimmstmöglichen, noch glaubwürdigen Fall (credible worst case) und muss den Einfluss des Risikos festlegen.
- Risiken bewältigen: geeignete Maßnahmen zur Steuerung des Risikos in einen akzeptierten Bereich. Es kann vorkommen, dass nach allen sinnvollen oder möglichen Maßnahmen zur Risikobewältigung ein nicht mehr beeinflussbares Risiko bestehen bleibt (Restrisiko). [5]

- Risiken überwachen/überprüfen: Kontrolle ob der Wirksamkeit der Maßnahmen und des gesamten Risikomanagementprozesses.

Für den Teil der Risikobeurteilung steht eine Reihe von Methoden zur Verfügung, eine Auflistung mit den jeweiligen Vor- und Nachteilen ist dem Anhang I beigefügt. [8] In diesem Fall wird auf die Szenario-Analyse zurückgegriffen, welche nach [8] die einzelnen Prozessschritte sehr gut unterstützt.

Bei einer Szenarioanalyse wird ein Risiko mittels sogenannten Risikoszenarien beurteilt, welche das Risiko mit Ursachen und Auswirkungen möglichst genau beschreiben sollen. Dies erfolgt unter Berücksichtigung des „credible worst case“. Dabei ist jedes Szenario durch Eintrittswahrscheinlichkeit und Auswirkung kategorisiert, zur anschließenden Darstellung wird eine Risikomatrix herangezogen. Des Weiteren kann die Szenarioanalyse sowohl den aktuellen Zustand (Ist-Zustand), als auch den durch bestimmte Maßnahmen erreichbaren zukünftigen Zustand (Soll-Zustand) beschreiben. [8] Der gewünschte Soll-Zustand und damit das akzeptierte Risiko sind dabei für den spezifischen Fall festzulegen und auch in die Risikomatrix einzutragen (Wesentlichkeitsgrenze). [5] Die Szenarioanalyse ist grundsätzlich zur präventiven quantitativen und qualitativen Risikobeurteilung fähig. Bei quantitativer Herangehensweise wird das Risiko in Zahlen ausgedrückt, also zum Beispiel die Eintrittswahrscheinlichkeit oder die Auswirkung. [9] Ein weiterer Vorteil der Szenarioanalyse ist die einfache und intuitive Darstellbarkeit der Ergebnisse.

Der Risikomanagementprozess im Hinblick auf einen möglichen Brandfall wird Brandrisikoabschätzung genannt. Hierbei können einerseits entweder die Wahrscheinlichkeit oder die Auswirkungen und andererseits beides ermittelt werden, der Umfang ist in jedem Fall vorab festzulegen. [6]

## 2.2 Technische Regelwerke

Nachfolgend sind diverse, bereits bestehende Brandschutzkonzepte oder ähnliche Methoden angeführt. Hier ist festzuhalten, dass die Abschätzung des Brandverhaltens nicht das eigentliche Ziel des Konzeptes sein muss, sondern lediglich ein zusätzlicher bzw. vorab notwendiger Schritt.

### 2.2.1 ÖNORM EN 12845

ÖNORM EN 12845 beschäftigt sich grundsätzlich mit automatischen Sprinkleranlagen, im Anhang B ist eine vereinfachte Methode zur Zuordnung von Lagergut enthalten. Als Lagergut werden in diesem Fall sowohl der jeweilige Stoff als auch die Verpackung bezeichnet und abhängig von der Zusammensetzung der sogenannte Materialfaktor bestimmt. In Abbildung 3 ist das entsprechende Diagramm dargestellt.

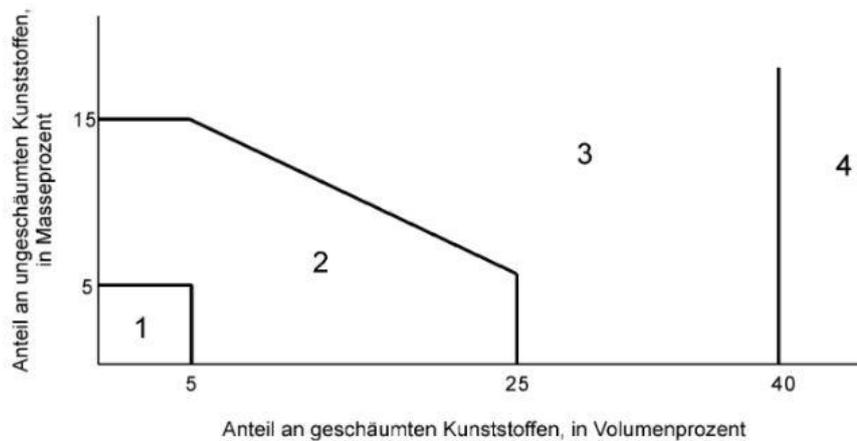


Abbildung 3: Bestimmung des Materialfaktors nach der Zusammensetzung des Lagergutes nach ÖNORM EN 12845 [10]

Mit dem Materialfaktor kann in Abhängigkeit der Lagerkonfiguration eine Kategorie zugewiesen werden, die dafür verwendete Tabelle ist in Tabelle 1 ersichtlich. Außerdem ist die Kategorie für bestimmte Güter bereits vorab festgelegt worden, im Zweifelsfall ist die höhere Kategorie heranzuziehen.

Tabelle 1: Lagerkategorie in Abhängigkeit der Lagerkonfiguration nach ÖNORM EN 12845 [10]

| Lagerkonfiguration   | Materialfaktor        |                       |                       |              |
|--|-----------------------|-----------------------|-----------------------|--------------|
|  | 1                     | 2                     | 3                     | 4            |
| außenliegender Kunststoffbehälter mit nichtbrennbarem Inhalt           | Kategorien I, II, III | Kategorien I, II, III | Kategorien I, II, III | Kategorie IV |
| außenliegende Kunststoffflächen — ungeschäumt                          | Kategorie III         | Kategorie III         | Kategorie III         | Kategorie IV |
| außenliegende Kunststoffflächen — geschäumt                            | Kategorie IV          | Kategorie IV          | Kategorie IV          | Kategorie IV |
| offene Struktur  | Kategorie II          | Kategorie II          | Kategorie III         | Kategorie IV |
| Materialien in massiven Blöcken  | Kategorie I           | Kategorie I           | Kategorie II          | Kategorie IV |
| Materialien in Granulat- und Pulverform                                | Kategorie I           | Kategorie II          | Kategorie II          | Kategorie IV |
| keine besondere Konfiguration  | Kategorie I           | Kategorie II          | Kategorie III         | Kategorie IV |
| ANMERKUNG Erläuterungen zu Lagerkonfigurationen siehe B.3.2 bis B.3.8. |                       |                       |                       |              |

## 2.2.2 OIB-Richtlinie 2.1

Die OIB-Richtlinie 2.1 beschreibt den Brandschutz von Betriebsbauten, wobei grundlegende Inhalte der ÖNORM EN 12845, z.B. die vorgefertigte Kategorieneinteilung von Gütern, aufgegriffen wurden. Die Richtlinie enthält eine detaillierte Auflistung der vorgeschriebenen technischen Brandschutzmaßnahmen in Abhängigkeit der Lagerabschnittsfläche und der Lagerguthöhe. Die dafür zu verwendende Tabelle ist in Tabelle 2 dargestellt.

Tabelle 2: Technische Brandschutzmaßnahmen nach der OIB Richtlinie [11]

| Lagerguthöhe<br>$h_L$ in m   | Lagerabschnittsfläche bei Kategorie I in $m^2$   |                           |                           |                           |
|--|--|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
|  | > 600 und $\leq$ 1.200                           | > 1.200 und $\leq$ 1.800  | > 1.800 und $\leq$ 3.000  | > 3.000 und $\leq$ 6.000  |
| $4 < h_L \leq 7,5$   | Rauchableitung <sup>(1)</sup>                    | RWA <sup>(2)</sup>        | RWA <sup>(2)</sup>        | RWA <sup>(3)</sup><br>BMA |
| $7,5 < h_L \leq 9$   | Rauchableitung <sup>(1)</sup>                    | RWA <sup>(3)</sup>        | RWA <sup>(3)</sup><br>BMA | RWA <sup>(3)</sup><br>BMA |
|  | Lagerabschnittsfläche bei Kategorie II in $m^2$  |                           |                           |                           |
|  | > 600 und $\leq$ 1.200                           | > 1.200 und $\leq$ 1.800  | > 1.800 und $\leq$ 3.000  | > 3.000 und $\leq$ 6.000  |
| $4 < h_L \leq 7,5$   | Rauchableitung <sup>(1)</sup>                    | RWA <sup>(3)</sup>        | RWA <sup>(3)</sup><br>BMA | RWA <sup>(2)</sup><br>EAL |
| $7,5 < h_L \leq 9$   | Rauchableitung <sup>(1)</sup>                    | RWA <sup>(2)</sup><br>BMA | RWA <sup>(2)</sup><br>EAL | RWA <sup>(2)</sup><br>EAL |
|  | Lagerabschnittsfläche bei Kategorie III in $m^2$ |                           |                           |                           |
|  | > 600 und $\leq$ 1.200                           | > 1.200 und $\leq$ 1.800  | > 1.800 und $\leq$ 3.000  | > 3.000 und $\leq$ 6.000  |
| $4 < h_L \leq 7,5$   | Rauchableitung <sup>(1)</sup>                    | RWA <sup>(2)</sup><br>BMA | RWA <sup>(2)</sup><br>EAL | RWA <sup>(2)</sup><br>EAL |
| $7,5 < h_L \leq 9$   | RWA <sup>(2)</sup>                               | RWA <sup>(2)</sup><br>EAL | RWA <sup>(2)</sup><br>SPA | RWA <sup>(2)</sup><br>SPA |
|  | Lagerabschnittsfläche bei Kategorie IV in $m^2$  |                           |                           |                           |
|  | > 600 und $\leq$ 1.200                           | > 1.200 und $\leq$ 1.800  | > 1.800 und $\leq$ 3.000  | > 3.000 und $\leq$ 6.000  |
| $4 < h_L \leq 7,5$   | RWA <sup>(2)</sup>                               | RWA <sup>(3)</sup><br>BMA | RWA <sup>(2)</sup><br>EAL | RWA <sup>(2)</sup><br>SPA |
| $7,5 < h_L \leq 9$   | RWA <sup>(3)</sup><br>BMA                        | RWA <sup>(2)</sup><br>EAL | RWA <sup>(2)</sup><br>SPA | RWA <sup>(2)</sup><br>SPA |
| (1) Die Rauchableitung muss gemäß Punkt 3.7.1 ausgeführt werden;               |  |                           |                           |                           |
| (2) Die Rauch- und Wärmeabzugsanlage muss gemäß Punkt 3.7.2 ausgeführt werden; |  |                           |                           |                           |
| (3) Die Rauch- und Wärmeabzugsanlage muss gemäß Punkt 3.7.3 ausgeführt werden. |  |                           |                           |                           |

## 2.2.3 TRVB 100 A

Diese Richtlinie enthält ein vereinfachtes Berechnungsverfahren für brandschutztechnische Voraussetzungen von Betriebsbauten, bei denen eine höhere Geschoßfläche innerhalb von Brandabschnitten zulässig ist. Die Grundlage bildet die OIB-Richtlinie 2.1 mit den darin getroffenen Annahmen, die Eintrittswahrscheinlichkeit eines Brandszenarios wird nicht berücksichtigt. Die Berechnung erfolgt über den dimensionslosen Faktor B (spezifische Brandgefahr), welcher sich wiederum aus mehreren Einzelfaktoren mit

entsprechenden Gewichtungen zusammensetzt. Die jeweiligen Faktoren sind in Tabelle 3 näher beschreiben. [61]

$$B = q * \frac{1,5}{Q} + c * \frac{1,4}{C} + e * \frac{1,0}{E} + h * \frac{8}{H} + l * \frac{40}{L}$$

Die spezifische Brandgefahr B wird mit der zulässigen Fläche  $A_{\text{Bezug}}$  des Hauptbrandabschnittes multipliziert und ergibt die neue zulässige Fläche  $A_{\text{Zul}}$ .

$$A_{\text{Zul}} = A_{\text{Bezug}} * B$$

Tabelle 3: Beschreibung der Einflussfaktoren nach TRVB 100 A [12]

| <b>Faktor</b> | <b>Beschreibung</b>   |
|---------------|---|
| Q             | Brandbelastung (Standardwert: für 1100 MJ/m <sup>2</sup> 1,5) |
| C             | Brandausbreitungsgeschwindigkeit (Standardwert: 1,4)          |
| E             | Bereitschaftsform der Feuerwehr (Standardwert: 1,0)           |
| H             | Hallenhöhe (Standardwert: 8m)                                 |
| L             | Löschangriffsweg (Standardwert: 40m)                          |
| q             | Gewichtung für Brandbelastung: 0,5                            |
| c             | Gewichtung für Brandausbreitungsgeschwindigkeit: 0,25         |
| e             | Gewichtung für Bereitschaftsform der Feuerwehr: 0,05          |
| h             | Gewichtung für Hallenhöhe: 0,05                               |
| l             | Gewichtung für Löschangriffsweg: 0,15                         |

Es ist ersichtlich, dass die Brandbelastung den größten Einfluss auf die spezifische Brandgefahr darstellt, gefolgt von der Brandausbreitungsgeschwindigkeit.

## 2.2.4 Entscheidungsbaummethode

Der Arbeitskreis Brandschutz des Verbandes Österreichischer Entsorgungsbetriebe (VOEB) hat sich zum Ziel gesetzt, brandschutztechnische Maßnahmen für derartige Betriebe zu entwickeln. Die dementsprechende Methode wurde vom Lehrstuhl für Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft der Montanuniversität Leoben entworfen, um das Brandrisiko von Abfällen anhand gewisser Kriterien zu bewerten.

Diese Kriterien sind nachfolgend kurz erläutert [13]:

- Brennbarkeit  
Vermögen eines Stoffes, nach der Entzündung selbstständig weiterzubrennen.
- Anteil an sicherheitstechnisch relevanten Stoffen bzw. Bestandteilen  
Umfassen beispielsweise Batterien, Akkumulatoren, Druckgaspackungen
- Erhöhtes Selbstentzündungspotenzial  
Wärmeabfuhr aus Schüttung ist kleiner als Wärmezufuhr durch mikrobiologische und chemisch-physikalische Prozesse, dadurch Anstieg der Temperatur.

Jeder Abfall wird mittels Entscheidungsfragen in „Ja“ oder „Nein“ schrittweise bewertet, der Ablauf ist in Abbildung 4 graphisch dargestellt.

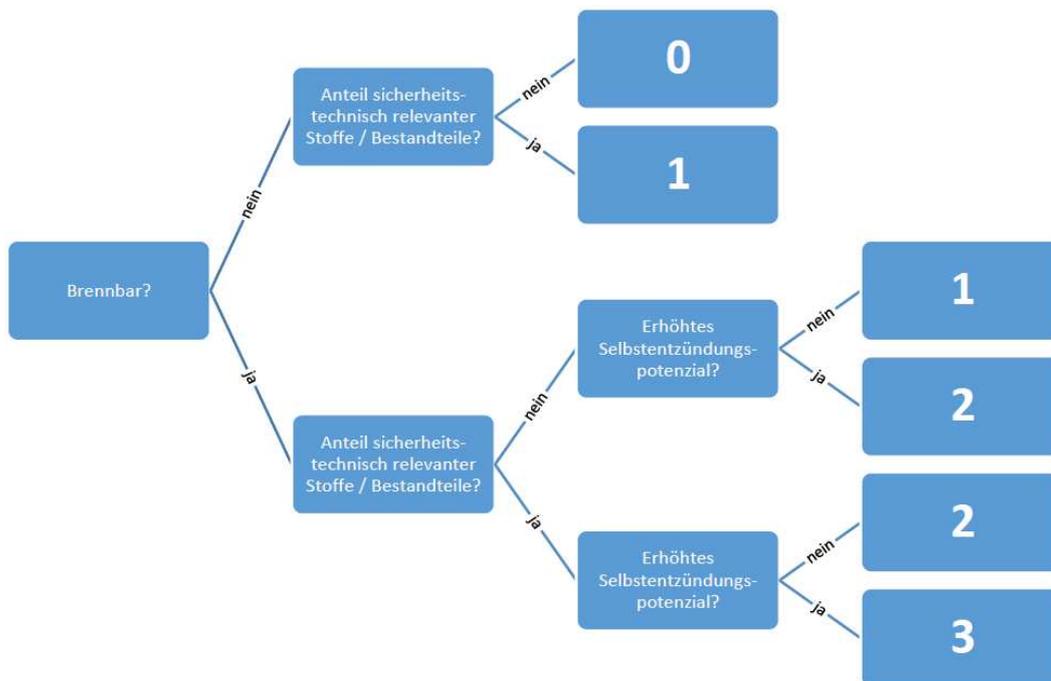


Abbildung 4: Graphische Darstellung des Ablaufs der Brandrisikoabschätzung nach der Entscheidungsbaummethode nach [13]

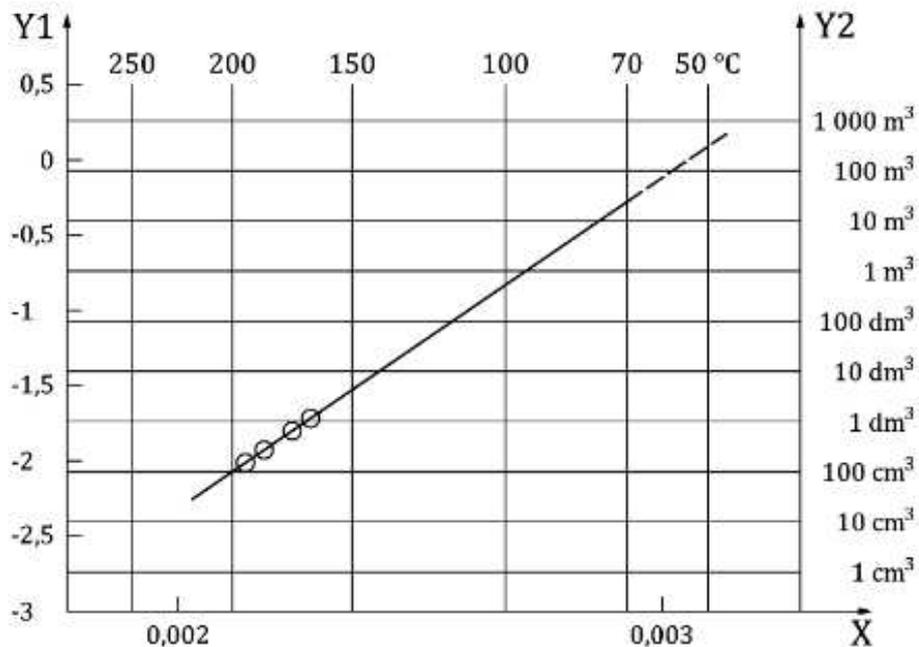
Die dadurch erzielbaren Ergebnisse sind auf einen kleinen Bereich beschränkt und in Tabelle 4 ersichtlich.

Tabelle 4: Ergebnisse der Entscheidungsbaummethode nach [13]

| Abfall brennbar? | Anteil sicherheits-technisch relevanter Stoffe/Bestandteile? | Erhöhtes Selbstentzündungspotenzial? | Brandrisikostufe | Brandrisikoklasse bezogen auf Abfallart |
|------------------|--|--------------------------------------|------------------|---|
| J                | J  | J                                    | 3                | hoch                                    |
| J                | J  | N                                    | 2                | mittel                                  |
| J                | N  | J                                    | 2                | mittel                                  |
| J                | N  | N                                    | 1                | niedrig                                 |
| N                | J  | N                                    | 1                | niedrig                                 |
| N                | N  | N                                    | 0                | kein                                    |
| (N               | N  | J                                    | -                | irrelevant)                             |
| (N               | J  | J                                    | -                | irrelevant)                             |

### 2.2.5 ÖNORM EN 15188

Diese Norm beschreibt ein Verfahren zur Bestimmung der Selbstentzündungstemperatur im Labormaßstab. Brennbare Stäube und Schüttgüter werden zu einem definierten Volumen (z.B. 1 Liter) geformt und in einen Ofen gegeben. Die Ofentemperatur wird schrittweise erhöht, womit sich auch die Probe erwärmt, die Temperaturmessung erfolgt mittels Thermoelemente. Sobald die Proben­temperatur exponentiell ansteigt, ist die Selbstentzündungstemperatur erreicht. Durch mehrere Versuche mit unterschiedlichen Volumina kann schließlich eine Kurve erstellt werden, mittels Extrapolation wird die Selbstentzündungstemperatur für größere Volumina bestimmt. [14] Ein dementsprechendes Diagramm ist in Abbildung 5 ersichtlich, auch eine ähnliche Auftragung der Induktionszeit ist möglich. [15] Die Verwendung dieser einfachen Methode ist jedoch nur bedingt sinnvoll, da die Extrapolation nicht überprüft werden kann und nur für definierte Geometrien gültig ist. Außerdem werden mikrobiologische Prozesse vernachlässigt. [15]



**Legende**

$$Y1 = \lg\left(\frac{V/1 \text{ m}^3}{A/1 \text{ m}^2}\right)$$

Y2 V = Volumen (Würfel)

X reziproke Selbstentzündungstemperatur,  $\frac{1}{T_{SI}/1K}$

Abbildung 5: Ergebnisdiagramm mit extrapolierte Linie ("Arrhenius-Diagramm") nach ÖNORM EN 15188 [14]

**2.2.6 Fazit über bestehende Konzepte**

Die aufgezählten Methoden zeichnen sich durch einfache Anwendbarkeit sowie gute Darstellung der Ergebnisse aus. Allerdings sind sie nur für die darin beschriebenen Spezialfälle anwendbar und beinhalten teilweise starke Vereinfachungen.

Ziel der vorliegenden Methodenentwicklung soll daher sein, die einfache Anwendbarkeit und übersichtliche Darstellung beizubehalten und spezielle Fälle für Abfallschüttungen hinzuzufügen. Die Verwendung von Vereinfachungen ist unumgänglich, soll jedoch durch weitestgehende Objektivierung und Erfahrungswerte ausgeglichen werden. Aufgrund der Darstellungsmethode wurde die Szenarioanalyse verwendet.

Wichtig ist hierbei, den Risikomanagementprozess von Beginn an mit quantifizierbaren Daten abzuwickeln. Da Abfallschüttungen im eigentlichen Sinn auch nur eine Form von Feststoffschüttungen sind, sind die dafür heranzuziehenden Größen bekannt.

### 3 Brände in Schüttungen

Feuer an sich ist prinzipiell nichts schlechtes, da es in zahlreichen technischen Anwendungen essenziell ist. Festzuhalten ist dabei aber, dass in diesen Fällen das Feuer bewusst innerhalb eines zeitlich und örtlich begrenzten Rahmens für einen nützlichen, sinnvollen Zweck entzündet wird („Nutzfeuer“). [16][17]

Im Gegensatz dazu ist ein Brand weder zeitlich noch örtlich begrenzt und wurde auch nicht für einen nützlichen Zweck entzündet („Schadfeuer“). [16] Möglicherweise wurde dieser sogar vorsätzlich ausgelöst um Schaden zu bewirken, was allgemein als Brandstiftung verstanden wird. [17]

Konkret kann ein Brand einen oder mehrere der angeführten Punkte gefährden, die im folgenden Schutzziele genannt werden [6]:

- Menschen: Personal, Anwohner
- Sachwerte: Gebäude, Anlagen
- Umwelt: Wasser, Boden, Luft
- Betrieb: Produktion, Kommunikation

Grundsätzlich ist dem Schutz menschlichen Lebens der höchste Stellenwert zuzuschreiben, gefolgt vom Schutz der Umwelt. Sachwerte sind vergleichsweise einfach zu ersetzen, eine Unterbrechung der betrieblichen Abläufe ist in Anbetracht der anderen Schutzziele beinahe vernachlässigbar. Hierbei ist zu erwähnen, dass obwohl die höchsten Sachschäden in Industrie und Gewerbe auftreten, dabei überwiegend keine Personen zu Schaden kommen. [18]

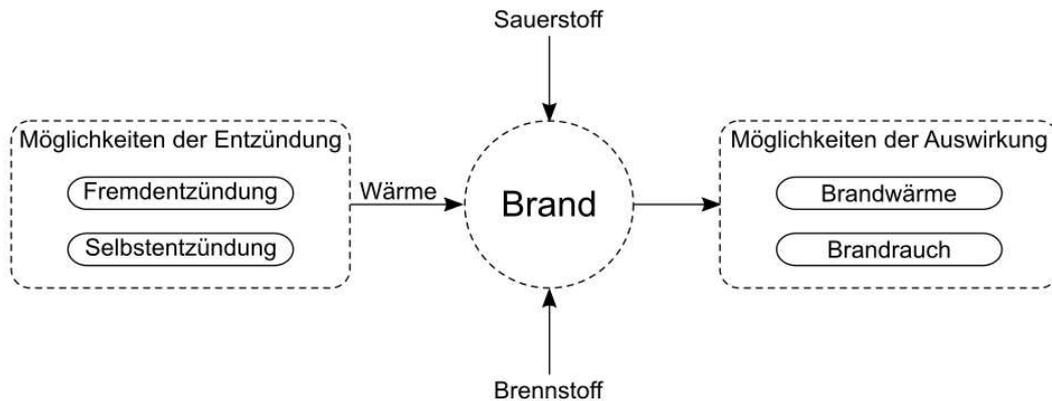


Abbildung 6: Die Bedrohungen der Schutzziele zusammengefasst als Möglichkeiten der Entzündung und der Auswirkung [2][7][19]

Die Schutzziele können durch unterschiedliche Bedrohungen negativ beeinflusst werden, wie in Abbildung 6 ersichtlich sind dies die Möglichkeiten der Entzündung und Auswirkung eines Brandes: Die Voraussetzungen zur Entstehung sind das gleichzeitige Vorhandensein eines brennbaren Stoffes, Sauerstoff und einer Wärmequelle. Die Wärme stammt bei Schüttgütern entweder aus Fremd- oder Selbstentzündung, welche unabhängig voneinander auftreten können. Im Gegensatz dazu sind Wärme und Rauch die Produkte desselben Prozesses. Wärmefreisetzung ist, anders als Rauchentwicklung, charakteristisch für eine Verbrennung. [17]

Die Bedrohungen werden durch unterschiedliche Parameter beeinflusst und lassen sich nach [20] vorab in zwei Kategorien einteilen, welche im weiteren Verlauf beibehalten werden:

- Stoffspezifische Einflussparameter: chemische, physikalische und mechanische Eigenschaften [21]
- Systemspezifische Einflussparameter: Geometrie, Anordnung und Umgebungsbedingungen [21]

An dieser Stelle sei festgehalten, dass sich viele Parameter auch gegenseitig beeinflussen beziehungsweise direkt voneinander abhängig sind und die Veränderung eines einzelnen Parameters zwangsläufig Auswirkungen auf einen oder mehrere andere Parameter hat.

Die Einflussparameter für Fremd- und Selbstentzündung, Wärme und Rauch wurden in diversen Literaturen bereits identifiziert und mittels facheinschlägiger Literaturrecherche möglichst vollständig erfasst. Sie sind notwendig, da mit ihnen die Bedrohungen gesteuert werden können, darüber hinaus handelt es sich um quantifizierbare Größen, welche durch einen Wert darstellbar sind. Die Einteilung in die genannten Kategorien erfolgte intuitiv bzw. logisch, teilweise wurde bereits in den Literaturen eine ähnliche Auswahl getroffen. Darüber hinaus wurden einige Parameter in diversen Literaturen

unterschiedlich genannt. War dies der Fall, wurden die Begriffe der umfassenderen Quelle verwendet. Diese anschließend relevanten Einflussparameter genannten Größen werden im Verlauf des Textes „**Fett**“ hervorgehoben. Nachfolgend werden außerdem die Bedrohungen bzw. die Einflüsse darauf beschrieben, um eine Übersicht und ein besseres Verständnis dafür zur Verfügung zu stellen.

### 3.1 Fremdentzündung

Bei der Fremdentzündung wird die für die Entzündung notwendige Energie einer Zündquelle entnommen, welche die Zündenergie in welcher Form auch immer gespeichert hat.

Einerseits enthalten Abfälle möglicherweise Bestandteile, welche aufgrund ihrer Bauweise beziehungsweise durch etwaige auftretende Beschädigungen zu Wärmeentwicklung oder Erzeugung von elektrischen Funken im Stande sind. Dazu gehören unter anderem elektrochemische Energiespeicher (Gerätebatterien, ...), Druckgaspackungen (Spraydosen, Gasfeuerzeuge, ...) und Problemstoffe (diverse Chemikalien). [13]

Auch durch die hohe Stromstärke eines **Blitzes** kann ein Abfallhaufen in Brand geraten, weshalb auf ausreichenden baulichen Blitzschutz zu achten ist.

Eine weitere Möglichkeit besteht durch andere, aus einer völlig externen Quelle stammenden Wärme und Funken. **Funkenflug** im Sinne von heißen oder brennenden Brandprodukten aus einem Brandereignis auf dem Betriebsgelände oder in der näheren Umgebung um den Betrieb kann ausreichen, um einen Abfallhaufen zu entzünden. Technische Defekte von zum Beispiel Anlagenteilen, bei denen elektrische Funken freigesetzt werden, fallen ebenfalls in diese Kategorie.

Schlussendlich können Abfälle auch durch mutwillige Sabotageakte, also **Brandstiftung**, zum Brennen gebracht werden. Die Wahrscheinlichkeit hierfür kann nur durch eine ausreichende Angriffssicherheit gering gehalten werden.

Die für die Fremdentzündung relevanten Einflussparameter wurden von [13] definiert und sind unter Einhaltung der vorher beschriebenen Konvention in stoff- und systemspezifische Parameter eingeteilt in Abbildung 7 ersichtlich.

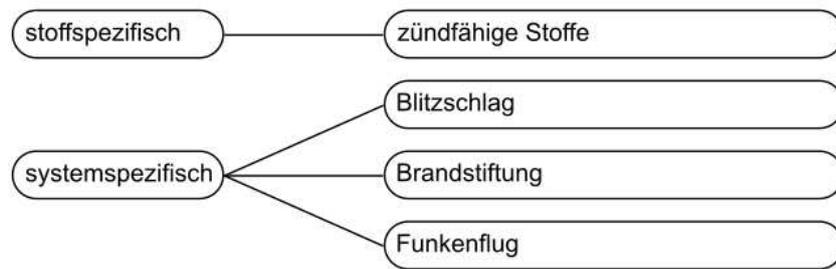


Abbildung 7: Relevante Einflussparameter auf die Selbstentzündung [13]

### 3.2 Selbstentzündung

Die Selbstentzündung tritt ohne eine explizite Zündquelle auf, ihr eilt im Allgemeinen der Prozess der Selbsterwärmung voraus, bei welchem die Wärmeproduktionsrate innerhalb der Schüttung höher ist als die Wärmeabgaberate an die Umgebung. Schüttungen können nach ihren Stoff- und Wärmeaustauschvorgängen in drei Kategorien eingeteilt werden [22]:

- Die Durchströmbarkeit ist so gering, dass weder die Wärme gut abgeführt noch genügend Sauerstoff nachgeliefert werden kann und es höchstwahrscheinlich nicht zu einem Wärmestau kommt.
- Die Durchströmbarkeit liegt in einem Bereich, wo die Wärme schlecht abgeführt aber der Sauerstoff gut zugeführt werden kann. Hier ist das Auftreten eines Wärmestaus sehr wahrscheinlich.
- Die Durchströmbarkeit ist so hoch, dass sowohl die Wärme gut abgeführt als auch der Sauerstoff gut zugeführt werden, wodurch ein Wärmestau ebenfalls sehr unwahrscheinlich wird.

Die Wärme aus exothermen Vorgängen in der Schüttung wird zwar im Volumen produziert und gespeichert, kann jedoch nur über die Oberfläche der Schüttung abgeführt werden. Eine kennzeichnende Größe hierfür ist das **Oberflächen/Volumen-Verhältnis**, welches stark von der **Schüttungshöhe** abhängig ist. [15] Dadurch ist ein gewisses thermisches Ungleichgewicht („Wärmestau“) möglich, infolgedessen sich die Temperatur der Schüttung bis hin zur Entzündung erhöhen kann (Abbildung 8). [15][23]

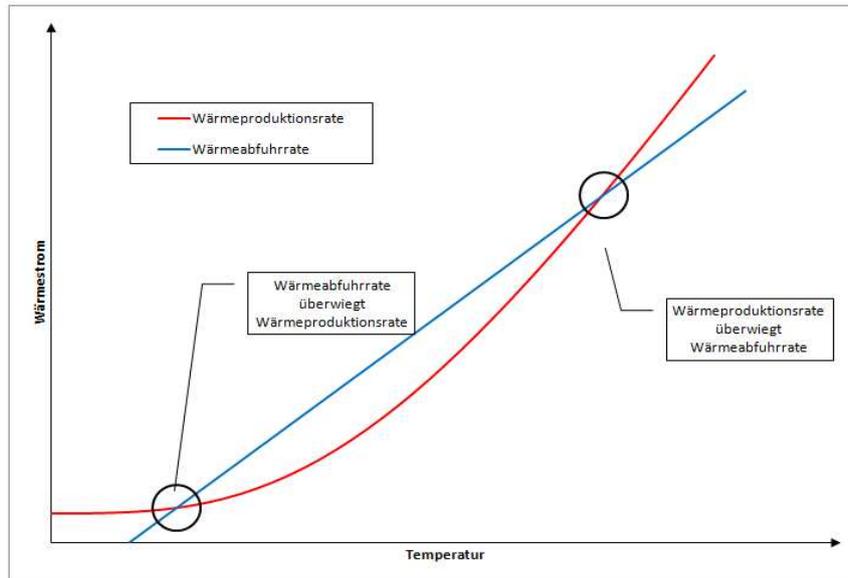


Abbildung 8: Grafische Darstellung der Theorie des Wärmestaus für ein Volumenelement („Semenov-Diagramm“) [24]

### 3.2.1 Mechanismen der Selbstentzündung

Die Wärmeproduktion kann auf mehrere Arten erfolgen, welche nachfolgend beschrieben werden:

- Mikrobiologische Prozesse
- Chemische Prozesse
- Physikalische Prozesse

Jeder dieser Prozesse tritt zu unterschiedlichen Zeiten in unterschiedlichen Intensitäten auf, eine schematische Darstellung dieses Sachverhalts ist in Abbildung 9 ersichtlich.

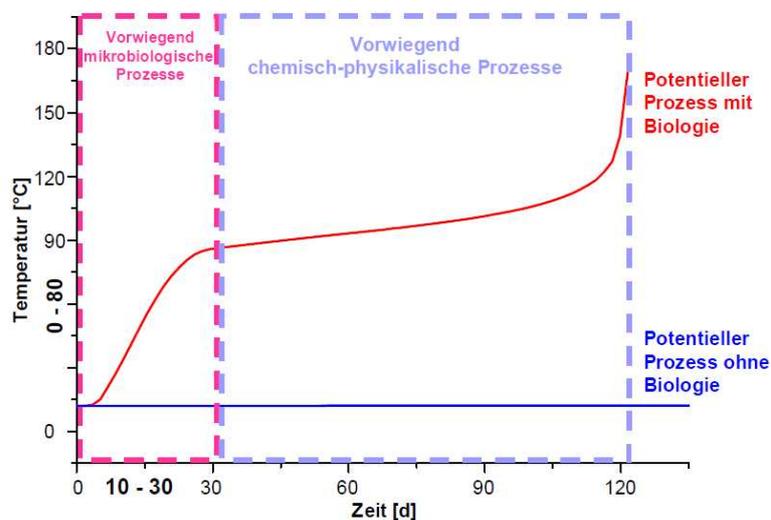


Abbildung 9: Schematische Darstellung der Prozesse der Selbsterwärmung [15]

Für die Wärmezufuhr- und -abfuhr gibt es ebenfalls mehrere Mechanismen:

- Wärmeleitung
- Konvektion
- Wärmestrahlung

Diese werden hier allerdings nur angeführt (siehe 4.1 Modellgrenzen), für eine nähere Beschreibung der Wärmeabfuhr und -speicherung in Schüttungen (**Wärmeleitfähigkeit, spezifische Wärmekapazität**) ebenso wie für die Wärmezufuhr (z. B. aufgrund der **Umgebungstemperatur**) siehe [21][22][25].

### 3.2.1.1 Mikrobiologische Prozesse

Wie aus Abbildung 9 ersichtlich, dominieren mikrobiologische Vorgänge die anfängliche Wärmeproduktion.

Eine wichtige Voraussetzung hierbei ist, dass der jeweilige Stoff biologisch abbaubar ist, also die **chemische Struktur** von Mikroorganismen (hauptsächlich Bakterien) durch enzymatische Prozesse unter Bildung von neuen Stoffen zersetzt werden kann. [26][27] Dies ist sowohl für natürliche als auch für synthetische organische Verbindungen möglich, wobei erstere deutlich schneller abgebaut werden. [26][28] Am Ende des vollständigen biologischen Abbaus steht die sogenannte Mineralisierung, das alleinige Vorhandensein von anorganischen Bestandteilen. [26] Der biologische Abbau von natürlichen organischen Materialien wird im technischen Maßstab beispielsweise bei der Kompostierung angewandt. Die natürlichen Verbindungen, welche auch für eine Kompostierung in Frage kommen, werden auch als kompostierbar bezeichnet. Dazu zählen folgende Stoffgruppen:

- Fette
- Proteine
- Kohlenhydrate
- Lignin

Die meisten Fette, der niedermolekulare Teil der Proteine sowie lösliche und leicht verfügbare Kohlenhydrate werden schnell umgesetzt, die Wärmeproduktion startet schon innerhalb von 24 Stunden. Höhermolekulare Kohlenhydrate und Lignin sind biologisch schwerer abbaubar. [29]

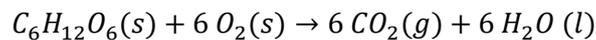
Die synthetischen Verbindungen umfassen in diesem Fall vor allem Kunststoffe und künstlich hergestellte Polymere. Obwohl sie grundsätzlich biologisch abbaubar sind, müssen zuerst die Polymere in Monomere umgewandelt werden. Dies ist ein langwieriger Prozess

und erfordert eine Vielzahl spezieller Mikroorganismen, welche sich erst entwickeln müssen. [17]

Je nachdem welche Verfügbarkeit von Sauerstoff vorliegt, lassen sich zwei Arten des biologischen Abbaus unterscheiden. Beim aeroben Abbau sind Mikroorganismen vorherrschend, die Sauerstoff zum Atmen brauchen. Im Gegensatz dazu entwickeln sich anaerobe Organismen ohne Sauerstoff.

Aerober und anaerober Abbau führen, neben dem Aufbau von Zellsubstanz der Mikroorganismen, auch zu unterschiedlichen Abbauprodukten und Wärmefreisetzungen, die jeweiligen Reaktionen sind für Glukose beispielhaft dargestellt. [21][30]

Unter aeroben Bedingungen entstehen Kohlendioxid und Wasser, wobei 2816 kJ/mol Wärme freigesetzt werden [30]:



Die Reaktionsprodukte des anaeroben Abbaus sind Kohlendioxid und Methan sowie 145 kJ/mol Wärme [30]:



Die Wärmeproduktion für den anaeroben Abbau beträgt nur etwa fünf Prozent im Vergleich zum aeroben Abbau. [30]

Für das Wachstum von Mikroorganismen ist die Temperatur eine weitere wichtige Einflussgröße. Der Anfang und das Ende des lebensfähigen Temperaturbereichs sind wie die optimale Temperatur je nach Art der Mikroorganismen unterschiedlich. Zur Beschreibung der Aktivität in Abhängigkeit der Temperatur gibt es diverse Berechnungsmodelle, von sehr spezifisch und exakt [31][32] bis hin zu eher allgemeineren Ansätzen [33]:

$$\sqrt{r} = b * (T - T_{min}) * (1 - e^{c*(T-T_{max})})$$

r...Wachstumsrate [1/d]

b...Regressionskoeffizient [1/K√d]

T...Temperatur [K]

T<sub>min</sub>, T<sub>max</sub>...Grenztemperaturen [K]

c...Anpassungsparameter [1/K]

Durch diesen Zusammenhang ergibt sich folgender Ablauf: Mikroorganismen setzen durch ihre Aktivität Wärme frei und erhöhen damit die Temperatur im System, wodurch die Aktivität

weiter gesteigert wird und sich die Temperatur weiter erhöht. Dies geschieht so lange, bis die Temperatur zu hoch wird und die Aktivität stark abnimmt. Diese Maximaltemperatur ist je nach Art der Mikroorganismen unterschiedlich, generell bewegt sie sich in einem Bereich von etwa 70°C bis 90°C. [15][29] Zusätzlich beeinflusst die Temperatur auch noch Wärme- und Stoffaustauschvorgänge, eine Kenngröße hierfür ist beispielsweise der **binäre Diffusionskoeffizient**. [29][34]

Bei Abfällen kommt hierbei besonders der Umstand zum Tragen, dass diese in den seltensten Fällen frei von Verschmutzungen sind. Insbesondere Lebensmittelreste befinden sich häufig auch bei grundsätzlich schwer abbaubaren Produkten wie Leichtverpackungen aus Kunststoff. Diese anhaftenden Verunreinigungen werden sehr viel schneller abgebaut als der restliche Abfall und können somit einen ersten Beitrag zur Wärmeentwicklung leisten.

### 3.2.1.2 Chemische Prozesse

Chemische Oxidationsreaktionen finden bereits zu Beginn gemeinsam mit den mikrobiologischen Prozessen statt, haben aber noch nicht die Intensität, um die Wärmeproduktion zu dominieren. In diesem Fall wird der Bereich von etwa 20 – 100°C betrachtet („Niedrigtemperaturbereich“), wobei folgende Mechanismen auftreten [21]:

- Physikalische Adsorption von Sauerstoff am Feststoff
- Chemisorption von Sauerstoff am Feststoff
- Chemische Reaktionen mit Zerfall
- Chemische Reaktionen von Feststoff zu Gas

Die reversible physikalische Adsorption kann im Niedrigtemperaturbereich als vernachlässigbar angesehen werden, da hier die irreversiblen chemischen Reaktionen vorherrschen. [21]

Die Kinetik von homogenen Elementarreaktionen wird allgemein durch die Arrhenius-Gleichung beschrieben und lässt sich unter gewissen Bedingungen auch auf heterogene Reaktionen anwenden [35]:

$$k = k_0 * e^{\left(\frac{-E_A}{RT}\right)}$$

k...Geschwindigkeitskonstante [mol/s]

k<sub>0</sub>...**Frequenzfaktor** oder präexponentieller Faktor [mol/s]

E<sub>A</sub>...**Aktivierungsenergie** [J/mol]

R...universelle Gaskonstante [J/molK]

T...Temperatur [K]

Aus dieser Gleichung lässt sich eine starke Temperaturabhängigkeit erkennen. Näherungsweise verdoppelt bzw. verdreifacht sich die Reaktionsgeschwindigkeit bei einer Temperaturerhöhung von 10 Kelvin. [36] Es ergibt sich ein Mechanismus ähnlich dem Wachstum von Mikroorganismen, welcher allerdings bei Erreichen einer bestimmten Temperatur nicht von selbst zum Erliegen kommt.

Für die Anwendung als Oxidationsreaktion mit der Bildung von Kohlenmonoxid und Kohlendioxid sowie bei Annahme eines sehr geringen Transportwiderstandes sieht die Gleichung folgendermaßen aus [35]:

$$\dot{r}_{CO} = k_{0,CO} * e^{\left(\frac{-E_{A,CO}}{RT}\right)} * y_{O_2}^n$$

$$\dot{r}_{CO_2} = k_{0,CO_2} * e^{\left(\frac{-E_{A,CO_2}}{RT}\right)} * y_{O_2}^m$$

$\dot{r}$ ...Bildungsrate CO, CO<sub>2</sub> [mol/s]

$y_{O_2}$ ...Molenbruch O<sub>2</sub> [-]

m,n...Anpassungsparameter [-]

Die Oxidationskinetik wird im Gegensatz zu mikrobiologischen Prozessen durch einen möglichst geringen **Wassergehalt** (in Abhängigkeit von **relativer Luftfeuchtigkeit** und **Wasserzugabe**) gefördert, da weniger Wärme zur Trocknung des Materials aufgewendet werden muss und direkt zu dessen Erwärmung beiträgt. [35] Allerdings tritt die Bildung von sogenannten Hot-Spots durch Oxidationskinetik nicht im gesamten Schüttungsvolumen auf, was bei mikrobiologischen Prozessen durchaus der Fall sein kann. [15] Beiden Mechanismen ist gemeinsam, dass sie mit zunehmender **spezifischer Oberfläche** der Partikel, welche durch die **Partikelgröße**, **Partikelgrößenverteilung** und **Porenform** beeinflusst wird, besser ablaufen. [37][38] Die Verfügbarkeit von Sauerstoff ist in beiden Fällen von **Porosität**, der **Schüttdichte** und dem **freien Luftraum**, welche sich gegenseitig beeinflussen, sowie von der **Sauerstoffkonzentration** abhängig. [29][34][39] Letztere wird durch ausreichende **Luftzufuhr**, steuerbar über eine gasdichte **Abdeckung**, von Schüttungsoberflächen beeinflusst, außerdem müssen die Seitenflächen einen entsprechenden **Neigungswinkel** aufweisen. [21][34] Die **Lagerdauer**, also die Zeitspanne vom Aufbau bis zum Abbau der Schüttung, ist von den Erfordernissen des Anlagenbetreibers abhängig. [21]

### 3.2.1.3 Physikalische Prozesse

Kommen trockene Oberflächen von porösen Feststoffen mit Wasser in Berührung wird dieses adsorbiert. Eine solche Adsorption ist in den meisten Fällen exotherm und es kommt zu einer Temperaturerhöhung. Die entstehende Wärme berechnet sich wie folgt [34]:

$$Q_{\text{Adsorption}} = ([m * c_p]_{\text{Adsorbens}} * [m * c_p]_{\text{Adsorbat}}) * \Delta T$$

$Q_{\text{Adsorption}}$ ...Adsorptionswärme [kJ]

$m_{\text{Adsorbens}}$ ...Masse Feststoff [kg]

$c_{p\text{Adsorbens}}$ ...spez. Wärmekapazität Feststoff[kJ/kgK]

$m_{\text{Adsorbat}}$ ...Masse Wasser [kg]

$c_{p\text{Adsorbat}}$ ...spez. Wärmekapazität Wasser [kJ/kgK]

$\Delta T$ ...Temperaturänderung [K]

Dieser Prozess kann grundsätzlich immer auftreten, jedoch sinkt der Wassergehalt des Feststoffes mit steigender Systemtemperatur und die Wärmefreisetzung durch physikalische Prozesse fällt stärker aus. Für den realen Fall kann der Einfluss dieses Mechanismus jedoch als sehr gering angenommen werden. [34]

### 3.2.1.4 Pyrophore Stoffe

Eine besondere Form der Selbstentzündung tritt bei pyrophoren Stoffen auf. Diese Stoffe können sich bei normalen Umgebungsbedingungen ohne Einwirkung einer Zündquelle in Kontakt mit Luftsauerstoff bzw. Luftfeuchtigkeit selbst entzünden. [40] Eine Liste bekannter Stoffe mit pyrophorem Verhalten ist dem Anhang I beigefügt [41].

In Abbildung 10 sind die ausgewählten Parameter für eine umfassende Beschreibung Selbstentzündung von Schüttungen dargestellt. Diese wurden hauptsächlich von [34] entnommen, welcher bereits eine ähnliche Kategorisierung vorgenommen hat, und mit Parametern von [21][35][39] ergänzt.

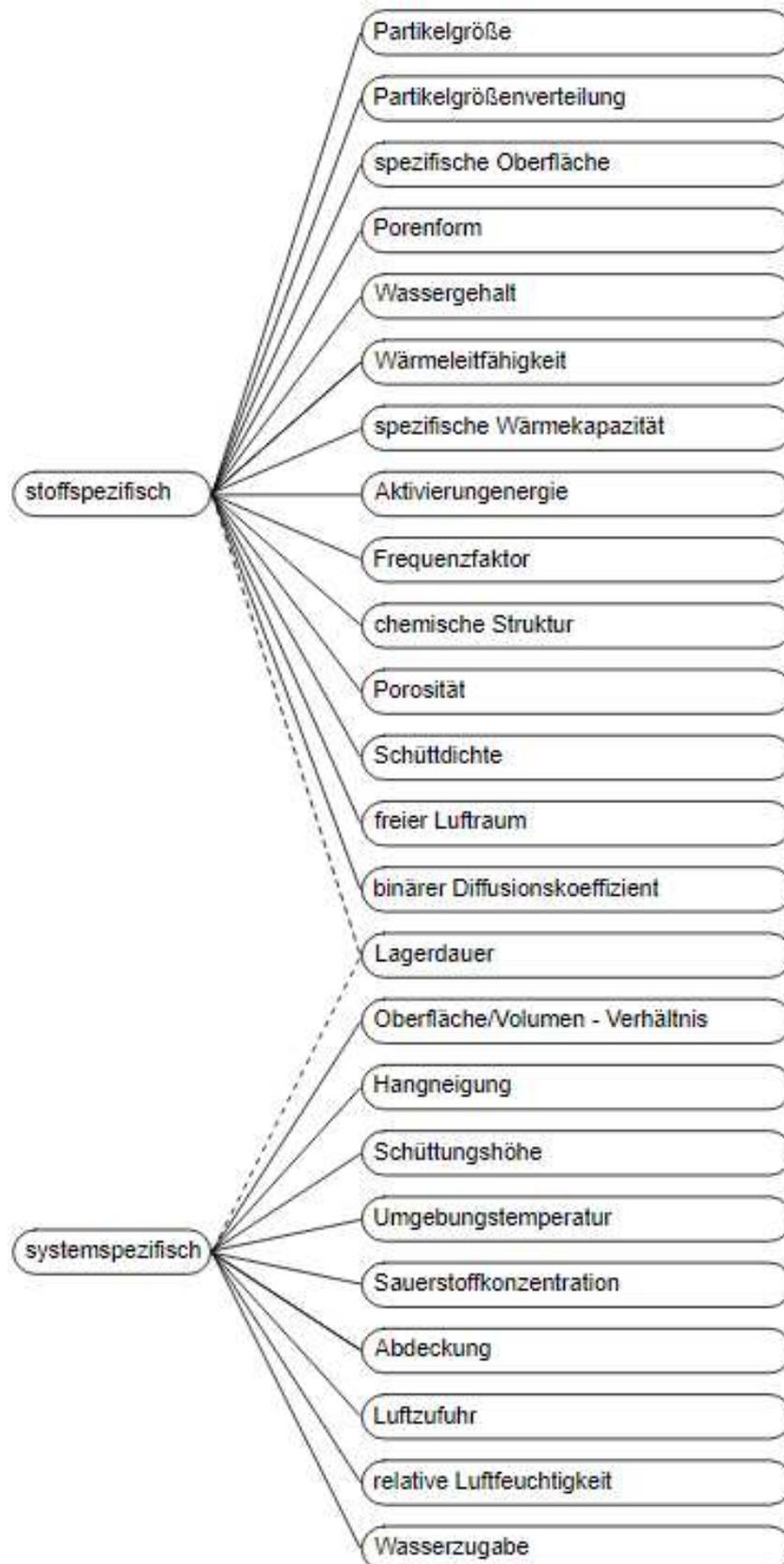


Abbildung 10: Relevante Einflussparameter für die Selbstentzündung [21][34][35][39]

### 3.3 Brandwärme

Die bei einer Verbrennung entstehende Wärme ist in der Lage enormen Schaden anzurichten. Wärmeschäden treten vor allem in der näheren Umgebung („near-field“) um einen Brandort auf, insbesondere bei Bränden in Innenräumen. [19] Die sich dadurch entwickelnden hohen Temperaturen können über kurz oder lang zum Einsturz von Gebäuden führen, durch die Wärmeübertragung an die Umgebung ist ein Übergreifen auf angrenzende Objekte möglich.

Die Wärmemenge eines Brandes setzt sich prinzipiell aus zwei Teilen zusammen:

- **Brandlast:** Die mittlere Brandlast (auch Brandbelastung) ist die mögliche freigesetzte Wärmemenge der Lagerung bezogen auf die Grundfläche eines Raumes bzw. die Brandabschnittsfläche und wird bei Vernachlässigung des Abbrandfaktors folgendermaßen berechnet [42][43]:

$$q_{m,mittel} = \frac{\sum m_i * H_{i,i}}{A_B}$$

$q_{m,mittel}$ ...mittlere Brandlast [MJ/m<sup>2</sup>]

$m_i$ ...Masse des jeweiligen Brennstoffes [kg]

$H_{i,i}$ ...Heizwert des jeweiligen brennbaren **Stoffes** [MJ/kg]

$A_B$ ...Brandabschnittsfläche [m<sup>2</sup>]

Die Brandlast ist ein Mittelwert innerhalb einer definierten Fläche und gibt keinerlei Auskunft über etwaige Konzentrationen von Brennstoffen in einem bestimmten Bereich. Sie wird bei vielen brandschutztechnischen Methoden verwendet, dies ist hier nicht der Fall.

- **Brandausbreitung:** Darunter wird die zurückgelegte Wegstrecke eines Brandes innerhalb eines bestimmten Zeitintervalls verstanden. Die Wegstrecke kann abhängig vom Messverfahren zum Beispiel parallel zur Brennstoffoberfläche oder entlang einer Brennstoffschüttung gemessen werden [42]:

$$\dot{c} = \frac{L}{t}$$

$\dot{c}$ ...Brandausbreitungsgeschwindigkeit [mm/min]

$L$ ...abgebrannte Wegstrecke

$t$ ...Brennzeit

Hierbei ist anzumerken, dass es sich um einen Mittelwert über den gesamten Brennstoff handelt, da die Brandausbreitungsgeschwindigkeit nicht überall gleichmäßig und konstant ist. [42]

Eine weitere Möglichkeit, um die Brandausbreitungsgeschwindigkeit auszudrücken bzw. zu ermitteln, stellt die Abbrandrate dar:

$$\dot{m} = \frac{m}{t}$$

$\dot{m}$ ...Abbrandrate [kg/s]

m...abgebrannte Masse [kg]

Beide Größen hängen bei einem Feststoff folgendermaßen zusammen [44]:

$$\dot{c} = \frac{\dot{m}}{\rho_P}$$

$\rho_P$ ...Feststoffdichte des Partikels [kg/m<sup>3</sup>]

Im Vergleich dazu bei einer Schüttung:

$$\dot{c} = \frac{\dot{m}}{\rho_{Sch}}$$

$\rho_{Sch}$ ...Schüttdichte [kg/m<sup>3</sup>]

### 3.3.1 Mechanismen der Wärmefreisetzung

Der Entzündungsvorgang eines festen Stoffes beginnt mit der Einwirkung eines **externen Wärmestroms** auf die Oberfläche, wodurch sich die **Temperatur des Stoffes** erhöht. Die Temperatur ist weder zeitlich noch örtlich konstant, der Maximalwert wird nahe der Oberfläche erreicht [19]. Bei geringerer **Partikelgröße** erfolgt die Durchwärmung schneller. [45] Ab einer Temperatur von etwa 100°C entweicht vermehrt Feuchtigkeit und der Brennstoff befindet sich in der Trocknungsphase, welche mit steigendem **Wassergehalt** länger dauert. [46][47]

Die nächste Phase wird Primärpyrolyse genannt und beginnt bei etwa 200°C. Dabei brechen die chemischen Bindungen der Moleküle auf und kleinere Moleküle mit anderer chemischer Zusammensetzung entstehen. [19][48] Die Primärpyrolyse wird fälschlicherweise als die eigentliche Pyrolyse bezeichnet und ist ein endothermer, temperaturabhängiger sowie irreversibler Vorgang in Abwesenheit eines Oxidationsmittels. [19] Die Produkte der

Primärpyrolyse umfassen Pyrolysegas (z.B. CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, Wasserdampf), Teer (kondensierte organische Verbindungen wie Aliphaten und Aromaten) sowie einen kohlen- und mineralstoffhaltigen Feststoff, der Koks genannt wird. [19][46]

Die Kinetik der Zersetzung des Brennstoffes gehorcht vereinfacht folgendem Gesetz [49]:

$$\frac{d\rho}{dt} = -k_1 * (\rho - \rho_c) * e^{\left(\frac{-E_A}{RT}\right)}$$

$\rho$ ...Dichte des ursprünglichen Brennstoffes [kg/m<sup>3</sup>]

$t$ ...Zeitintervall [s]

$k_1$ ...Frequenzfaktor [1/s]

$\rho_c$ ...Dichte des entstehenden Kokes [kg/m<sup>3</sup>]

Bis zu einer Temperatur von etwa 500°C wird von Primärpyrolyse gesprochen gefolgt von der Phase der Sekundärpyrolyse, wobei die vorliegenden Produkte der Primärpyrolyse weiter zersetzt werden. Die Sekundärpyrolyse verläuft schneller, die Produkte sind ähnlich denen der Primärpyrolyse einzuteilen. Die Grenze zwischen diesen Phasen ist jedoch nicht eindeutig, da viele verschiedene homo- und heterogene Reaktionen parallel und seriell auftreten. [46][48]

Bei hohen Temperaturen, beginnend bei etwa 700°C, kommt es unter anderem vermehrt zu Gasifikations- und Oxidationsreaktionen, an deren Ende kaum mehr reaktive Rückstände wie Asche und CO<sub>2</sub> stehen. [46][48]

Die Phasen der Verbrennung eines festen Brennstoffes und die dabei entstehenden Produkte sind in Abbildung 11 ersichtlich.

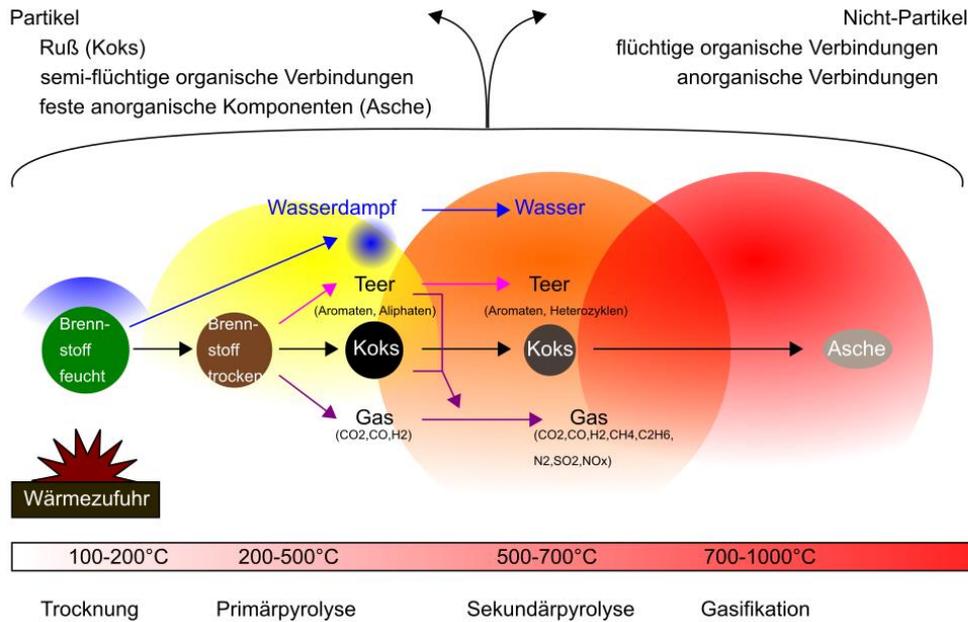


Abbildung 11: Mechanismus der Verbrennung eines festen Brennstoffes nach [46], eigene Darstellung

Sowohl Koks als auch Pyrolysegas können mit Sauerstoff reagieren, je nachdem ob nun die Gas-Feststoffreaktion oder die Gasphasenreaktion vorherrschend ist, werden zwei grundlegende Arten der Verbrennung unterschieden.

Ein Schwelbrand ist eine heterogene Reaktion von festem Brennstoff mit gasförmigem Sauerstoff, eine homogene Reaktion mit gasförmigem Brennstoff und Sauerstoff wird Flammbrand genannt. Beide Reaktionen sind teils sehr komplexe Vorgänge, dennoch sind nachfolgende Erklärungen für einen Überblick ausreichend [19]:

Gas-Feststoff-Reaktion (heterogen, „Schwelbrand“):



Gasphasenreaktion (homogen, „Flammbrand“):



Abgesehen vom Aggregatzustand der Reaktanden unterscheiden sich Schwel- und Flammbrände noch durch diverse andere Merkmale. Schwelbrände sind nur bei porösen Brennstoffen möglich, die bei Erwärmung einen festen Koks bilden und weder schmelzen noch verdampfen. [45] Jene Zündenergie, um einen Schwelbrand auszulösen ist generell geringer als für Flammbrände. [50] Schwelbrände benötigen für eine selbstständige Aufrechterhaltung lediglich ein paar Prozent des Sauerstoffbedarfes eines Flammbrandes, wodurch sie extrem beständig und schwer zu unterdrücken sind. [9][52] Flammbrände besitzen allerdings eine höhere Verbrennungstemperatur sowie deutlich höhere

Ausbreitungsgeschwindigkeit und somit Wärmefreisetzungsrate. Sichtbare Lichtemissionen gibt es nur bei Flammbränden. Aufgrund der unvollständigen Verbrennung bei Schmelbränden ist die Menge an Rauchgasen höher als bei Flammbränden, jedoch werden diese sehr viel langsamer produziert. Ein Schmelbrand kann in einen Flammbrand umschlagen, wenn die **Luftzufuhr** und damit **Sauerstoffkonzentration** gesteigert wird. [52] Die Luftzufuhr kann auch innerhalb des Brennstoffes einen Einfluss haben, da z. B. **poröse** Brennstoffe mit geringer **Rohdichte** besser um- und durchströmt werden können. [45] Außerdem werden Brennstoffe mit höherer **Wärmeleitfähigkeit** und niedriger **spezifischer Wärmekapazität** schneller durchwärmt. [45] Ein Schmelbrand brennt generell in jene Richtung mit dem meisten Sauerstoff, während sich ein Flammbrand bevorzugt an vertikal **orientierten Oberflächen** vor allem in **Richtung aufwärts ausbreitet**. [45] Darüber hinaus breitet sich ein Flammbrand schneller entlang von auch nicht brennbaren Ecken und horizontalen Oberflächen sowie unter horizontalen Überdeckungen aus, was allgemein als **Randeffekte** verstanden wird. [45]

Eine Verbrennung kann sich nur selbst erhalten, wenn die Wärmefreisetzung aus der Oxidation mindestens gleich groß wie die notwendige Wärme für die thermische Aufbereitung des Brennstoffes. Ansonsten kommt die Verbrennung bei Entfernung der Wärmequelle zum Erliegen. Sollten gar nicht brennbare Bestandteile vorliegen, so wird diese Energie zur Erwärmung dieser aufgewendet und steht nicht mehr für die Verbrennung zur Verfügung (**Kontinuität**). [45]

Die Verbrennungskinetik folgt allgemein den Schemata vom Typ eines Arrhenius-Verlaufes [19]:

$$\dot{r} = A * Y_o^m * Y_s^n * e^{\frac{-E_A}{RT}}$$

Die Abhängigkeit vom Sauerstoffgehalt auf die Pyrolyse ist nicht bei allen Stoffen gegeben und kann auch vernachlässigt werden. Jedoch ist die Verbrennung immer von den Eigenschaften und der Zusammensetzung des Brennstoffs abhängig, so weisen Brennstoffe mit einem höheren Gehalt an flüchtigen Bestandteilen und einer niedrigen **Zündtemperatur** (z.B. Papier mit Lösungsmitteln) eine schnellere Verbrennung auf als Brennstoffe mit niedrigem Gehalt an flüchtigen Bestandteilen (z.B. Graphit). Bei diversen technischen Produkten sind zusätzlich **Retardants** zugesetzt, um die Brandausbreitung zu verhindern. [45]

Die relevanten Größen zur Steuerung der Wärmeentwicklung sind in Abbildung 12 ersichtlich. Eine umfassende Identifikation der Einteilung wurde in [45] vorgenommen und mit Einflussgrößen aus [19][47] ergänzt.

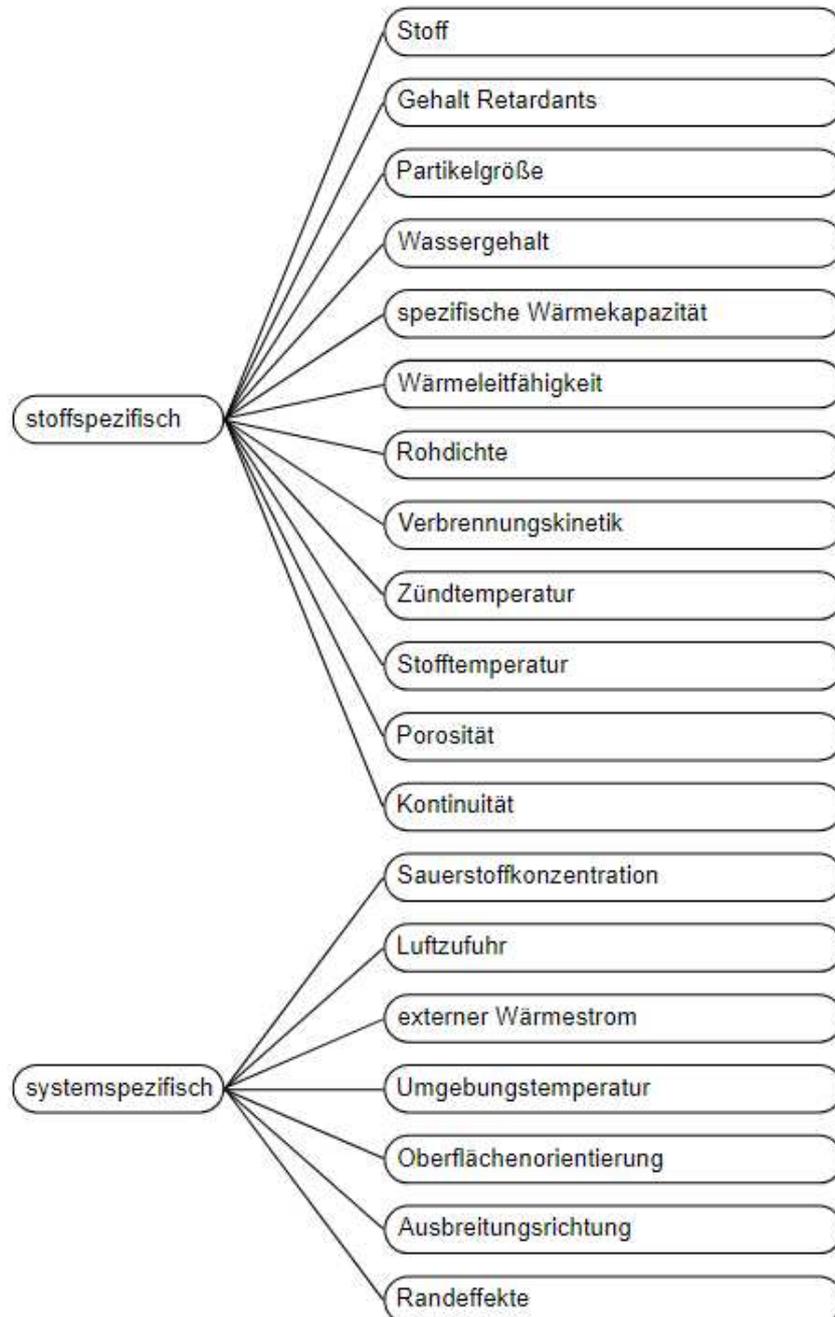


Abbildung 12: Relevante Einflussparameter für die Brandwärme [19][45][47]

## 3.4 Brandrauch

Rauch bezeichnet in diesem Fall den sichtbaren Teil der flüchtigen Verbrennungsprodukte und umfasst alle festen und flüssigen Komponenten, welche bei einer Verbrennung freigesetzt werden. [17][53] Andere Definitionen zählen auch die gasförmigen chemischen Verbindungen, also alle flüchtigen Verbrennungsprodukte, hinzu.

Die Bestandteile von Rauch lassen sich folgendermaßen einteilen [19][52][53]:

- Partikel (Feststoffe)
  - Ruß: ein nahezu schwarzer Feststoff mit sehr hohem Kohlenstoffanteil
  - Semi-flüchtige organische Verbindungen: z.B. langkettige Kohlenwasserstoffe (Teer)
  - Anorganische Verbindungen: feste anorganische Komponenten (Asche)
- Nicht-Partikel (kondensierte Flüssigkeiten und Gase)
  - Flüchtige organische Verbindungen: Alkohole
  - Anorganische Verbindungen: Wasser

### 3.4.1 Mechanismen der Rauchproduktion

Die Entstehung von Rauch ist je nach Phase der Verbrennung unterschiedlich und wird nachfolgend erklärt (zu sehen in Abbildung 11): Während der Trocknungsphase durch einen **externen Wärmestrom** verringert sich zunächst **Wassergehalt** des Brennstoffes, dabei kann eine weiße Rauchfahne zu sehen sein. Ähnlich der Wärmefreisetzung werden **kleinere Partikel** mit eher flacher **Form** schneller durchwärmt und **Sauerstoff** besser adsorbiert, was sich positiv auf die Rauchmenge auswirkt. Sollte die **Luftzufuhr** jedoch verringert werden, so erhöht sich die Menge an Rauch. [19] Ab der Primärpyrolyse treten Flamm- und Schwelbrand gemeinsam auf, wobei die Intensität des Flammbrandes überwiegt. In dieser Phase werden schnell große Mengen an Wärme und Rauch freigesetzt, der Rauch wird durch den entstehenden Auftrieb aufwärts befördert. Sobald der Flammbrand nicht mehr aufrechterhalten werden kann, dominiert der Schwelbrand, wobei deutlich langsamer weniger Wärme und insgesamt auch weniger Rauch freigesetzt wird. Der Rauch ist jedoch dichter und dunkler, da die Verbrennung nicht mehr so effizient abläuft. Zusätzlich bleibt der Rauch durch den schwächeren Auftrieb eher in Bodennähe. [53] Brennstoffe mit hohem Gehalten von **Asche**, **ungesättigten Kohlenwasserstoffen** und einer ineffizienten **Verbrennungskinetik** haben generell einen höheren Rauchausstoß. [52]

Das Gefährdungspotenzial, welches von Rauch ausgeht, lässt sich folgendermaßen zusammenfassen: Rauch besteht aus potenziell gesundheitsschädlichen Stoffen, von denen Menschen sowohl sofort (Reizung der Atemwege und der Augen) als auch zukünftig (Krebserkrankungen) betroffen sein können. Ungefähr achtzig Prozent der Brandtoten sterben unter dem Einfluss von Brandrauch. [18] Die über die Luft transportierten Bestandteile können sich im weiteren Umfeld um den Brandort ablagern und die Umwelt nachhaltig schädigen, auch Bauwerke sind durch die korrosiven Eigenschaften des Rauches gefährdet. [19][54]

Die Einflussparameter auf die Rauchentwicklung sind in Abbildung 13 dargestellt. Diese wurde mit Kategorisierung von [52] erstellt und mit [53] ergänzt.

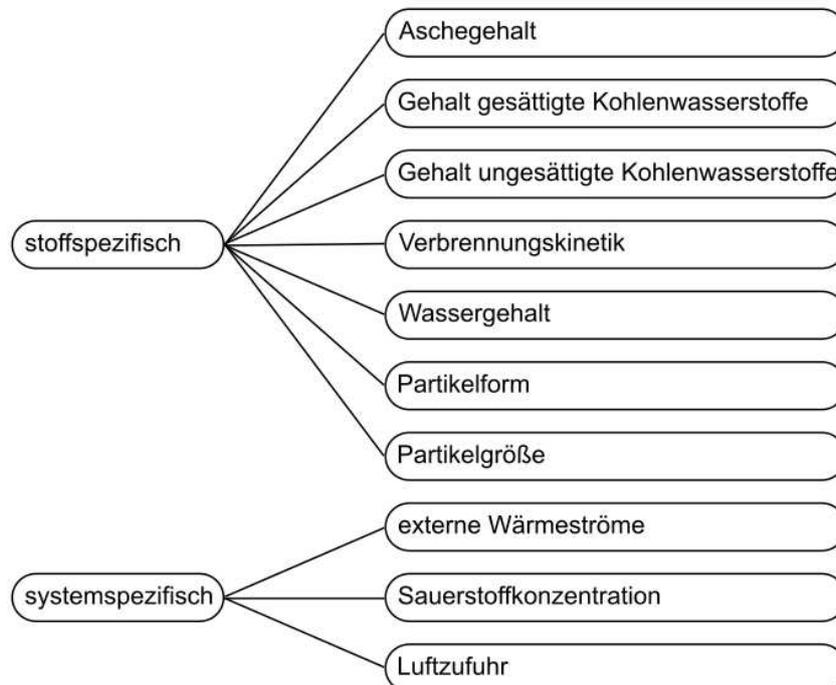


Abbildung 13: Relevante Einflussparameter für die Brandrauchbildung [52][53]

## 4 Methodenentwicklung

Die Modellentwicklung erfolgt unter Beachtung des in der Zielsetzung formulierten Anspruches. Ein besonderes Augenmerk wurde auf möglichst hohe Sicherheit bzw. das Vermeiden von falscher Sicherheit gelegt. Wenn die Einflussparameter gewisse Werte annehmen, können die Bedrohungen vollständig eliminiert werden. So ist eine Brandausbreitung ab einem bestimmten Wassergehalt oder Selbstentzündung ohne luftberührte Oberfläche nicht mehr möglich. Auf eine Berücksichtigung dieser Umstände wird bewusst verzichtet.

### 4.1 Modellgrenzen

Der Bereich, dessen Einhaltung zur sinnvollen Anwendung der Methode erforderlich ist, wird aufgrund der nachfolgend angeführten und näher beschriebenen Voraussetzungen und Annahmen eingeschränkt.

#### 4.1.1 Bilanzraum

Der Bilanzraum erstreckt sich über einen einzelnen Haufen mit eindeutig definierten räumlichen Grenzen. Sich an den Grenzen überschneidende oder aufeinanderliegende Schüttschichten aus unterschiedlichen Abfällen werden ausgeschlossen. Ein Haufen besteht nach der Festlegung in [20] aus Feststoffteilchen, welche sich gegenseitig berühren und relativ zueinander bewegbar sind.

Der Haufen wird als makroskopisches Konstrukt ohne genauere Betrachtung der Vorgänge an oder in den einzelnen Phasen und Partikel angenommen, deren Konzentration über den gesamten Haufen ist homogen ist. Analog dazu wird auch die Ausbildung anderer Gradienten wie Temperatur, Druck und Konzentration nicht näher betrachtet. Der Bilanzraum ist in alle drei Raumrichtungen beliebig groß wählbar und wird näherungsweise adiabat angesehen. Grundsätzlich wird ein Haufen nur zu einem bestimmten Zeitpunkt mit den dort vorherrschenden Eigenschaften betrachtet (stationär). Es erfolgt keine Betrachtung der zeitlichen Änderung irgendeines Parameters mit anschließender Ausgabe der veränderten Eigenschaften oder einer z.B. voraussichtlich sicheren Lagerdauer wie bei anderen Modellen. [14][21][22]

Die allgemeine Bilanzgleichung hat vereinfacht die Form [55]

$$\text{Zufuhr} - \text{Abfuhr} = \pm \text{Generation} \pm \text{Speicherung}$$

Mit dem Wärmestrom  $\dot{Q}$  als Bilanzgröße sieht diese Gleichung folgendermaßen aus:

$$\dot{Q}_{zu} - \dot{Q}_{ab} = \pm \dot{Q}_{gen} \pm \dot{Q}_{sp}$$

Insbesondere bei den Möglichkeiten der Entzündung ist die Festlegung der Systemgrenzen wichtig, bei der Auswirkung verändert sich der Bilanzraum.

Tabelle 5: Erklärung der Terme der Bilanzgleichung

| Formelzeichen   | Beschreibung   |
|-----------------|--|
| $\dot{Q}_{zu}$  | Sämtliche Wärmeströme aus der Umgebung (Umgebungstemperatur größer als Systemtemperatur, Sonneneinstrahlung, Funkenflug, Brandstiftung, Blitzschlag) |
| $\dot{Q}_{ab}$  | Sämtliche Wärmeströme an die Umgebung (Umgebungstemperatur kleiner als Systemtemperatur, Windeinfluss)   |
| $\dot{Q}_{gen}$ | Gebildete oder vernichtete Wärmeströme im Systeminneren (zündfähige Stoffe, Mikrobiologie, Oxidationskinetik)  |
| $\dot{Q}_{sp}$  | Änderung der Wärmeströme im Systeminneren (aufwärmen, abkühlen)  |

Wärmezufuhr: Die Wärmezufuhr durch Funkenflug, Brandstiftung und Blitzschlag wird nicht berücksichtigt, da diese nicht innerhalb des Bilanzraumes liegen. Wärmeströme durch

das Wetter sind ein häufig diskutiertes Thema im Bereich der Selbstentzündung. In diesem Fall wird auch dies vernachlässigt, da sich das Wetter ständig ändert und ein Einfluss nicht zwingend gegeben ist [56]

Wärmeabfuhr: Auch hier wird der Einfluss durch das Wetter nicht weiter berücksichtigt. [56] Ebenso könnten der erste oder dritte Fall beschrieben in 3.2 vorliegen und eine Selbstentzündung wäre danach nicht mehr möglich. Um falsche Sicherheit zu vermeiden, bleibt jedoch jegliche Möglichkeit der Wärmeabfuhr unberücksichtigt.

Wärmegeneration: Dieser Term stellt das Hauptproblem dar, da durch die Zündquellen, Mikrobiologie und die Oxidationskinetik Wärmeströme im Inneren des Haufens generiert werden.

Wärmespeicherung. Auch dieser Term wird vernachlässigt, einerseits da das System als stationär angesehen wird und es somit zu keinen zeitlichen oder örtlichen Temperaturgradienten kommt. Andererseits könnte durch eine hohe Speichermasse mit hoher spezifischer Wärmekapazität wieder eine falsche Sicherheit entstehen, da dadurch das System länger erwärmt werden kann, ohne dass es zu einer Entzündung kommt. Hierbei ist zu erwähnen, dass bei höherer Speichermasse auch die Abkühlung langsamer vor sich geht. Die Wärmeleitfähigkeit und Diffusionskoeffizienten innerhalb der Schüttung bleiben somit auch unberücksichtigt.

Mit diesen Voraussetzungen bleibt von der Bilanzgleichung lediglich die Generation (Quellterm) erhalten, der gleich Null würde. Da die Bilanzgleichung jedoch nicht weiterverwendet wird, bleibt dieser Umstand nicht weiter relevant.

Dieses Kriterium gilt nur für die Möglichkeiten der Entzündung, da sich bei einem weder zeitlich noch örtlich begrenzten Brand der Bilanzraum ständig ändern würde.

#### **4.1.2 Brennbarkeit/Entzündbarkeit**

Ein Stoff wird allgemein als brennbar eingestuft, wenn er entzündet und verbrannt werden kann. [17] Entzünden bezeichnet hierbei die Initiation einer Verbrennung, also einer sich selbst erhaltenden, exothermen Oxidationsreaktion unter Freisetzung von flüchtigen Verbrennungsprodukten sowie Flammen beziehungsweise Glühen. [17][40] Die bei der Verbrennung freigesetzte Energie wird durch den Heizwert beschrieben. Somit liegt die Schlussfolgerung nahe, dass nur Stoffe die einen Heizwert größer als 0 aufweisen, zur Verbrennung gebracht werden können. Im konkreten Fall wird jeder Stoff bzw. jedes Stoffgemenge mit einem unteren Heizwert  $H_i > 0$  als brennbar bzw. entzündbar eingestuft.

### **4.1.3 Art der chemischen Reaktion**

Es werden nur Oxidationsreaktionen von gasförmigem Brennstoff mit Sauerstoff berücksichtigt, welche unter Flammenerscheinung und Bildung neuer Produkte ablaufen. Ein Schwelbrand fällt nicht unter die Auswirkung, da diese hier nur die Vorform zum Flammbrand darstellen und sich wesentlich langsamer ausbreiten.

### **4.1.4 Art des Brennstoffes**

Der Brennstoff muss sich vollständig oder überwiegend der Brandklasse A nach ÖNORM EN 2 zuordnen lassen, also Feststoffbränden. Obwohl feste Metalle auch Schüttungen bilden können, werden Metallbrände (Brandklasse D) ausgeschlossen. [57]

### **4.1.5 Prozessualer Anwendungsbereich**

Die Methode ist nur für Abfalllagerungen, nicht berücksichtigt werden Brandereignisse während der Sammlung, des Transports oder der Behandlung.

### **4.1.6 Partikelgröße/spezifische Oberfläche**

Die Anwendung erfolgt nur in einem Partikelgrößenintervall von mindestens 10 mm bis maximal 300 mm. In diesem Fall wird die maximale räumliche Ausdehnung in irgendeine Richtung als Partikelgröße festgelegt. Damit einher geht auch das Intervall für die spezifische Oberfläche, welches sich von mindestens  $0,02 \text{ mm}^2/\text{mm}^3$  bis maximal  $20,4 \text{ mm}^2/\text{mm}^3$  erstreckt. Dies kommt durch die Vorstellung als Kreiszyylinder zustande, welcher im kleinsten Fall 10 mm im Durchmesser und 0,1 mm in der Höhe beträgt (z. B. Fragment einer Kunststoffolie), bzw. mit den maximalen Abmessungen von 300 mm im Durchmesser und 300 in der Höhe (Rundholz).

### **4.1.7 Durchströmbarkeit**

Die einzelnen Partikel der Schüttung berühren sich nur mit unendlich kleinen Punkten, die Berührungsflächen sind dementsprechend unendlich klein. Dadurch bleibt die gesamte spezifische Oberfläche erhalten und jedes Partikel kann vollständig umströmt werden, die sogenannte Hertz'sche Pressung wird vernachlässigt. [58] Zusätzlich wird die Kompression des unteren Teils des Haufens durch die Masse des restlichen Haufens darüber

vernachlässigt, wodurch die Porosität über die gesamte Schüttung konstant ist. Der Wind kann nur parallel zur Grundfläche eindringen, eine Verwirbelung an der Schüttungsoberfläche wird nicht berücksichtigt.

#### **4.1.8 Selbstentzündung**

Der anaerobe Fall des mikrobiellen Wachstums wird aus bereits genannten Gründen vernachlässigt. Die Selbsterwärmung wird nach Abbildung 7 berücksichtigt, auch der Beginn durch Mikroorganismen und Weiterführung durch Oxidationskinetik bis hin zum Schwelbrand mit Ausbildung eines Hot-Spots im Inneren der Schüttung. Der Hot-Spot bewegt sich zu einer geneigten Fläche und brennt bis an den Rand, wo die Luftzufuhr einen Flammbrand auslöst. [21] Die Lage und Bewegung werden jedoch nicht weiter beachtet oder gar nachgebildet. Die Entzündung von pyrophoren Stoffen wird nicht weiter berücksichtigt.

## **4.2 Berechnungsablauf**

Der Ablauf der für die Risikobewertung notwendigen Berechnung ist in Abbildung 14 schematisch dargestellt und wird nachfolgend beschrieben: Für die Hauptberechnung werden die bereits identifizierten relevanten Einflussparameter unter Einbeziehung der Modellgrenzen und grundlegender Zusammenhänge vereinfacht. Daraus ergeben sich die sogenannten reduzierten Einflussparameter, deren Einfluss auf die Bedrohungen bekannt ist und mittels einer Kurve (Einflusskurve) dargestellt wird. Unter Einbeziehung des „credible worst case“ werden die Einflusskurven zu den Relativwertkurven weiterentwickelt. Die Relativwerte ergeben sich aus den tatsächlich vorliegenden quantitativen Eigenschaften der Abfälle und werden mit Gewichtungsfaktoren multipliziert. Nach anschließender Addition der gewichteten Relativwerte kommt je ein Ergebnis für die Entzündungswahrscheinlichkeit und die Brandauswirkung zustande.

Die Hilfsberechnung war notwendig, um einen ersten Anhaltspunkt für die Gewichtungsfaktoren zu haben. Dazu wurden die Einflusskurven unter Beachtung der Modellgrenzen normiert, um miteinander vergleichbar zu werden und unabhängig vom tatsächlichen Verlauf eine lineare Trendlinie eingefügt. Die Steigungen wurden gemeinsam ausgewertet und so zueinander in Beziehung gesetzt, womit eine Bewertungsgrundlage geschaffen wird. Diese Gewichtungsfaktoren können allerdings auch einfach eingegeben werden, wenn beispielsweise bessere Erfahrungswerte vorliegen.

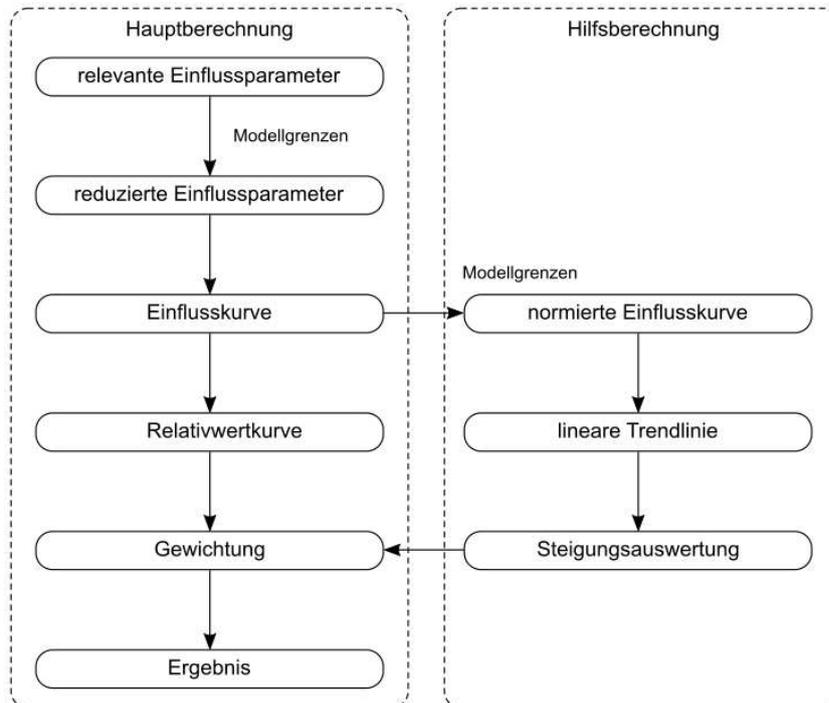


Abbildung 14: Schematische Darstellung des Berechnungsablaufes

### 4.2.1 Fremdentzündung

Bei der Fremdentzündung reduzieren sich aufgrund der Modellgrenzen die Einflussparameter nur mehr auf den **Anteil zündfähiger Masse**, dies ist in Abbildung 15 dargestellt.

#### 4.2.1.1 Anteil zündfähiger Masse

Je höher der Anteil an potenziell zündfähiger Masse ist, desto wahrscheinlicher ist es auch, dass es zur Fremdentzündung kommt. Zu dieser Fraktion zählen hauptsächlich Elektroaltgeräte (Kondensatorentladungen, Stromspeicher, usw.), Batterien und Akkus (Konsumbatterien, Akkupacks, usw.) und Problemstoffe (Druckgaspackungen, diverse Chemikalien, usw.). [59]

Zur konkreten Berücksichtigung werden die Massenanteile dieser Fraktionen addiert. Dies ist dadurch zu erklären, dass bereits geringe Mengen an zündfähigen Stoffen ausreichen können, um einen Brand zu verursachen. Theoretisch ist dazu nur eine einzige, wenn auch noch so kleine und nicht erfasste Zündquelle (z. B. Knopfatterie) notwendig. Dadurch würde jedoch beinahe jeder Abfall mit einer nicht vollständig bekannten Zusammensetzung maximal gefährlich sein. Dies wird in der Berechnung so nicht berücksichtigt.

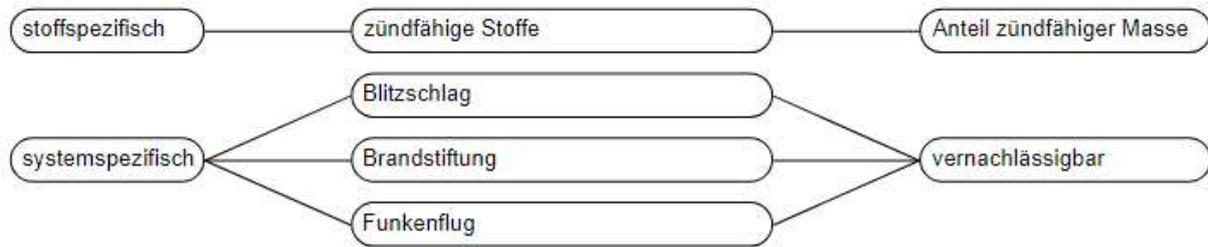


Abbildung 15: Reduzierte Einflussparameter für die Fremdentzündung

## 4.2.2 Selbstentzündung

Die Selbstentzündung wird ohne Berücksichtigung der Umgebungsbedingungen und Wärme- und Stofftransportvorgänge im Inneren der Schüttung beschrieben. Die dementsprechende Abwandlung von Abbildung 7 ist in Abbildung 16 ersichtlich.

### 4.2.2.1 Spezifische Oberfläche

Die relevanten Einflussparameter Partikelgröße, Partikelgrößenverteilung, spezifische Oberfläche und Porenform werden zu dem reduzierten Einflussparameter **spezifische Oberfläche** zusammengefasst, da hier alle geometrischen Kenngrößen einfließen. Mit zunehmender spezifischer Oberfläche steigt die Selbstentzündungsneigung einer Schüttung. [38] So können bei steigender spezifischer Oberfläche sowohl Mikroorganismen für die mikrobielle Aktivität als auch Sauerstoff für die Oxidationskinetik an einer vergleichsweise größeren Fläche wachsen bzw. adsorbiert werden und die Partikel erwärmen. [37][38]

### 4.2.2.2 Wassergehalt

Der Wassergehalt setzt sich zusammen aus dem Wassergehalt des Abfalls im Ablagerungszustand und den über die Lagerdauer auftretenden Veränderungen dessen. Dazu zählen die relative Luftfeuchtigkeit, welche über die Gleichgewichtsfeuchte mit dem Wassergehalt des Gutes zusammenhängt und die Wasserzugabe durch Befeuchtung oder Regen. [60] Diese Einflussparameter werden zum **Wassergehalt** zusammengefasst.

Mikroorganismen können Nährstoffe nur in wässriger Lösung aufnehmen, weshalb ausreichend Wasser zur Verfügung stehen muss. Theoretisch sollte der Wassergehalt so hoch wie möglich sein, jedoch steht dann nicht mehr ausreichend Sauerstoff für einen aeroben Abbau zur Verfügung. Neben dem bereits in der Schüttung vorhandenen Wasser

produzieren die Mikroorganismen zusätzlich Wasser. Der optimale Wassergehalt für das Wachstum von Mikroorganismen, welcher gleichzeitig das höchste Risiko zur Selbstentzündung darstellt, kann nicht genau bestimmt werden. Vielmehr werden Bereiche, in denen das Wachstum am besten verläuft, definiert. Die Definition ist jedoch je nach Quelle unterschiedlich und hängt auch von der Art der Mikroorganismen und des Substrats ab. [29][30][39][61]

#### 4.2.2.3 Bildungsrate CO<sub>2</sub>

Zur Berechnung der **Bildungsrate von CO<sub>2</sub>** werden der jeweilige Frequenzfaktor und die Aktivierungsenergie benötigt. Ohne Reaktionsordnung und Sauerstoffkonzentration nennt man diese Größe die Reaktionsgeschwindigkeitskonstante, es wird für jeden Fall eine Temperatur von 80°C bzw. 353,15 K verwendet.

$$k = k_{0,CO_2} * e\left(\frac{E_{A,CO_2}}{RT}\right)$$

Dies kommt dadurch zustande, dass ab dieser Temperatur die Mikrobiologie schon fast zum Erliegen kommt, aber die Oxidationskinetik die weitere Wärmeproduktion übernimmt. [15]

#### 4.2.2.4 Abbauverhalten

Das biologische Abbauverhalten wird von der Beschaffenheit und der chemischen Struktur des Stoffes beeinflusst. So sind organische Naturstoffe in der Regel kompostierbar und werden schnell von Mikroorganismen abgebaut. Organische Synthetikstoffe (Kunststoffe) benötigen dafür um einiges länger, die biologische Abbaubarkeit von mineralischen und inerten Stoffen ist vernachlässigbar. Die Berücksichtigung erfolgt mittels einer Klasseneinteilung. Der Begriff **Abbauverhalten** beschreibt diese Umstände allgemein.

#### 4.2.2.5 Freier Luftraum

Aus der Porosität, der Schüttdichte und dem, in diesem Fall nicht weiter berücksichtigten, Wassergehalt wird der Freie Luftraum berechnet, der reduzierte Einflussparameter heißt daher nur **Freier Luftraum**.

Wie schon erwähnt wird bei einem effektiven aeroben Abbau Sauerstoff verbraucht, deshalb muss dieser ständig nachgeführt werden. In der Schüttung muss ein entsprechendes Volumen bereitstehen, zusätzlich muss Sauerstoff aus der Umgebung eindringen können. Ist dies nicht der Fall, so wird der im Wasser gelöste Sauerstoff sofort veratmet und die Aktivität kommt zum Erliegen. [29][39]

Für den freien Luftraum gibt es einen optimalen Bereich, in dem ausreichend Sauerstoff für das mikrobielle Wachstum verfügbar ist. [29][39]

#### 4.2.2.6 Lagerdauer

Es ist bekannt, dass selbst Schüttungen, die alle sonstigen Voraussetzungen zum Wärmestau erfüllen, durch eine ausreichend kurze **Lagerdauer** keinen Brand verursacht haben. Induktionszeiten und Selbstentzündungstemperaturen resultieren wie gesagt aus allen Einflussparametern und können nicht pauschal tabelliert werden, jedoch können Lagerzeiten angegeben werden, unter denen es in keinem Fall zur Selbstentzündung kommen kann. [14][15] Für die Angabe der Lagerdauer ist auf Erfahrungswerte zurückzugreifen, da wenn immer derselbe Abfall unter denselben Bedingungen abgelagert wird, die stoff- und systemspezifischen Parameter nahezu konstant bleiben und die Induktionszeiten nahe beieinander liegen sollten.

#### 4.2.2.7 Böschungswinkel

Der **Böschungswinkel** ergibt sich durch die Form und die Höhe des Haufens, häufig ist er durch den maximalen Schüttgutwinkel vorgegeben.

Steilere Winkel begünstigen die Entwicklung von Schmelbränden in Schüttungen aufgrund des verbesserten Eintrittswinkels für Wind und die dadurch erhöhte Menge von Sauerstoff. [34] Hierbei ist anzumerken, dass ab einem gewissen materialabhängigen Winkel die Wärmeabgabe über Konvektion verstärkt wird und somit die Gefahr einer Selbstentzündung abnimmt. [21][35] Im vorliegenden Fall wird dies nicht berücksichtigt, da häufig die vermehrte Wärmeproduktion die Wärmeabgabe übertrifft und Kühlungsmechanismen nicht berücksichtigt werden. [34]

#### 4.2.2.8 Schüttungshöhe

Die **Schüttungshöhe** ist eine wesentliche Größe zur Beschreibung der Selbstentzündungsneigung, da mit einer gewissen Höhe, die deutlich kleiner sein muss als die anderen Abmessungen, die spezifische Oberfläche (Oberflächen/Volumen-Verhältnis) der ganzen Schüttung und damit die Wärmeabfuhr abnehmen. [15]. Unter einer bestimmten Höhe ist eine Selbstentzündung beinahe unmöglich, diese Werte sind jedoch für jedes Material unterschiedlich. [15][21][62]

#### 4.2.2.9 Oberflächenverhältnis

Das **Oberflächenverhältnis** vereint hier allfällige gasdichte Abdeckungen des Haufens als auch die Luftzufuhr.

Damit die mikrobiellen und chemischen Prozesse in der Schüttung überhaupt möglich sind, muss Sauerstoff zugeführt werden. Wird der Sauerstoff im Inneren verbraucht, kommt es aufgrund des entstehenden Druckgradienten zu Konvektion, welche frischen Sauerstoff nachliefert. [15][21]

#### 4.2.2.10 Windeinfluss

Aufgrund des verbesserten Sauerstoffeintrags durch die Anwesenheit von **Wind** in die Schüttung werden sowohl die mikrobielle als auch die chemische Wärmeproduktion begünstigt, welche eine mögliche Abkühlung durch erhöhte Konvektion überlagern und somit zu einer höheren Gefahr der Selbstentzündung führen. [15][21]

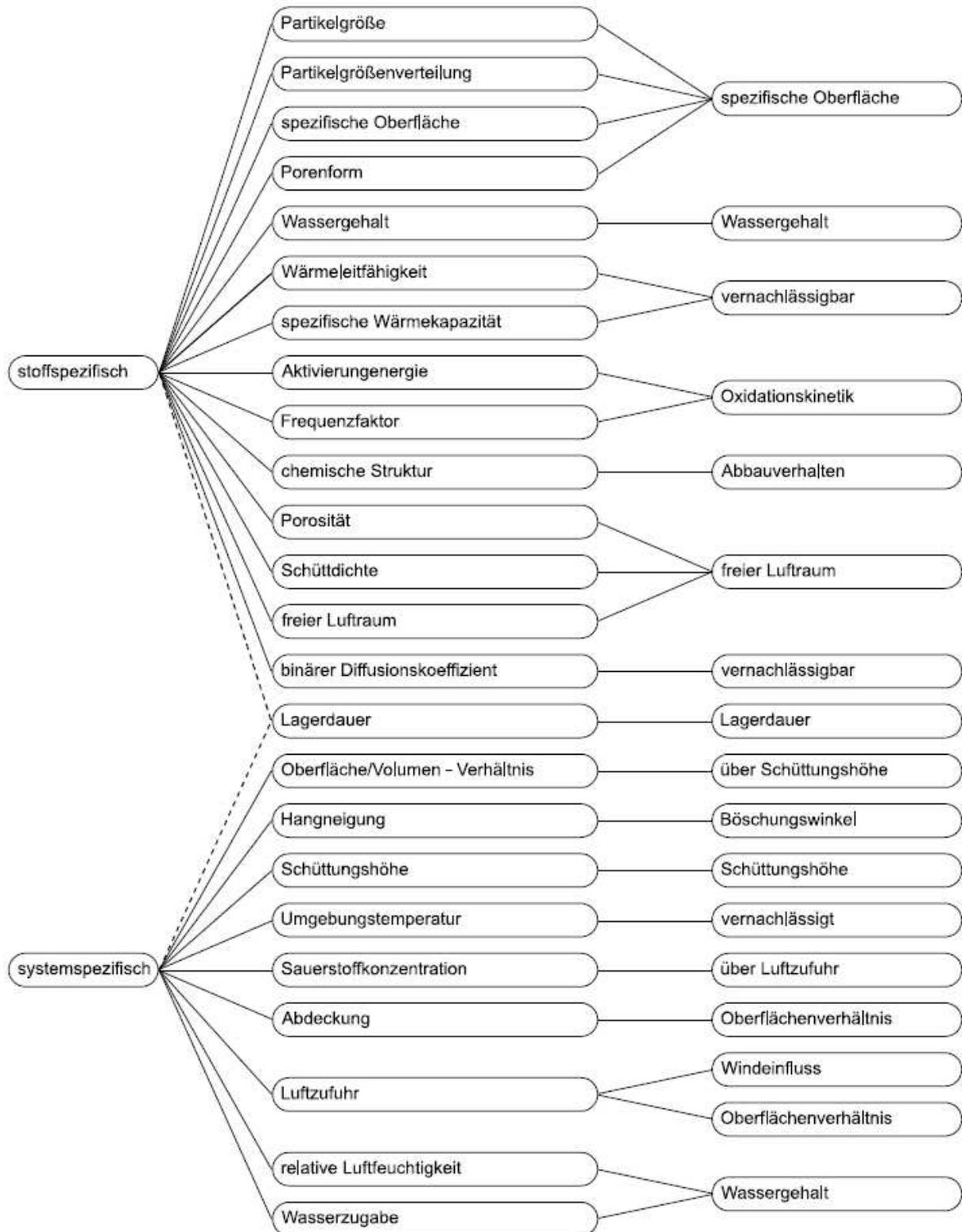


Abbildung 16: Reduzierte Einflussparameter für die Selbstentzündung

### 4.2.3 Brandwärme

Die reduzierten Einflussparameter für die Wärme sind in Abbildung 17 ersichtlich.

#### 4.2.3.1 Heizwert

Da der vorliegende Stoff einen bestimmten Heizwert besitzt und dieser für die Beschreibung der Wärmefreisetzung wichtig ist, wird der **Heizwert** als reduzierter Einflussparameter angegeben.

Der gesamte wasserfreie Heizwert wird aus den Massenanteilen und den einzelnen wasserfreien Heizwerten der Stoffe für die gesamte Schüttung berechnet:

Der gesamte wasserfreie Heizwert muss noch mit dem realen Wassergehalt korrigiert werden. Schließlich wird der daraus berechnete Heizwert zum größten tabellierten wasserfreien Heizwert in Bezug gesetzt.

#### 4.2.3.2 Spezifische Oberfläche

Mit der Partikelgröße geht eine gewisse **spezifische Oberfläche** einher, welche allgemeiner zur Beschreibung dient.

Die Brandausbreitungsgeschwindigkeit steigt mit der spezifischen Oberfläche, da einerseits die Partikel schneller durchwärmt werden können und andererseits der Sauerstoff, ähnlich Selbstentzündung, besser adsorbiert wird. Dies kann bei ausreichend kleinen Partikeln mit hoher spezifischer Oberfläche sogar zu einer explosionsartigen Verbrennung führen („Staubexplosion“). Hierbei ist anzumerken, dass die Partikel ab einer hohen spezifischen Oberfläche und den dafür erforderlichen geometrischen Voraussetzungen, sehr schnell durchwärmt werden und die Brandausbreitungsgeschwindigkeit kaum mehr steigerbar ist. Analog dazu verhält es sich bei niedrigen spezifischen Oberflächen. Das Partikel kann nur bis zu einer gewissen Tiefe durchwärmt werden, der Rest verbleibt im Ausgangszustand und nimmt vorerst nicht an der Verbrennung teil. [50][63]

#### 4.2.3.3 Wassergehalt

Wasser beeinflusst sowohl den Heizwert als auch die Brandausbreitung. Bei einem höheren **Wassergehalt** breitet sich ein Brand langsamer aus, da mehr Wärme notwendig ist, um den Brennstoff aufzubereiten. Dies geht so weit, dass ab einem gewissen Wassergehalt keine Ausbreitung mehr möglich ist und der Brand erlischt. [47][64]

#### 4.2.3.4 Thermal Response Parameter

Der Thermal Response Parameter ist eine Größe für die Leichtigkeit der Ausbreitung [45] und für jeden Stoff verschieden, deshalb wird für den konkreten Fall der geringste TRP ( $\text{TRP}_{\min}$ ) eines einzelnen Stoffes aus der Schüttung verwendet. Der TRP kann aufgrund seines Zustandekommens und der Einheit nicht über z. B. Massenanteile für eine gesamte Schüttung berechnet werden.

#### 4.2.3.5 Porosität

Die maximale Brandausbreitungsgeschwindigkeit tritt bei einer **Porosität** von ca. 0,97-0,98 auf. Bei diesem Wert ist die Durchströmbarkeit schon sehr groß und gleichzeitig die Abstände zwischen den Partikeln in der Schüttung noch so gering, dass der Brand über die Mechanismen der Wärmeübertragung direkt von Partikel zu Partikel weitergegeben werden kann. [65]

#### 4.2.3.6 Kontinuität

Die **Kontinuität** zur Verlangsamung bzw. zum Löschen von Bränden wird auch im baulichen (Brandabschnittsbildung) und im abwehrenden (Trennen von unversehrtem Brennstoff vom Brand) Brandschutz verwendet. In diesem Fall wird sie als volumenbezogen betrachtet:

#### 4.2.3.7 Windeinfluss

**Wind** beeinflusst die Wärmefreisetzung auf mehrere Arten: Es wird mehr Sauerstoff für eine schnellere Verbrennung zur Verfügung gestellt, die Luftbewegung entzieht dem Brennstoff zusätzlich Wasser. Außerdem kann der Wind die Flammen näher an den Haufen drücken und diesen dadurch thermisch aufbereiten, auch verstärkter Funkenflug ist möglich. [47] Einzelne Messungen zeigen sogar eine Entkoppelung vom Wassergehalt, sodass mit mehr Wind der Wassergehalt immer weniger Einfluss auf die Brandausbreitung hat. Nichtsdestotrotz kann ein Brand auch ohne Wind aufrechterhalten werden. [47]

#### 4.2.3.8 Oberflächenverhältnis

Ohne die Zufuhr von Luft bzw. Sauerstoff ist eine Verbrennung nicht möglich, bei einem Flammand ist selbst die im Schüttungsvolumen gespeicherte Menge nicht ausreichend. Je weniger Sauerstoff vorhanden ist, desto langsamer und ineffizienter ist die Verbrennung. [45]

#### **4.2.3.9 Böschungswinkel**

Obwohl ein Brand sich in jede Richtung ausbreiten kann, sind Flammbrände in Richtung aufwärts, also entgegen der Erdbeschleunigung, an vertikalen Oberflächen am schnellsten. Dies liegt daran, dass durch die aufsteigende Wärme der frische Brennstoff bereits thermisch aufbereitet und durch den entstehenden Auftrieb ständig neuer Sauerstoff angesaugt wird. Zusätzlich wird der Lufteintrag durch natürliche (Auftrieb) und erzwungene (Wind) Konvektion mit einem steileren Neigungswinkel verbessert. [45]

#### **4.2.3.10 Höhenverhältnis**

Die Schüttungshöhe hat hier insofern Einfluss, dass wenn eine Überdeckung über der Schüttung besteht, diese die Verbrennung fördern können. [45] Außerdem wird bei einem geringen Abstand zwischen Oberkante der Schüttung und Unterkante der Überdeckung diese womöglich schneller einstürzen. Natürlich entfällt dieser Einfluss, wenn es keine Überdeckung gibt. Als maximale Höhe der Unterkante der Überdeckung vom Boden gemessen wird 25 m herangezogen. Dies setzt sich zusammen aus dem maximalen Fluchtniveau von 22 m bei Gebäudeklasse 5 (speziell in diesem Fall z. B. Bedienpodest für Hallenkran, Wartungssteg, usw.), einer lichten Durchgangshöhe von mindestens 2,1 m zur Benützung dieser und 0,9 m als Platzbedarf für tragende Bauteile oder sonstige technische Einrichtungen. [66][67]

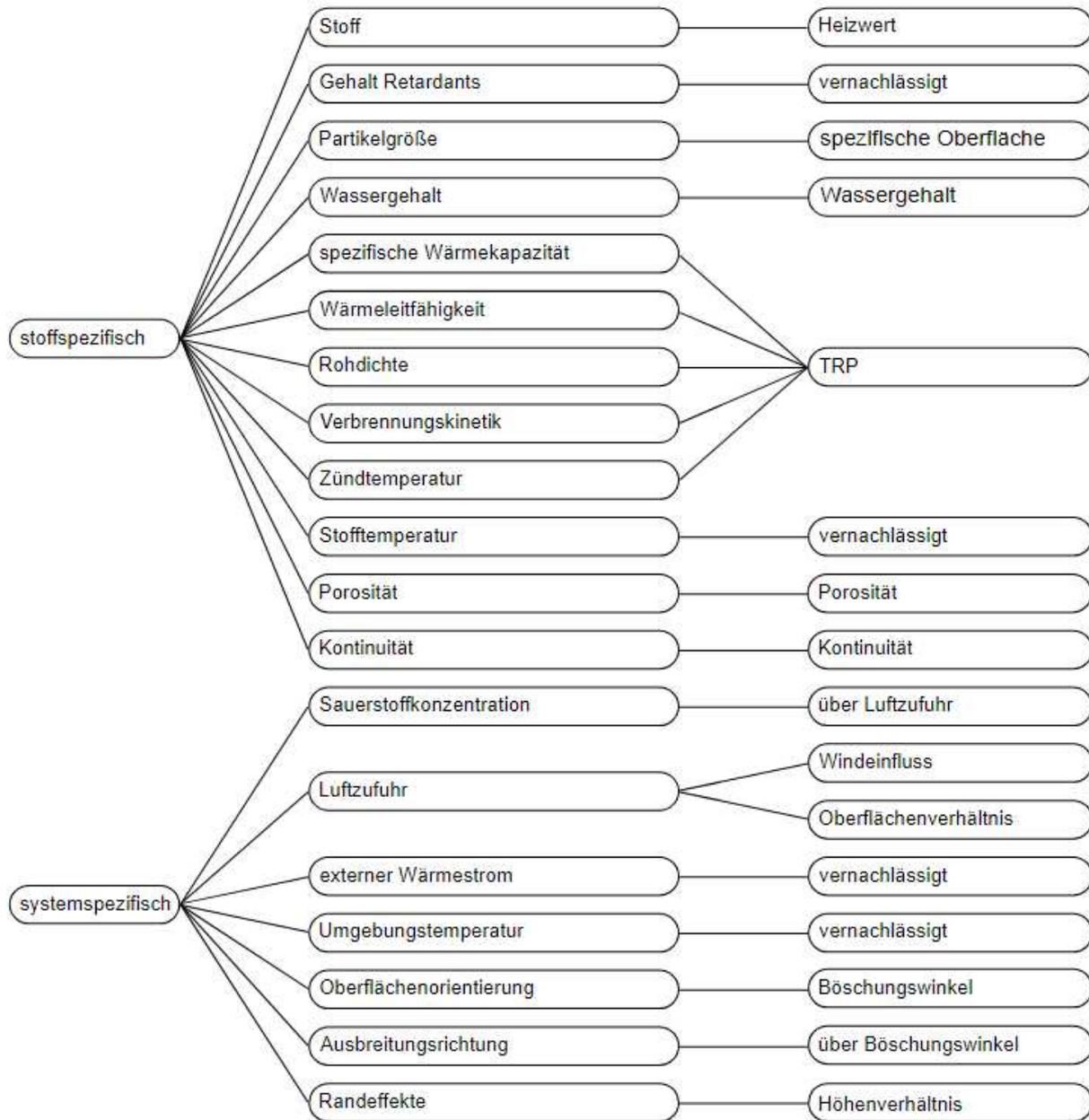


Abbildung 17: Reduzierte Einflussparameter für die Brandwärme

#### 4.2.4 Brandrauch

Auch beim Rauch werden die Einflussparameter, wie in Abbildung 18 ersichtlich, begrenzt

#### 4.2.4.1 Smoke Yield

Der **Smoke Yield** vereint aufgrund seines Zustandekommens den Aschgehalt, die Gehalte an gesättigten und ungesättigten Kohlenwasserstoffen und die Verbrennungskinetik. [68]

Der gesamte Smoke Yield der Schüttung wird mit den Massenanteilen und den Smoke Yield-Größen der Reinstoffe berechnet:

#### 4.2.4.2 Wassergehalt

Der Wassergehalt beeinflusst die Rauchproduktion wesentlich, da sowohl in der Anfangsphase mehr Wasserdampf aufsteigt, an dem Brandprodukte kondensieren können, als auch das Wasser insgesamt zu einer schlechteren Verbrennung führt und somit zu mehr Rauch. [53][70]

#### 4.2.4.3 Spezifische Oberfläche

Die Partikelgröße und die Partikelform beeinflussen die **spezifische Oberfläche** und werden daher als diese berücksichtigt.

Im Gegensatz zu den vorhergehenden Punkten wirkt sich eine vergrößerte spezifische Oberfläche positiv auf die Menge an produziertem Rauch aus, da durch die schnellere Durchwärmung und die bessere Adsorption von Sauerstoff die Verbrennung effizienter, also mit höherer Temperatur und vollständiger, ablaufen kann. [70]

#### 4.2.4.4 Oberflächenverhältnis

Wird die Luftzufuhr gesenkt erhöht sich die Menge an produziertem Rauch im Allgemeinen, was durch das **Oberflächenverhältnis** berücksichtigt wird. [19]

#### 4.2.4.5 Windeinfluss

Obwohl sich Wind positiv auf die Sauerstoffzufuhr und damit auf die Verbrennung und die Entstehung von Rauch auswirkt, wird der Windeinfluss ebenfalls negativ bewertet. Hierbei ist es nicht die Rauchproduktion, welche den eigentlichen Effekt ausmacht, sondern die deutlich erhöhte vertikale und vor allem seitliche Verteilung über ein größeres Gebiet. [71]

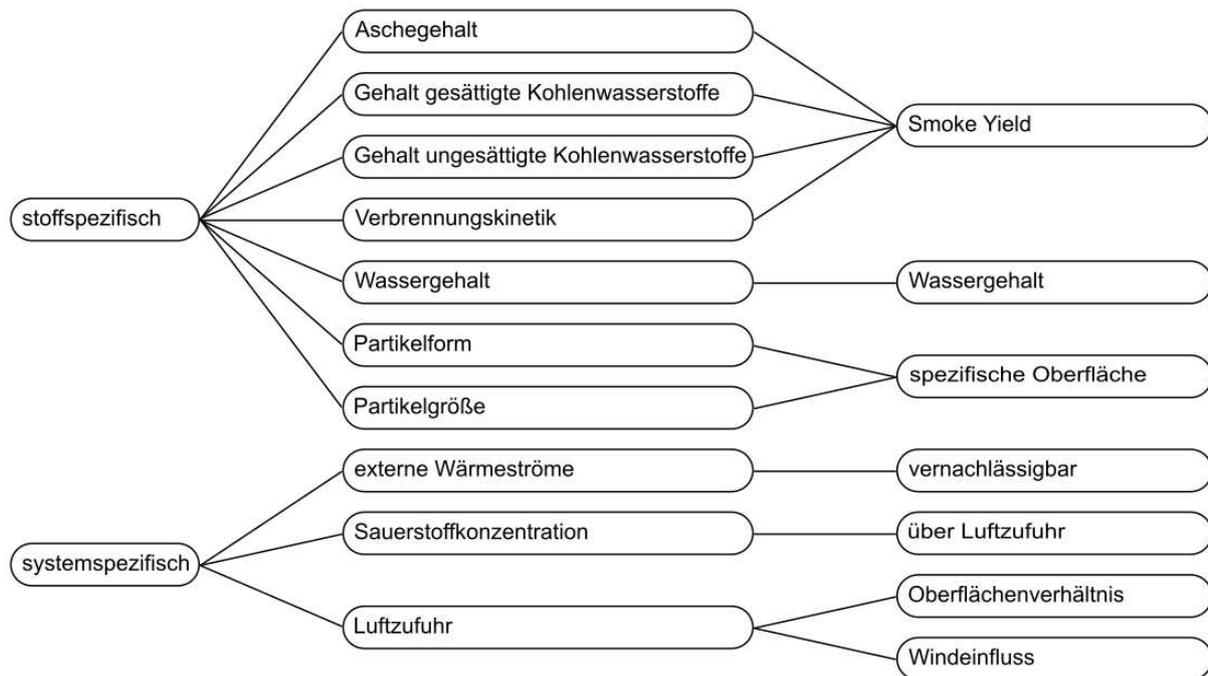


Abbildung 18: Reduzierte Einflussparameter für den Brandrauch

#### 4.2.5 Grundlagen zum Ablauf

Wie bereits erwähnt sind Abhängigkeiten zwischen den Einflussparametern gegeben, um diese darzustellen wurden anhand von Literaturdaten mathematische Funktionen für den maßgeblichen Gültigkeitsbereich gezeichnet. Hierbei ist der Einflussparameter immer auf der Abszisse und der sich daraus ergebende Einfluss auf die Bedrohung auf der Ordinate aufgetragen sind (Einflusskurve). Sollten die Literaturdaten unterschiedliche Einheiten aufweisen, welche nicht ineinander umgerechnet werden können, so werden die Ordinatenwerte auf 1 normiert. Alle Werte wurden auf Sinnhaftigkeit überprüft und vollständig in das Programm übernommen. Beispielhaft sind zwei Kurven dargestellt, alle weiteren sind im Anhang II ersichtlich.

Die in Abbildung 19 und Abbildung 20 dargestellten Kurven sind folgendermaßen zu interpretieren: Je höher der Wassergehalt, desto langsamer breitet sich ein Brand aus, ab einem bestimmten Wert erlischt dieser sogar. Dieser Wert ist für jeden Stoff unterschiedlich. Die Abszisse musste aufgrund der inkompatiblen Einheiten in der Literatur normiert werden, die Ordinate verläuft von 0 bis 100%. Je höher die spezifische Oberfläche des Brennstoffes, desto schneller breitet sich ein Brand aus

Die spezifische Oberfläche kann nicht den Wert „Null“ annehmen, weshalb das Diagramm in der hier gezeigten Skalierung vorliegt. Außerdem ist die Anpassung an die Modellgrenze ersichtlich, wonach die spezifische Oberfläche nicht größer als  $20,4 \text{ mm}^2/\text{mm}^3$  betragen kann.

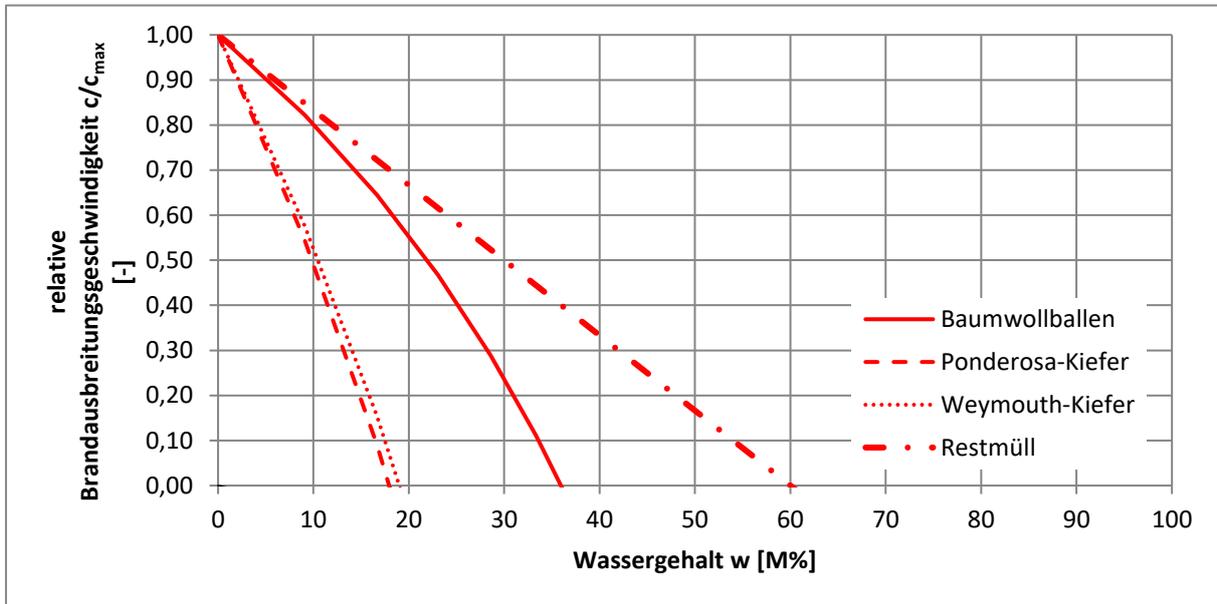


Abbildung 19: Einfluss des Wassergehaltes auf die relative Brandausbreitungsgeschwindigkeit (Brandwärme) für verschiedene Stoffe

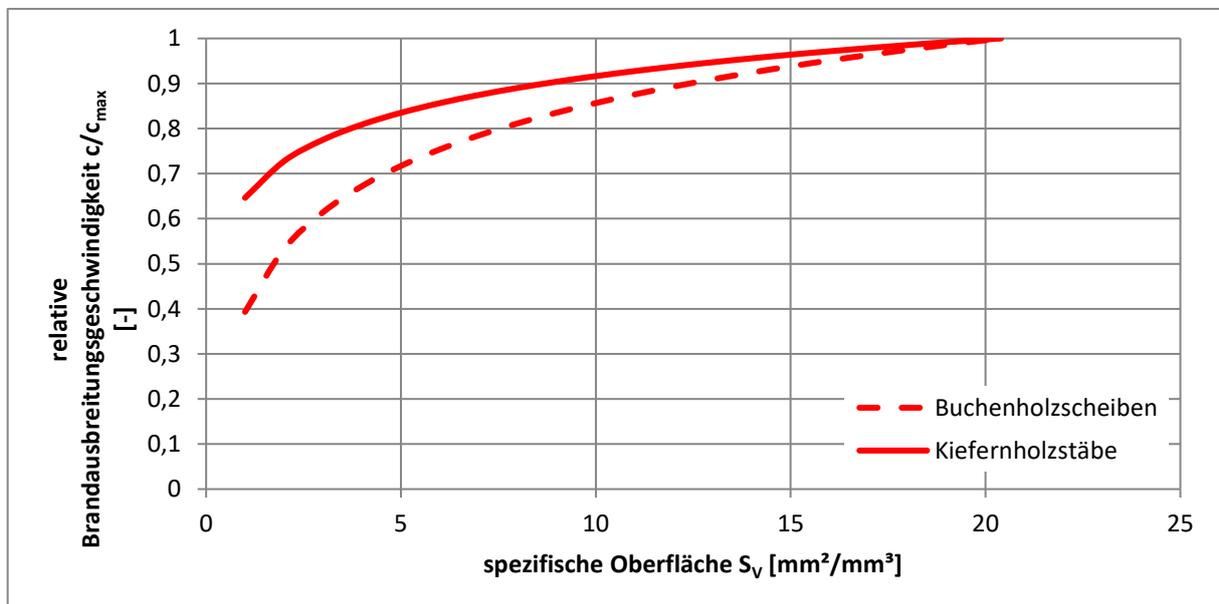


Abbildung 20: Einfluss der spezifischen Oberfläche auf die relative Brandausbreitungsgeschwindigkeit (Brandwärme) für verschiedene Stoffe

## 4.2.6 Ermittlung der Relativwerte

Jeder Einflussparameter wird zu einem bekannten Extremwert in Bezug gesetzt, dem „credible worst case“. Der dabei entstehende dimensionslose Wert wird Relativwert genannt, für dessen Ermittlung der tatsächliche Einfluss eines Parameters auf eine Bedrohung (Einflusskurve) mit der entsprechenden Funktion angenähert wird. Somit ergeben ein linearer bzw. logarithmischer Zusammenhang eine lineare bzw. eine logarithmische Funktion. Unabhängig von der Funktion kann allerdings jeder Relativwert nur einen Wert von 0 bis 1 annehmen, bei mehreren Quellen wird ein Mittelwert gebildet. In der Abbildung 22 und der Abbildung 23 sind zwei Funktionen für Relativwerte ersichtlich, im weiteren Verlauf werden lineare Funktionen nicht mehr graphisch dargestellt. Eine vollständige Auflistung aller Relativwertfunktionen ist dem Anhang II beigefügt. An dieser Stelle soll auch die Anwendung der subjektiven Wahrscheinlichkeit am Beispiel des Wassergehaltes zur Selbstentzündung erklärt werden. Die Selbstentzündungsneigung ist bei einem Wassergehalt aufgrund von mikrobiellem Wachstum von ca. 20-60% am größten, weshalb dieser Bereich den Wert 1 zugewiesen bekommt. Bei den Randbereichen wurden die entsprechenden Werte einfach in ihrer ursprünglichen Form übernommen, so ergibt eine halbierte Wachstumsrate einen Relativwert von 0,5, ersichtlich in Abbildung 21.

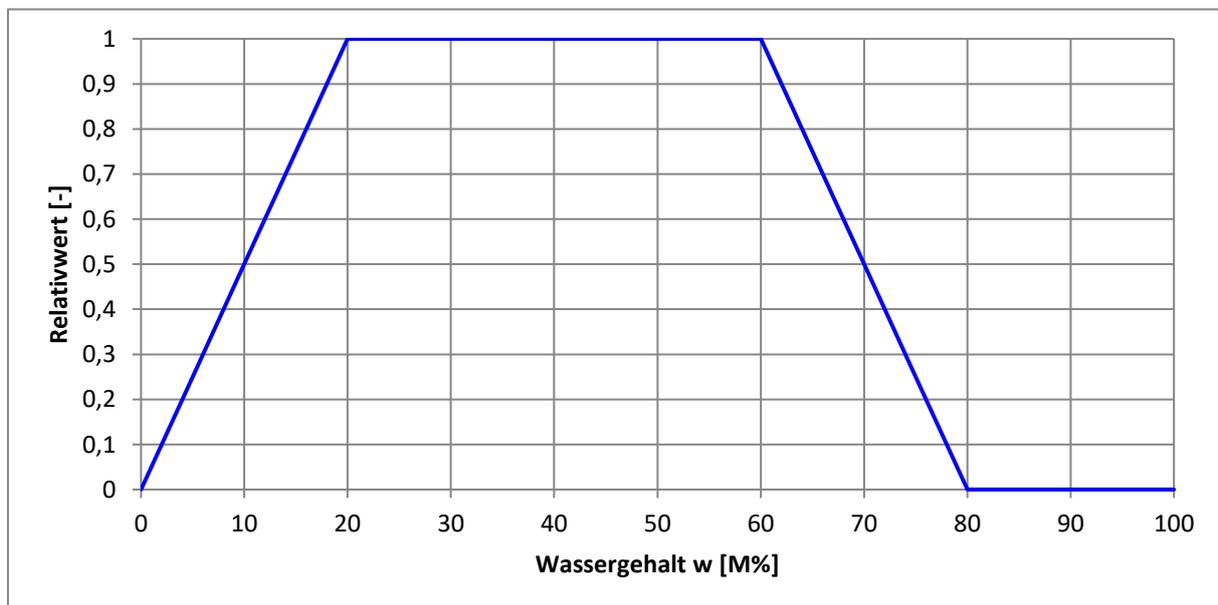


Abbildung 21: Abhängigkeit des Relativwertes für den Wassergehalt des mikrobiellen Wachstums (Parameter der Selbstentzündung)

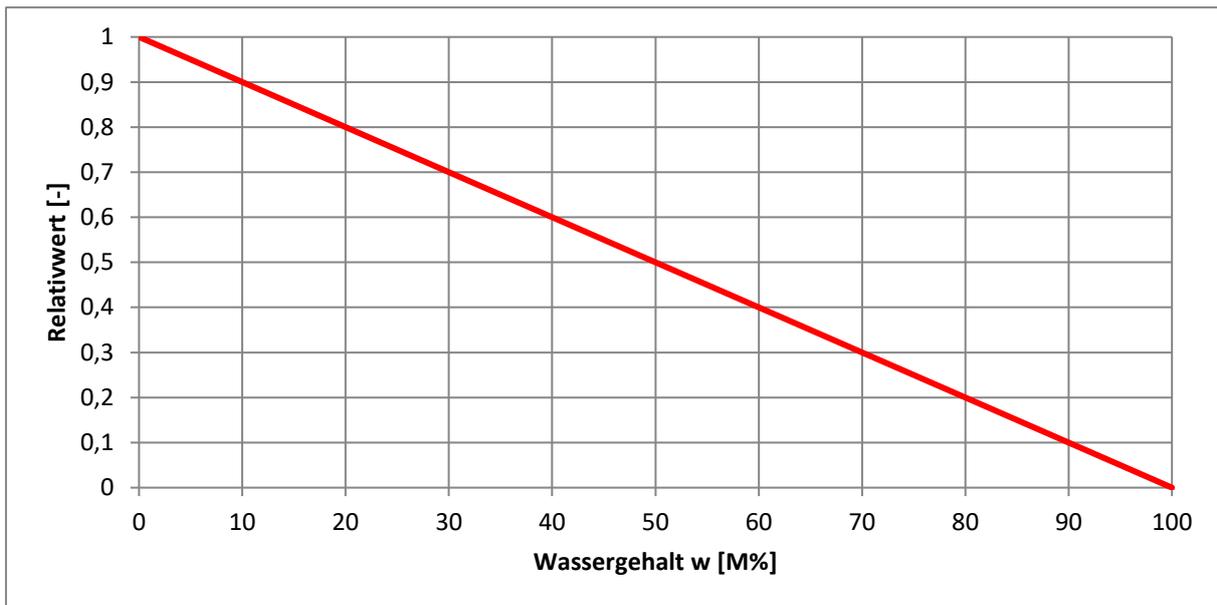


Abbildung 22: Abhängigkeit des Relativwertes für den Einfluss des Wassergehaltes auf die Brandausbreitung (Parameter der Brandwärme)

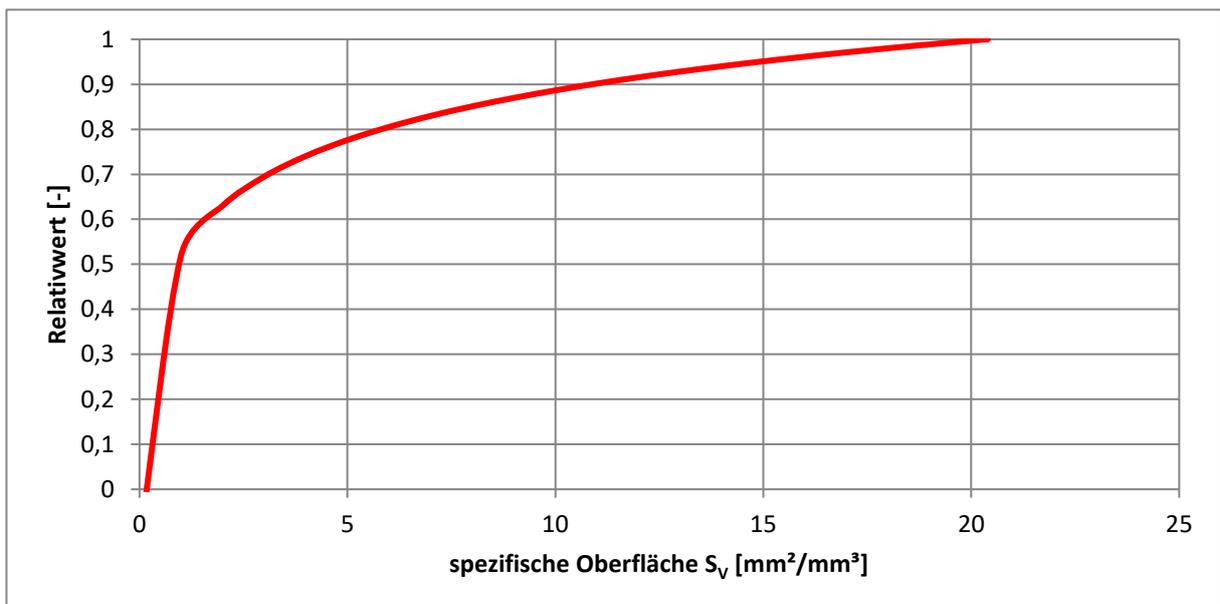


Abbildung 23: Abhängigkeit des Relativwertes für den Einfluss der spezifischen Oberfläche auf die Brandausbreitung (Parameter der Brandwärme)

#### 4.2.7 Ermittlung der Gewichtungsfaktoren

Die Relativwerte können in dieser Form noch nicht für eine weitere Verwendung herangezogen werden, da der tatsächliche Einfluss der reduzierten Einflussparameter nicht korrekt wiedergegeben würde. Deshalb müssen sie zueinander in Beziehung gesetzt werden. Dies erfolgt über die Einführung von Gewichtungsfaktoren. Wie bereits angemerkt, sind Brandwärme und -rauch das Ergebnis desselben Prozesses und werden daher

gemeinsam betrachtet. Ein Brand kann jedoch unabhängig voneinander durch Fremd- oder Selbstentzündung ausgelöst werden, weshalb diese beiden Bedrohungen getrennt voneinander behandelt werden. Die Ermittlung der Gewichtungen erfolgte nach einem eigens entwickelten Verfahren, welches nachfolgend beschrieben wird:

1. Die Werte der Einflusskurve werden gemittelt und in einem auf 1 normierten Diagramm eingetragen (normierte Einflusskurve). Die Normierung erfolgt mittels eines entweder logischen oder festgelegten Maximalwertes und ist notwendig, da der Einfluss sonst durch unterschiedliche Einheiten nicht vergleichbar wäre. (Abbildung 24 und Abbildung 25)
2. In die normierte Einflusskurve wird eine lineare Trendlinie eingefügt, unabhängig vom tatsächlichen Verlauf. Der Betrag der Steigung dieser Geraden wird für die weitere Auswertung benötigt, wie ebenfalls in der Abbildung 24 und der Abbildung 25 ersichtlich ist.
3. Die Steigungen werden für jede Bedrohung ausgewertet, wobei Wärme und Rauch gemeinsam sowie Fremd- und Selbstentzündung getrennt voneinander behandelt werden. Aus den tabellierten Steigungen wird das Maximum ermittelt, im nächsten Schritt werden die Steigungen durch das Maximum dividiert, um sie untereinander in Beziehung zu setzen. Schließlich werden sie summiert und wieder durch die Summe dividiert, um einen Wert von 0 bis 1 zu erhalten.

Die einzelnen Gewichtungsfaktoren bewegen sich wieder im Bereich von 0 bis 1 und erfüllen gleichzeitig die Funktion eines Faktor-Screenings, einer einfachen Form der Sensitivitätsanalyse, wobei der qualitative Einfluss von Eingangsvariablen untereinander auf die Ausgangsvariable bestimmt wird. [72]

Sämtliche Gewichtungen der Brandauswirkung wurden nach diesem Verfahren ermittelt. Da für TRP und Smoke Yield keine genaueren Verlaufsdaten verfügbar waren, wurde ihnen aufgrund der Abhängigkeit vom Stoff, dieselbe Steigung wie der Heizwert zugeteilt.

Anders verhält sich dies bei der Entzündungswahrscheinlichkeit, da dort bereits eine Sensitivitätsanalyse zum Einfluss eines Faktors auf die Lagerdauer durchgeführt wurde. [21] Diese Daten wurden nach dem Verfahren ausgewertet, auch hier war nicht jeder Einflussparameter betroffen. So wurde dem Abbauverhalten aufgrund der Abhängigkeit vom Stoff dieselbe Steigung gegeben wie der Oxidationskinetik. Der freie Luftraum wird gleich gewertet wie der Wassergehalt, auch wenn dieser in der Literatur ohne Mikrobiologie behandelt wurde. Der Lagerdauer wurde als absolut kritischster Parameter die doppelte Steigung der ansonsten maximalen Steigung gegeben. Da ein Brand unabhängig voneinander durch Fremd- oder Selbstentzündung ausgelöst werden kann, wurde schließlich

jeder dieser beiden Bedrohungen der Wert 0,5 zugeteilt. Dies deckt sich auch mit statistischen Daten, wobei beide ungefähr gleich viele Brände auslösen. [2]

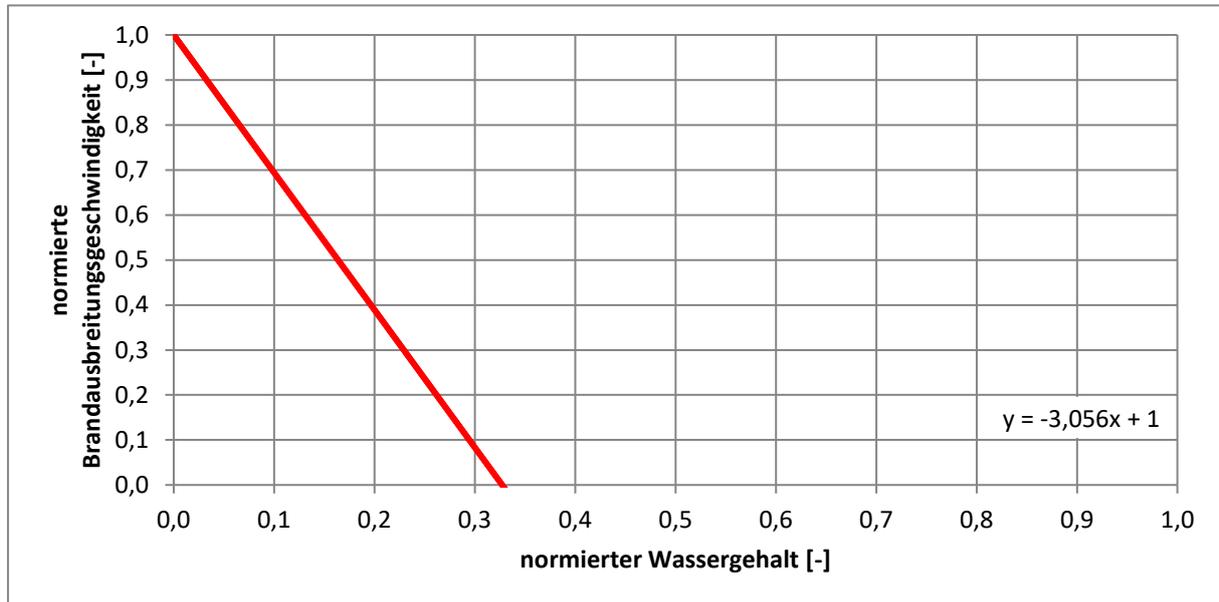


Abbildung 24: Normierte Einflusskurve für den Einfluss des Wassergehaltes auf die Brandausbreitung (Brandwärme)

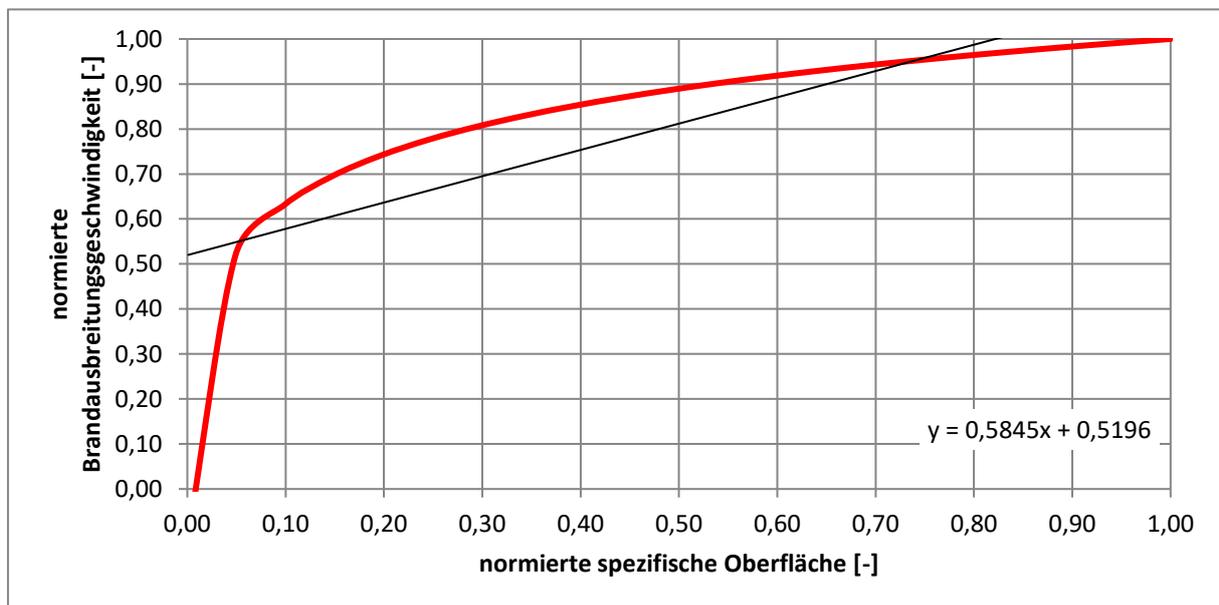


Abbildung 25: Normierte Einflusskurve für den Einfluss der spezifischen Oberfläche auf die Brandausbreitung (Brandwärme)

#### 4.2.8 Ermittlung und Darstellung des Brandrisikos

Die Relativwerte werden mit den entsprechenden Gewichtungsfaktoren multipliziert und somit endgültig priorisiert. Diese bewerteten Relativwerte werden addiert und ergeben

jeweils eine Gesamtzahl für Entzündungswahrscheinlichkeit und Brandauswirkung, welche wiederum maximal den Wert 1 erreichen kann.

Die Darstellung des Endergebnisses für das Brandrisiko erfolgt durch eine Risikomatrix, wobei die Achsenbezeichnungen aus der Szenarioanalyse nach Norm [7] entsprechend der Anwendung angepasst werden. Die Eintrittswahrscheinlichkeit wird Entzündungswahrscheinlichkeit und die Auswirkung wird Brandauswirkung benannt. Auch wenn die Wahl der Wesentlichkeitsgrenzen grundsätzlich für jeden Fall individuell zu bestimmen ist, so gibt es doch einige Erfahrungswerte und Anhaltspunkte aus Literatur und Praxis. [6][73] Besonders zu erwähnen ist hierbei, dass selbst wenn derartige Werte nicht speziell für den Abfallbereich oder überhaupt Brandschutz definiert wurden, sie doch alle ähnlich zu interpretieren sind und dementsprechend ein ähnliches Verständnis zu dieser Thematik aufweisen. In Gesprächen mit Vertretern der AbER stellte sich heraus, dass kleinere Brände mit geringen Schäden, welche rasch und mit nur wenig Aufwand bekämpft werden können, täglich bis wöchentlich auftreten können und meist nicht gemeldet werden. Dies liegt unter anderem auch daran, schlechte öffentliche Wahrnehmung oder gar Berichterstattung zu vermeiden. Großbrände oder Brände unter Einsatz von betriebsfremden Kräften sind offensichtlich und werden grundsätzlich in Datenbanken vermerkt. Die Klasseneinteilungen in Schritten von 0,20 erfolgte nach [6]. Zur besseren Vorstellung wurden übliche Zeiträume definiert, welche in der Tabelle 6 für die Entzündungswahrscheinlichkeit aufgelistet werden. Die entsprechende Darstellung für die Brandauswirkung ist in Tabelle 7 ersichtlich.

Tabelle 6: Interpretation der Entzündungswahrscheinlichkeit basierend auf [6][73]

| <b>Entzündungswahrscheinlichkeit (EW)</b> | <b>Eintrittshäufigkeit</b>            |
|---|---------------------------------------|
| 0,00                                      | Unmöglich                             |
| $0,00 < EW \leq 0,20$                     | Mehr als zehn Jahre                   |
| $0,20 < EW \leq 0,40$                     | Alle zwei Jahre bis zehn Jahre        |
| $0,40 < EW \leq 0,60$                     | Alle sechs Monate bis einmal jährlich |
| $0,60 < EW \leq 0,80$                     | Einmal monatlich bis alle drei Monate |
| $0,80 < EW \leq 1,00$                     | Einmal täglich bis einmal wöchentlich |

Tabelle 7: Interpretation der Brandauswirkung basierend auf [6]

| Brandauswirkung (BA)  | betroffene Schutzziele |           |        |          |
|-----------------------|------------------------|-----------|--------|----------|
|                       | Betrieb                | Sachwerte | Umwelt | Menschen |
| 0,00                  | Nicht brennbar         |           |        |          |
| $0,00 < BA \leq 0,20$ | nein                   | nein      | nein   | nein     |
| $0,20 < BA \leq 0,40$ | ja                     | nein      | nein   | nein     |
| $0,40 < BA \leq 0,60$ | ja                     | ja        | nein   | nein     |
| $0,60 < BA \leq 0,80$ | ja                     | ja        | ja     | nein     |
| $0,80 < BA \leq 1,00$ | ja                     | ja        | ja     | ja       |

Die Wesentlichkeitsgrenzen werden über ein intuitives Ampelfarbsystem (rot-gelb-grün) dargestellt und symmetrisch fließend miteinander verbunden, wie in Abbildung 26 ersichtlich ist.

Die Ausdehnung des roten Bereiches auf die Skala 0,80–1,00 lässt sich damit begründen, dass es unbedingt zu vermeiden ist, ein katastrophales Ereignis mit praktisch allen betroffenen Schutzzielen zu haben, auch wenn dieses im Abstand von mehr als zehn Jahren auftritt. [74] Gleichzeitig ist ein tägliches Ereignis mit nur geringsten Auswirkungen ebenfalls zu vermeiden, da nicht davon ausgegangen werden kann, dass dies immer rechtzeitig erkannt bzw. detektiert wird und es sich zu einem Großbrand entwickelt. Dementsprechend wird auch der gelbe Bereich dieser Ausdehnung für Werte zwischen 0,60-0,80 unterzogen. Im gelben Bereich werden Brände mit Auswirkungen über die Betriebsgrenzen hinweg erfasst, welche dann auch die angrenzende Umwelt und damit die Öffentlichkeit betreffen. Die diagonale Verbindung im 45° Winkel ergibt die schlussendliche Matrix. Im grünen Bereich kann davon ausgegangen werden, dass der Brand nur das Betriebsgelände betrifft und mit Mitteln des betriebseigenen Brandschutzes bekämpft bzw. kontrolliert werden kann. Jährliche Brandereignisse dieses Ausmaßes sind nach Branchenvertretern ebenfalls wahrscheinlich.

Ereignisse ohne Betriebsunterbrechungen werden oftmals gar nicht erfasst oder als solche erkannt. Sachwerte können im Bereich von Abfall bis hin zu Infrastruktur reichen, Umwelt bezeichnet die angrenzende Umgebung. Personenschäden betreffen in diesem

Zusammenhang nur Personal und Anrainer, welche unverschuldet dazu kommen, und nicht Einsatzkräfte, welche sich bewusst dieser Gefahr aussetzen.

Besonders erwähnenswert ist hierbei, dass diese Interpretationen zunächst ausschließlich mittels Literaturrecherche erstellt wurden. Im nächsten Schritt konnten durch reale Anwendungsbeispiele mit Abfallentsorgungsbetrieben die Ergebnisse bestätigt werden, also das die angefertigte Interpretation mit Erfahrungswerten und Einschätzungen übereinstimmte bzw. diese Unternehmen ebenfalls eine zumindest ähnliche Einstufung ausgewählt hätten.

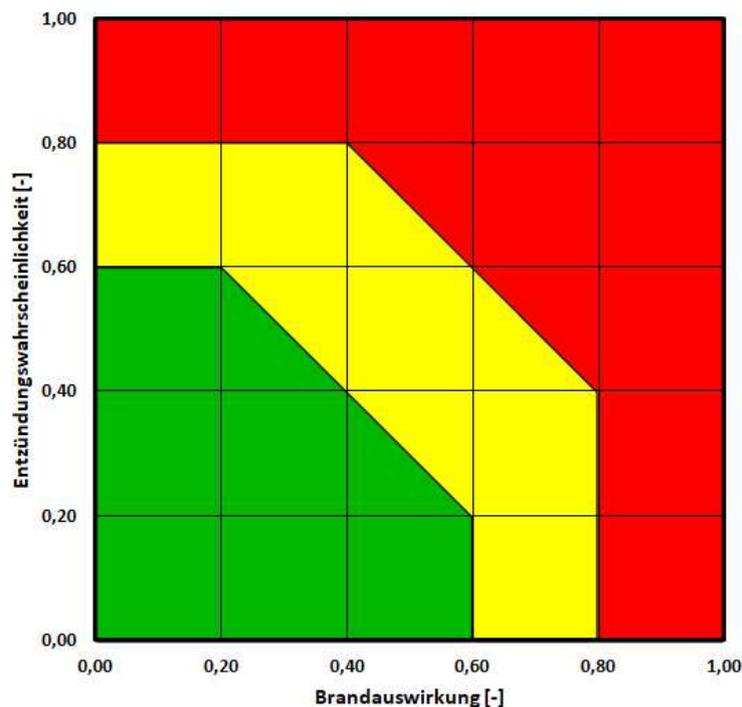


Abbildung 26: Ergebnismatrix der Brandrisikoabschätzung

### 4.3 Gegenmaßnahmen

Die gezielte Veränderung der Werte der Eingabeparameter bzw. der Einflussgrößen ermöglicht nicht nur die Bewertung des Brandrisikos, sondern auch die von Schutzmaßnahmen. Dazu wurden nachfolgend einige Fälle bestimmten Einflussparametern zugeordnet. Die Bewertung der Gegenmaßnahmen sollte über veränderte Eingabeparameter erfolgen. Dabei können sowohl vorbeugende als auch abwehrende Maßnahmen berücksichtigt werden. Insbesondere auf den in diesem Fall äußerst wichtigen Brandschutz wird näher eingegangen. Sämtlichen Maßnahmen liegt das ALARP-Prinzip (as low as reasonably practicable – so niedrig wie vernünftigerweise praktikabel) zugrunde. [77]

### 4.3.1 Vorbeugende Maßnahmen

Vorbeugende Maßnahmen sollen das Eintreten eines Schadensfalles von vorneherein verhindern. Vorbeugender Brandschutz teilt sich in drei Bereiche [78]:

- Baulicher Brandschutz: Brandabschnittsbildung, Brandverhalten der Baustoffe, Flucht- und Rettungswege, usw.
- Anlagentechnischer Brandschutz: Brandmeldeanlagen, Löschanlagen, Rauch- und Wärmeabzug, usw.
- Organisatorischer Brandschutz: erste und erweiterte Löschhilfe, Schulung der Mitarbeiter, Brandschutzpläne, usw.

Zudem können bei Abfallschüttungen besondere vorbeugende Maßnahmen getroffen werden, wie zum Beispiel die Erhöhung des Wassergehaltes durch Befeuchten oder gasdichtes Abdecken, um das Eindringen von Luft zu verhindern. Natürlich sind diese Maßnahmen immer nur bis zu einem gewissen Grad anwendbar und teils sehr aufwändig, außerdem beeinflussen sich die Maßnahmen gegenseitig. In Tabelle 8 sind vorbeugende Maßnahmen tabelliert, einschließlich ihrer Auswirkungen auf Risiken bei Veränderung.

Tabelle 8: Vorbeugende Brandschutzmaßnahmen für Schüttungen

| vorbeugende Brandschutzmaßnahmen bei Abfallschüttungen |   |   |
|--|---|---|
| Einflussparameter                                      | Risiko vergrößern   | Risiko verkleinern  |
| Anteil zündfähiger Masse                               | zündfähige Bestandteile hinzufügen                        | zündfähige Bestandteile entfernen                               |
| Abbauverhalten   | kompostierbare/biol. abbaubare Bestandteile hinzufügen    | kompostierbare/biol. abbaubare Bestandteile entfernen           |
| Wassergehalt   | befeuchten  | trocknen  |
| freier Luftraum  | auflockern, trocknen                                      | verdichten, befeuchten  |
| Oberflächenverhältnis                                  | gasdichte Abdeckung entfernen, andere Lagerform           | gasdichte Abdeckung aufbringen, andere Lagerform                |
| Böschungswinkel  | steiler aufschütten, andere Lagerform                     | flacher aufschütten, andere Lagerform                           |
| Lagerdauer   | Lagerdauer erhöhen  | Lagerdauer verkürzen  |
| Schüttungshöhe   | höher aufschütten   | niedriger aufschütten   |
| Windeinfluss   | gasdichte Abdeckung entfernen, im Freien lagern           | vollständig gasdichte Abdeckung, in Innenräumen lagern          |
| spezifische Oberfläche                                 | zerkleinern, abplatten                                    | agglomerieren   |
| Bildungsrate CO <sub>2</sub>                           | gasdichte Abdeckung entfernen, trocknen                   | gasdichte Abdeckung aufbringen, befeuchten                      |
| Heizwert   | trocknen  | befeuchten  |
| Porosität  | auflockern  | verdichten  |
| Kontinuität  | brennbare Bestandteile hinzufügen                         | brennbare Bestandteile entfernen                                |
| TRP  | trocknen, erwärmen  | befeuchten, kühlen  |
| Smoke Yield  | befeuchten, gasdichte Abdeckung aufbringen, agglomerieren | trocknen, gasdichte Abdeckung entfernen, zerkleinern, abplatten |

### 4.3.2 Abwehrende Maßnahmen

Abwehrende Maßnahmen bzw. abwehrender Brandschutz dient im Ernstfall zur Schadensbegrenzung. Dazu kann die korrekte Auslegung von Löschmodulen dienen. In der Folge wird auf den Löschwasserbedarf näher eingegangen.

Die Ermittlung des Löschwasserbedarfs für den Objektschutz erfolgt nach TRVB 137 F 21. In dieser Richtlinie werden die Einflüsse der Brandlasten des Gebäudes an sich (immobiler Brandbelastung,  $q_{Lwi}$ ), der Nutzung (mobiler Brandbelastung von Wänden und Decken,  $q_{Lwm}$ ), der rechnerischen Brandfläche ( $A_B$ ) und der Lagerguthöhe ( $h_L$ ) berücksichtigt. Die immobiler Brandbelastung hängt von der Art der verwendeten Baumaterialien ab, die Werte für die mobile Brandbelastung sind für diverse Nutzungen in der Richtlinie tabelliert. Allerdings sind diese Werte eher als langjährige Erfahrungswerte anzusehen, deren Zustandekommen weder in dieser, noch in einer verweisenden Richtlinie bzw. durch Nachfrage bei der verantwortlichen Stelle nachvollziehbar angegeben wird. [79] Deshalb wurde die Löschwasserrate für die mobile Brandbelastung folgendermaßen ermittelt: Unter der Annahme eines damit abgedeckten Bereichs, wurde aus den tabellierten Werten das 0,95-Quantil gebildet (Abbildung 21). Da diese Werte nur für Innenräume gelten, musste der entstehende Wert um den Faktor 1,56 für Brände im Freien erhöht werden. [80] Das 0,95-Quantil beträgt  $3,7 \text{ l}/(\text{m}^2 \cdot \text{min})$ , mit der Erweiterung ergibt sich ein  $q_{Lwm}$  von  $5,8 \text{ l}/(\text{m}^2 \cdot \text{min})$ . Eine beispielhafte Berechnung nach TRVB 137 F 21 ist dem Anhang III beigelegt.

Ein weiterer wichtiger Aspekt ist Löschwasserrückhaltung für kontaminiertes Löschwasser. Durch die Aufbringung werden Brandprodukte und Inhaltsstoffe aus dem Brandgut ausgewaschen, welche die ebenfalls ein Gefährdungspotenzial für Menschen, Umwelt und Sachwerte bergen. Dieser Umstand kommt bei Abfällen besonders zum Tragen. Für das benötigte Volumen werden 75% des Löschwasserbedarfs für den Objektschutz zugrunde gelegt. [79]

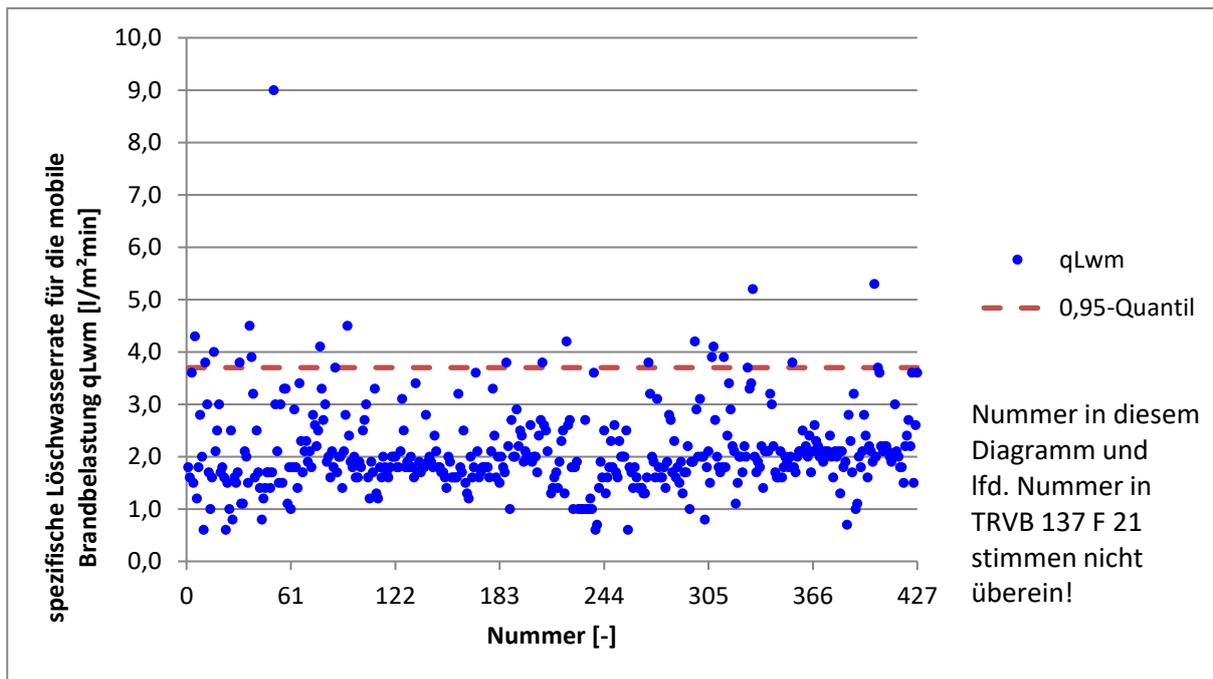


Abbildung 27: Spezifische Löschwasserraten mit 0,95-Quantil [79]

## 5 Umsetzung und Anwendung

Im folgenden Abschnitt wird anfangs die praktische Umsetzung der Funktionsweise gezeigt. Anschließend wird über eine Validierung mit einem abfallähnlichen Stoff als auch an einer realen Berechnung die Ergebnisse diskutiert.

### 5.1 Umsetzung der Risikobewertungsmethode

Die Risikobewertung wurde in MS Excel umgesetzt. Einerseits da die Berechnung mit einfachen mathematischen Zusammenhängen auskommt, andererseits weil somit eine breite Anwendbarkeit gegeben ist. Im Programm können über **Formulare** Eingaben durchgeführt werden, wobei Zeichnungen, Beschreibungstext und Literaturangaben den Benutzer unterstützen. Zusätzlich wird die Benutzereingabe durch, im Tool hinterlegten Werten und Vorschläge unterstützt. Aus diesem Grund sind Eingabefelder in grün und Ergebnisfelder in blau farblich markiert. Die sogenannten **Berechnungsblätter** ermöglichen die Einsicht des Anwenders in die Vorgänge der Berechnungen mit Zwischenergebnissen. Die Endergebnisse werden in dem **Ergebnisblatt** dargestellt. Grundsätzlich sind alle Eingabefelder

#### 5.1.1 Formular für die Haupteingabe (Formular 1)

Im ersten Schritt wird eine von insgesamt 22 vordefinierten Abfallarten [22] ausgewählt werden, die entsprechenden Zusammensetzungen in Massenprozent sind hinterlegt und

werden automatisch eingefügt. Die Massenanteile stammen aus diversen Sortieranalysen, bei Bedarf können diese auch selbstständig eingegeben werden. Zusätzlich ist der Wassergehalt einzutragen, da die Sortieranalysen normalerweise das anhaftende Wasser nicht gesondert berücksichtigen, Erfahrungswerte aber in der Regel existieren. Als nächstes muss zu jeder Fraktion ein Vergleichsstoff ausgewählt werden, welcher die stoffspezifischen Eigenschaften der Fraktion möglichst gut wiedergibt. Dies ist notwendig, da nicht jeder Stoff mit den ihn bezeichnenden Eigenschaften jemals untersucht bzw. tabelliert wurde. Für den Großteil der weiteren Berechnungen werden ausschließlich die Vergleichsstoffe herangezogen, deren Eigenschaften automatisch übernommen werden. Außerdem ist es möglich, gewisse Fraktionen zu vernachlässigen, wenn sie als nur minder wichtig angesehen werden (z.B. geringe Massenanteile). Die Gesamtmasse setzt sich aus dem Abfall und dem enthaltenen Wasser zusammen. Darüber hinaus sind noch die Lagerform, bei einer Überdeckung die Überdeckungshöhe, die Lagerdauern und das Vorhandensein des Windeinflusses anzugeben. Das Formular ist in Abbildung 28 dargestellt.

| Brandrisikoabschätzung von Abfallschüttungen - Formular 1 |              |                   |                         |             |  |
|---|--------------|-------------------|-------------------------|-------------|--|
| Auftraggeber  |              |                   |                         | Datum       |  |
| Sachbearbeiter  |              |                   |                         | Nummer      |  |
| Stoffspezifisch   |              |                   | Systemspezifisch        |             |  |
| Abfallgruppe/Abfallart                                    |              |                   | Gesamtmasse             | 126000 [kg] |  |
| [-]   |              |                   | Gesamtvolumen           | 1135 [m³]   |  |
| Gemischte Siedlungsabfälle (Restmüll)                     |              |                   | Lagerform               |             |  |
| Zusammensetzung lt. Sortieranalyse                        |              |                   | Trapezoid (eingefasst)  |             |  |
| Fraktion  | Massenanteil | Vergleichsstoff   | Oberflächen             |             |  |
| [-]   | [M%]         | [-]               | Gesamtoberfläche'       | 604,03 [m²] |  |
| Organik   | 18,38        | Weichholz         | luftberührte Oberfläche | 430,57 [m²] |  |
| Lebensmittel  | 12,09        | tierisches Fett   | Höhen                   |             |  |
| Papier-VP   | 3,60         | Verpackungspapier | Schüttungshöhe          | 3 [m]       |  |
| Papier-NVP  | 3,80         | Zeitungspapier    | Überdeckungshöhe        | 9 [m]       |  |
| Kunststoff-VP   | 6,19         | LDPE              | Böschungswinkel         |             |  |
| sonstige LVP  | 3,00         | PS kompakt (PS)   | Böschungswinkel         | 70 [°]      |  |
| Glas-VP   | 4,00         | Glas              | Lagerdauern             |             |  |
| Glas-NVP  | 0,90         | Glas              | geplante Lagerdauer     | 20 [d]      |  |
| Metall-VP   | 1,80         | Aluminium         | maximale Lagerdauer     | 30 [d]      |  |
| Metall-NVP  | 1,60         | Eisen             | Windeinfluss            |             |  |
| Kunststoff-NVP  | 3,90         | ABS               | ja [-]                  |             |  |
| Holz-NVP  | 1,20         | Hartholz          |                         |             |  |
| Hygieneartikel  | 14,59        | Baumwolle         |                         |             |  |
| Textilien   | 4,30         | Polyester (UP)    |                         |             |  |
| Schuhe  | 1,50         | vernachlässigbar  |                         |             |  |
| Elektro-Altgeräte   | 1,30         | vernachlässigbar  |                         |             |  |
| Batterien   | 0,10         | vernachlässigbar  |                         |             |  |
| Problemstoffe   | 0,40         | vernachlässigbar  |                         |             |  |
| Inertes   | 9,99         | Beton             |                         |             |  |
| Sonstige Abfälle  | 6,59         | PUR Schaum, starr |                         |             |  |
| Sortierrest   | 0,80         | vernachlässigbar  |                         |             |  |
| Wassergehalt  |              |                   |                         |             |  |
| Wasser  | 34,00        | [M%]              |                         |             |  |

Abbildung 28: Formular 1 des Berechnungsprogramms mit Eingabe der Abfallart, der Gesamtmasse, der Lagerform, der Überdeckungshöhe (wenn vorhanden), den Lagerdauern und dem Windeinfluss

### 5.1.2 Formular für die spezifische Oberfläche (Formular 2)

Im Formular 2 erfolgt die Eingabe der Abmessungen der einzelnen Materialfraktionen zur Ermittlung der spezifischen Oberfläche. Dies ist deshalb notwendig, da die spezifische Oberfläche eine wichtige Größe zur Charakterisierung von Partikelkollektiven ist. Es besteht die Auswahl zwischen vier Grundformen, die Geometrie der vernachlässigten Fraktionen kann zwar eingegeben werden, wird aber nicht weiter berücksichtigt. Das Formular ist in Abbildung 29 ersichtlich.

| Formular 2 - spezifische Oberfläche |                    |             |             |             |                                     |
|-------------------------------------|--------------------|-------------|-------------|-------------|-------------------------------------|
| Fraktion                            | Partikelform       | Dimension a | Dimension b | Dimension c | spez. Oberfläche                    |
| [-]                                 | [-]                | [mm]        | [mm]        | [mm]        | [mm <sup>2</sup> /mm <sup>3</sup> ] |
| Organik                             | Kreiszylinder      | 50          | 300         | 0           | 0,09                                |
| Lebensmittel                        | Rotationsellipsoid | 100         | 100         | 0           | 0,06                                |
| Papier-VP                           | Quader             | 50          | 50          | 10          | 0,28                                |
| Papier-NVP                          | Quader             | 210         | 297         | 0,5         | 4,02                                |
| Kunststoff-VP                       | Kreiszylinder      | 50          | 1           | 0           | 2,08                                |
| sonstige LVP                        | Kreiszylinder      | 50          | 2           | 0           | 1,08                                |
| Glas-VP                             | quadr. Pyramide    | 100         | 20          | 0           | 3,21                                |
| Glas-NVP                            | quadr. Pyramide    | 100         | 20          | 0           | 3,21                                |
| Metall-VP                           | Rotationsellipsoid | 100         | 200         | 0           | 0,05                                |
| Metall-NVP                          | Kreiszylinder      | 16          | 300         | 0           | 0,26                                |
| Kunststoff-NVP                      | Quader             | 20          | 30          | 40          | 0,22                                |
| Holz-NVP                            | Quader             | 40          | 50          | 60          | 0,12                                |
| Hygieneartikel                      | Kreiszylinder      | 20          | 50          | 0           | 0,24                                |
| Textilien                           | Kreiszylinder      | 100         | 5           | 0           | 0,44                                |
| Schuhe                              | Rotationsellipsoid | 100         | 300         | 0           | 0,05                                |
| Elektro-Altgeräte                   | Quader             | 300         | 300         | 300         | 0,02                                |
| Batterien                           | Kreiszylinder      | 15          | 50          | 0           | 0,31                                |
| Problemstoffe                       | Kreiszylinder      | 100         | 250         | 0           | 0,05                                |
| Inertes                             | quadr. Pyramide    | 120         | 150         | 0           | 13,54                               |
| Sonstige Abfälle                    | Quader             | 15          | 25          | 36          | 0,27                                |
| Sortierrest                         | Quader             | 5           | 5           | 6           | 1,13                                |

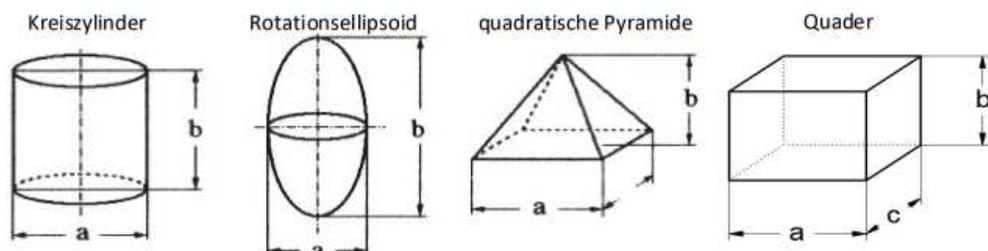


Abbildung 29: Formular 2 des Berechnungsprogramms mit Eingabe der Grundformen und Abmessungen der einzelnen Fraktionen

### 5.1.3 Formular für die Lagerform (Formular 3)

Als Lagerform sind mehrere Geometrien vorgegeben, nach Eingabe der Abmessungen werden die anderen geometrischen Kenngrößen automatisch berechnet. Außerdem können die luftberührten Oberflächen, soweit aufgrund der Lagerform möglich, ausgewählt werden. Es wird automatisch nur die in Formular 1 ausgewählte Lagerform zur weiteren Berechnung herangezogen (Abbildung 30).

| Formular 3 - Lagerform    |                      |                    |                      |                                    |                     |
|---------------------------|----------------------|--------------------|----------------------|------------------------------------|---------------------|
| Quader                    |                      |                    |                      |                                    |                     |
| Gesamtgrundlänge L        | 10 m                 | Gesamtvolumen V    | 225 m <sup>3</sup>   | Gesamtoberfläche' O'               | 190 m <sup>2</sup>  |
| Gesamtgrundbreite B       | 4,5 m                | Gesamtoberfläche O | 235 m <sup>2</sup>   | luftber. Oberfläche O <sub>l</sub> | 0 m <sup>2</sup>    |
| Gesamthöhe H              | 5 m                  | Gesamtumfang U     | 29 m                 | Neigungswinkel α                   | 90 °                |
| Oberfläche 1 O1           | 45 m <sup>2</sup>    | luftberührt        | nein                 |                                    |                     |
| Oberfläche 2 O2           | 45 m <sup>2</sup>    | luftberührt        | nein                 |                                    |                     |
| Oberfläche 3 O3           | 50 m <sup>2</sup>    | luftberührt        | nein                 |                                    |                     |
| Oberfläche 4 O4           | 50 m <sup>2</sup>    | luftberührt        | nein                 |                                    |                     |
| Oberfläche 5 O5           | 22,5 m <sup>2</sup>  | luftberührt        | nein                 |                                    |                     |
| Oberfläche 6 O6           | 22,5 m <sup>2</sup>  | luftberührt        | nein                 |                                    |                     |
| Trapezmiete gleichmäßig   |                      |                    |                      |                                    |                     |
| Gesamtgrundlänge L        | 1 m                  | Gesamtvolumen V    | 3,041 m <sup>3</sup> | Gesamtoberfläche' O'               | 16,1 m <sup>2</sup> |
| Gesamtgrundbreite B       | 2 m                  | Gesamtoberfläche O | 18,08 m <sup>2</sup> | luftber. Oberfläche O <sub>l</sub> | 16,1 m <sup>2</sup> |
| Gesamtdeckbreite b        | 1 m                  | Gesamtumfang U     | 6 m                  | Neigungswinkel α                   | 63,4 °              |
| Gesamthöhe H              | 3 m                  |                    |                      |                                    |                     |
| Oberfläche 1 O1           | 2 m <sup>2</sup>     | luftberührt        | nein                 |                                    |                     |
| Oberfläche 2 O2           | 1 m <sup>2</sup>     | luftberührt        | ja                   |                                    |                     |
| Oberfläche 3 O3           | 3,0 m <sup>2</sup>   | luftberührt        | ja                   |                                    |                     |
| Oberfläche 4 O4           | 3,0 m <sup>2</sup>   | luftberührt        | ja                   |                                    |                     |
| Oberfläche 5 O5           | 4,5 m <sup>2</sup>   | luftberührt        | ja                   |                                    |                     |
| Oberfläche 6 O6           | 4,5 m <sup>2</sup>   | luftberührt        | ja                   |                                    |                     |
| Dreiecksmiete gleichmäßig |                      |                    |                      |                                    |                     |
| Gesamtgrundlänge L        | 1 m                  | Gesamtvolumen V    | 3 m <sup>3</sup>     | Gesamtoberfläche' O'               | 12,3 m <sup>2</sup> |
| Gesamtgrundbreite B       | 2 m                  | Gesamtoberfläche O | 14,32 m <sup>2</sup> | luftber. Oberfläche O <sub>l</sub> | 12,3 m <sup>2</sup> |
| Gesamthöhe H              | 3 m                  | Gesamtumfang U     | 6 m                  | Neigungswinkel α                   | 71,6 °              |
| Oberfläche 1 O1           | 2 m <sup>2</sup>     | luftberührt        | nein                 |                                    |                     |
| Oberfläche 2 O2           | 3,2 m <sup>2</sup>   | luftberührt        | ja                   |                                    |                     |
| Oberfläche 3 O3           | 3,2 m <sup>2</sup>   | luftberührt        | ja                   |                                    |                     |
| Oberfläche 4 O4           | 3 m <sup>2</sup>     | luftberührt        | ja                   |                                    |                     |
| Oberfläche 5 O5           | 3 m <sup>2</sup>     | luftberührt        | ja                   |                                    |                     |
| Trapezoid (eingefasst)    |                      |                    |                      |                                    |                     |
| Gesamtgrundlänge L        | 20 m                 | Gesamtvolumen V    | 1135 m <sup>3</sup>  | Gesamtoberfläche' O'               | 604 m <sup>2</sup>  |
| Gesamtdecklänge l         | 17,8 m               | Gesamtoberfläche O | 1004 m <sup>2</sup>  | luftber. Oberfläche O <sub>l</sub> | 431 m <sup>2</sup>  |
| Gesamtgrundbreite B       | 20 m                 | Gesamtumfang U     | 80 m                 | Böschungswinkel α                  | 70 °                |
| Gesamthöhe H              | 3 m                  |                    |                      |                                    |                     |
| Oberfläche 1 O1           | 400 m <sup>2</sup>   | luftberührt        | nein                 |                                    |                     |
| Oberfläche 2 O2           | 356,4 m <sup>2</sup> | luftberührt        | ja                   |                                    |                     |
| Oberfläche 3 O3           | 56,7 m <sup>2</sup>  | luftberührt        | nein                 |                                    |                     |
| Oberfläche 4 O4           | 56,7 m <sup>2</sup>  | luftberührt        | nein                 |                                    |                     |
| Oberfläche 5 O5           | 74,17 m <sup>2</sup> | luftberührt        | ja                   |                                    |                     |
| Oberfläche 6 O6           | 60 m <sup>2</sup>    | luftberührt        | nein                 |                                    |                     |
| Kegel                     |                      |                    |                      |                                    |                     |
| Grunddurchmesser D        | 1 m                  | Gesamtvolumen V    | 0,524 m <sup>3</sup> | Gesamtoberfläche' O'               | 3,24 m <sup>2</sup> |
| Gesamthöhe H              | 2 m                  | Gesamtoberfläche O | 4,024 m <sup>2</sup> | luftber. Oberfläche O <sub>l</sub> | 3,24 m <sup>2</sup> |
|                           |                      | Gesamtumfang U     | 3,142 m              | Neigungswinkel α                   | 76 °                |
| Oberfläche 1 O1           | 0,785 m <sup>2</sup> | luftberührt        | nein                 |                                    |                     |
| Oberfläche 2 O2           | 3,238 m <sup>2</sup> | luftberührt        | ja                   |                                    |                     |

Abbildung 30: Formular 3 des Berechnungsprogramms mit Eingabe der Abmessungen der gesamten Schüttung

### 5.1.4 Berechnungsblatt für die Stoffzusammensetzung (Berechnung 1)

In diesem Blatt wird die Zusammensetzung aus Formular 1 für die weitere Berechnung vorbereitet. Da ohne die vernachlässigten Fraktionen die Summe der Massenanteile nicht mehr einhundert Prozent beträgt, müssen sie korrigiert werden. Die dabei entstehende Zusammensetzung wird „Massenanteil“ genannt. Im nächsten Schritt muss auch noch der Wassergehalt mit einbezogen werden. Über die hinterlegten Reinstoffdichten der Vergleichsstoffe wird „Massenanteil“ auch zu Volumenanteilen umgerechnet, ersichtlich in Abbildung 31.

| Berechnung 1 - Zusammensetzung        |  |             |                   |  |
|---------------------------------------|--|-------------|-------------------|--|
| Abfallgruppe/Abfallart                |  | Gesamtmasse | Gesamtvolumen     |  |
| [-]                                   |  | [kg]        | [m <sup>3</sup> ] |  |
| Gemischte Siedlungsabfälle (Restmüll) |  | 126000      | 1135              |  |

| Fraktion          | Vergleichsstoff   | Massenanteil' | Massenanteil'' | Volumenanteil |
|-------------------|-------------------|---------------|----------------|---------------|
| [-]               | [-]               | [M%]          | [M%]           | [V%]          |
| Wasser            | Wasser            | -             | 34,00          | 24,00         |
| Organik           | Weichholz         | 19,17         | 12,65          | 17,83         |
| Lebensmittel      | tierisches Fett   | 12,60         | 8,32           | 6,51          |
| Papier-VP         | Verpackungspapier | 3,75          | 2,48           | 2,49          |
| Papier-NVP        | Zeitungspapier    | 3,96          | 2,61           | 2,63          |
| Kunststoff-VP     | LDPE              | 6,46          | 4,26           | 3,27          |
| sonstige LVP      | PS kompakt (PS)   | 3,13          | 2,06           | 1,36          |
| Glas-VP           | Glas              | 4,17          | 2,75           | 0,78          |
| Glas-NVP          | Glas              | 0,94          | 0,62           | 0,17          |
| Metall-VP         | Aluminium         | 1,88          | 1,24           | 0,32          |
| Metall-NVP        | Eisen             | 1,67          | 1,10           | 0,10          |
| Kunststoff-NVP    | ABS               | 4,06          | 2,68           | 1,80          |
| Holz-NVP          | Hartholz          | 1,25          | 0,83           | 0,83          |
| Hygieneartikel    | Baumwolle         | 15,21         | 10,04          | 4,68          |
| Textilien         | Polyester (UP)    | 4,48          | 2,96           | 1,72          |
| Schuhe            | vernachlässigbar  | 0,00          | 0,00           | 0,00          |
| Elektro-Altgeräte | vernachlässigbar  | 0,00          | 0,00           | 0,00          |
| Batterien         | vernachlässigbar  | 0,00          | 0,00           | 0,00          |
| Problemstoffe     | vernachlässigbar  | 0,00          | 0,00           | 0,00          |
| Inertes           | Beton             | 10,42         | 6,88           | 2,42          |
| Sonstige Abfälle  | PUR Schaum, starr | 6,88          | 4,54           | 29,07         |
| Sortierrest       | vernachlässigbar  | 0,00          | 0,00           | 0,00          |
| Summe             |                   | 100,00        | 100,00         | 100,00        |

Abbildung 31: Berechnungsblatt 1 zur Berechnung der weiterverwendeten Massen- und Volumenanteile

### 5.1.5 Berechnungsblatt für Heizwert und TRP (Berechnung 2)

Aus „Massenanteil“ und den wasserfreien Heizwerten der Vergleichsstoffen wird der wasserfreie Heizwert des gesamten Abfalls berechnet. Mit dem Wassergehalt ergibt sich der tatsächliche Heizwert. Außerdem wird der kleinste TRP eines Vergleichsstoffes ausgewählt, wie in

| Berechnung 2 - Heizwert und TRP |               |                    |                |                                       |
|---------------------------------|---------------|--------------------|----------------|---------------------------------------|
| Vergleichsstoff                 | Massenanteil' | Heizwert Reinstoff | Massenanteil'' | TRP Reinstoff                         |
| [-]                             | [M%]          | [kJ/kg]            | [M%]           | [kWs <sup>1/2</sup> /m <sup>2</sup> ] |
| Wasser                          | -             | 0,00               | 34,00          | 0                                     |
| Weichholz                       | 19,17         | 18600,00           | 12,65          | 138                                   |
| tierisches Fett                 | 12,60         | 35900,00           | 8,32           | 0                                     |
| Verpackungspapier               | 3,75          | 16100,00           | 2,48           | 152                                   |
| Zeitungspapier                  | 3,96          | 17750,00           | 2,61           | 108                                   |
| LDPE                            | 6,46          | 43400,00           | 4,26           | 387                                   |
| PS kompakt (PS)                 | 3,13          | 39800,00           | 2,06           | 162                                   |
| Glas                            | 4,17          | 0,00               | 2,75           | 0                                     |
| Glas                            | 0,94          | 0,00               | 0,62           | 0                                     |
| Aluminium                       | 1,88          | 0,00               | 1,24           | 0                                     |
| Eisen                           | 1,67          | 0,00               | 1,10           | 0                                     |
| ABS                             | 4,06          | 33750,00           | 2,68           | 341                                   |
| Hartholz                        | 1,25          | 18600,00           | 0,83           | 134                                   |
| Baumwolle                       | 15,21         | 18400,00           | 10,04          | 252                                   |
| Polyester (UP)                  | 4,48          | 28500,00           | 2,96           | 238                                   |
| vernachlässigbar                | 0,00          | 0,00               | 0,00           | 0                                     |
| vernachlässigbar                | 0,00          | 0,00               | 0,00           | 0                                     |
| vernachlässigbar                | 0,00          | 0,00               | 0,00           | 0                                     |
| vernachlässigbar                | 0,00          | 0,00               | 0,00           | 0                                     |
| Beton                           | 10,42         | 0,00               | 6,88           | 0                                     |
| PUR Schaum, starr               | 6,88          | 21510,00           | 4,54           | 181                                   |
| vernachlässigbar                | 0,00          | 0,00               | 0,00           | 0                                     |

|                                     |                                |                                       |
|-------------------------------------|--------------------------------|---------------------------------------|
| Heizwert wasserfrei H <sub>wf</sub> | Heizwert gesamt H <sub>i</sub> | min. TRP TRP <sub>min</sub> '         |
| [kJ/kg]                             | [kJ/kg]                        | [kWs <sup>1/2</sup> /m <sup>2</sup> ] |
| 19121                               | 11793                          | 108                                   |

Abbildung 32: Berechnungsblatt 2 mit Berechnung des gesamten Heizwertes und Ausgabe des geringsten TRP der Schüttung

### 5.1.6 Berechnungsblatt für die mechanischen Kenngrößen (Berechnung 3)

Zur Ermittlung der mechanischen Kenngrößen werden nur die nicht vernachlässigten Fraktionen herangezogen, außerdem wird eine gesamte spezifische Oberfläche aller Partikel der Schüttung bestimmt, siehe Abbildung 33.

| Berechnung 3 - mechanische Kenngrößen |               |                                     |                                     |         |                      |
|---------------------------------------|---------------|-------------------------------------|-------------------------------------|---------|----------------------|
| Gesamtmasse                           | 126000        | [kg]                                | Gesamtvolumen                       | 1135    | [m <sup>3</sup> ]    |
| Systemspezifisch                      |               |                                     |                                     |         |                      |
| Feststoffmasse $m_s$                  | 83160         | [kg]                                | Flüssigkeitsmasse $m_f$             | 42840   | [kg]                 |
| Feststoffdichte $\rho_s$              | 927           | [kg/m <sup>3</sup> ]                | Flüssigkeitsvolumen $V_f$           | 42,92   | [m <sup>3</sup> ]    |
| Feststoffvolumen $V_s$                | 135,87        | [m <sup>3</sup> ]                   | trockene Schüttdichte               | 76,18   | [kg/m <sup>3</sup> ] |
| feuchte Schüttdichte                  | 111,05        | [kg/m <sup>3</sup> ]                | freier Luftraum                     | 0,84    | [-]                  |
| Porosität $\epsilon$                  | 0,92          | [-]                                 | trockenes Gesamtvolumen             | 1091,68 | [m <sup>3</sup> ]    |
|                                       |               |                                     | Luftvolumen                         | 955,81  | [m <sup>3</sup> ]    |
| Stoffspezifisch                       |               |                                     |                                     |         |                      |
| Fraktion                              | Volumenanteil |                                     | spezifische Oberfläche $S_v$        |         |                      |
| [-]                                   | [V%]          |                                     | [mm <sup>2</sup> /mm <sup>3</sup> ] |         |                      |
| Organik                               | 17,83         |                                     | 0,09                                |         |                      |
| Lebensmittel                          | 6,51          |                                     | 0,06                                |         |                      |
| Papier-VP                             | 2,49          |                                     | 0,28                                |         |                      |
| Papier-NVP                            | 2,63          |                                     | 4,02                                |         |                      |
| Kunststoff-VP                         | 3,27          |                                     | 2,08                                |         |                      |
| sonstige LVP                          | 1,36          |                                     | 1,08                                |         |                      |
| Glas-VP                               | 0,78          |                                     | 3,21                                |         |                      |
| Glas-NVP                              | 0,17          |                                     | 3,21                                |         |                      |
| Metall-VP                             | 0,32          |                                     | 0,05                                |         |                      |
| Metall-NVP                            | 0,10          |                                     | 0,26                                |         |                      |
| Kunststoff-NVP                        | 1,80          |                                     | 0,22                                |         |                      |
| Holz-NVP                              | 0,83          |                                     | 0,12                                |         |                      |
| Hygieneartikel                        | 4,68          |                                     | 0,24                                |         |                      |
| Textilien                             | 1,72          |                                     | 0,44                                |         |                      |
| Schuhe                                | 0,00          |                                     | 0,05                                |         |                      |
| Elektro-Altgeräte                     | 0,00          |                                     | 0,02                                |         |                      |
| Batterien                             | 0,00          |                                     | 0,31                                |         |                      |
| Problemstoffe                         | 0,00          |                                     | 0,05                                |         |                      |
| Inertes                               | 2,42          |                                     | 13,54                               |         |                      |
| Sonstige Abfälle                      | 29,07         |                                     | 0,27                                |         |                      |
| Sortierrest                           | 0,00          |                                     | 1,13                                |         |                      |
| spezifische Oberfläche gesamt         |               | [mm <sup>2</sup> /mm <sup>3</sup> ] | 0,68                                |         |                      |
| Sauterdurchmesser $d_{32}$            |               | [mm]                                | 8,88                                |         |                      |
| hydr. Durchmesser $d_h$               |               | [mm]                                | 66,17                               |         |                      |

Abbildung 33: Berechnungsblatt 3 mit Berechnung der gesamten spezifischen Oberfläche der Partikel in der Schüttung

### 5.1.7 Beiblatt für die Gewichtungsfaktoren

Die Gewichtungsfaktoren werden mit dem bereits beschriebenen Verfahren bestimmt und sind dem Programm hinterlegt. Diese Werte sind in Abbildung 34 dargestellt. Sie können aber auch jederzeit durch den Anwender verändert werden.

| Einflussparameter        | Steigung normiert | Steigung relativ | Gewichtung Wärme und Rauch  | Brandauswirkung |                               |
|--------------------------|-------------------|------------------|-----------------------------|-----------------|-------------------------------|
| Heizwert                 | 1,0563            | 0,3456           | 0,0699                      | 1,000           |                               |
| Porosität                | 0,6230            | 0,2039           | 0,0412                      |                 |                               |
| Kontinuität              | 0,7491            | 0,2451           | 0,0496                      |                 |                               |
| Oberflächenverhältnis    | 0,8271            | 0,2706           | 0,0547                      |                 |                               |
| Böschungswinkel          | 0,9918            | 0,3245           | 0,0656                      |                 |                               |
| Höhenverhältnis          | 0,9982            | 0,3266           | 0,0661                      |                 |                               |
| Wassergehalt             | 3,0560            | 1,0000           | 0,2022                      |                 |                               |
| Windeinfluss             | 0,7640            | 0,2500           | 0,0506                      |                 |                               |
| spezifische Oberfläche   | 0,5845            | 0,1913           | 0,0387                      |                 |                               |
| TRPmin'                  | 1,0563            | 0,3456           | 0,0699                      |                 |                               |
| Smoke Yield              | 1,0563            | 0,3456           | 0,0699                      |                 |                               |
| Wassergehalt             | 1,6259            | 0,5320           | 0,1076                      |                 |                               |
| Oberflächenverhältnis    | 0,5264            | 0,1723           | 0,0348                      |                 |                               |
| Windeinfluss             | 0,5496            | 0,1798           | 0,0364                      |                 |                               |
| spezifische Oberfläche   | 0,6467            | 0,2116           | 0,0428                      |                 |                               |
|                          | 3,0560            | 4,9448           |                             |                 |                               |
| Einflussparameter        | Steigung normiert | Steigung relativ | Gewichtung Fremdentzündung  |                 | Entzündungswahrscheinlichkeit |
| Anteil zündfähiger Masse |                   |                  | 0,5000                      |                 | 1,000                         |
|                          |                   |                  | Gewichtung Selbstentzündung |                 |                               |
| Abbauverhalten           | 1,2039            | 0,4910           | 0,0698                      |                 |                               |
| Wassergehalt             | 0,3934            | 0,1604           | 0,0228                      |                 |                               |
| freier Luftraum          | 0,3934            | 0,1604           | 0,0228                      |                 |                               |
| Oberflächenverhältnis    | 0,8174            | 0,3334           | 0,0474                      |                 |                               |
| Böschungswinkel          | 0,3275            | 0,1336           | 0,0190                      |                 |                               |
| geplante Lagerdauer      | 2,4520            | 1,0000           | 0,1421                      |                 |                               |
| Schüttungshöhe           | 1,2260            | 0,5000           | 0,0711                      |                 |                               |
| Windeinfluss             | 0,1648            | 0,0672           | 0,0096                      |                 |                               |
| spezifische Oberfläche   | 0,4444            | 0,1812           | 0,0258                      |                 |                               |
| Bildungsrate CO2         | 1,2039            | 0,4910           | 0,0698                      |                 |                               |
|                          | 2,4520            | 3,5182           |                             |                 |                               |

Abbildung 34: Beiblatt der Gewichtungsfaktoren

### 5.1.8 Ergebnisblatt für Entzündungswahrscheinlichkeit und Brandauswirkung (Ergebnis 1 und 2)

Die Ergebnisblätter stellen die gewonnenen Daten dar. Dabei werden die Zahlenwerte für die jeweiligen Einflussparameter hinsichtlich Eingabewerte, Relativwerte, Gewichtungsfaktor sowie Endergebnis dargestellt. Die zur Berechnung verwendeten Funktionen sind hier ebenfalls vermerkt. Die maximale Schüttungshöhe und die Bildungsrate von CO<sub>2</sub> sind für jede Abfallart hinterlegt. Die Fraktion der zündfähigen Stoffe wird, auch wenn sie vernachlässigt wurden, wieder hinzugezählt.

| Ergebnis 1 - Entzündungswahrscheinlichkeit    |               |   |                                   |        |         |             |            |             |
|---|---------------|---|-----------------------------------|--------|---------|-------------|------------|-------------|
| Teilergebnis Fremdentzündung                  |               |   |                                   |        |         |             |            |             |
| Parameter                                     | Wert          | Einheit                                     | Bezug                             | Wert   | Einheit | Relativwert | Gewichtung | Gesamtwert  |
| Anteil zündfähiger Masse                      | 1495,38       | [kg]  | Feststoffmasse                    | 83160  | [kg]    | 1,00        | 0,5        | 0,50        |
| <b>Teilergebnis Fremdentzündung</b>           |               |   |                                   |        |         |             |            | <b>0,50</b> |
| Teilergebnis Selbstentzündung                 |               |   |                                   |        |         |             |            |             |
| Parameter                                     | Wert          | Einheit                                     | Bezug                             | Wert   | Einheit | Relativwert | Gewichtung | Gesamtwert  |
| Abbauverhalten                                | kompostierbar | [-]   | Klasseneinteilung                 |        |         | 1,00        | 0,07       | 0,07        |
| Wassergehalt                                  | 34,00         | [M%]  | Funktion                          |        |         | 1,00        | 0,02       | 0,02        |
| freier Luftraum                               | 0,84          | [-]   | Funktion                          |        |         | 0,00        | 0,02       | 0,00        |
| Oberflächenverhältnis                         | 0,71          | [-]   | max. Oberflächenverhältnis        | 1,00   | [-]     | 0,71        | 0,05       | 0,03        |
| Böschungswinkel                               | 70            | [°]   | rechter Winkel                    | 90     | [°]     | 0,78        | 0,02       | 0,01        |
| geplante Lagerdauer                           | 20            | [d]   | maximale Lagerdauer               | 30     | [d]     | 0,67        | 0,14       | 0,09        |
| Schüttungshöhe                                | 3             | [m]   | max. Schüttungshöhe               | 3      | [m]     | 1,00        | 0,07       | 0,07        |
| Windeinfluss                                  | ja            | [-]   | Klasseneinteilung                 |        |         | 1,00        | 0,01       | 0,01        |
| spezifische Oberfläche                        | 0,68          | [mm <sup>2</sup> /mm <sup>3</sup> ]         | Funktion                          |        |         | 0,59        | 0,03       | 0,02        |
| Bildungsrate CO <sub>2</sub>                  | 0,0171        | [kg <sub>CO2</sub> /kg <sub>Probe</sub> *s] | max. Bildungsrate CO <sub>2</sub> | 0,0171 |         | 1,00        | 0,07       | 0,07        |
| <b>Teilergebnis Selbstentzündung</b>          |               |   |                                   |        |         |             |            | <b>0,40</b> |
| <b>Ergebnis Entzündungswahrscheinlichkeit</b> |               |   |                                   |        |         |             |            | <b>0,90</b> |

Abbildung 35: Ergebnisblatt 1 zur Darstellung der Entzündungswahrscheinlichkeit

| Ergebnis 2 - Brandauswirkung    |          |                                       |                            |          |                                       |             |            |             |
|---------------------------------|----------|---------------------------------------|----------------------------|----------|---------------------------------------|-------------|------------|-------------|
| Teilergebnis Wärme              |          |                                       |                            |          |                                       |             |            |             |
| Parameter                       | Wert     | Einheit                               | Bezug                      | Wert     | Einheit                               | Relativwert | Gewichtung | Gesamtwert  |
| Heizwert                        | 11792,91 | [kJ/kg]                               | max. Heizwert wasserfrei   | 43400,00 | [kJ/kg]                               | 0,27        | 0,07       | 0,02        |
| Porosität                       | 0,92     | [-]                                   | Funktion                   |          |                                       | 0,43        | 0,04       | 0,02        |
| Kontinuität                     | 0,72     | [-]                                   | Funktion                   |          |                                       | 0,93        | 0,05       | 0,05        |
| Oberflächenverhältnis           | 0,71     | [-]                                   | max. Oberflächenverhältnis | 1,00     | [-]                                   | 0,71        | 0,05       | 0,04        |
| Böschungswinkel                 | 70,03    | [°]                                   | rechter Winkel             | 90,00    | [°]                                   | 0,78        | 0,07       | 0,05        |
| Höhenverhältnis                 | 0,33     | [-]                                   | Funktion                   |          |                                       | 0,12        | 0,07       | 0,01        |
| Wassergehalt                    | 34,00    | [M%]                                  | max. Wassergehalt          | 100,00   | [M%]                                  | 0,66        | 0,20       | 0,13        |
| Windeinfluss                    | ja       | [-]                                   | Entscheidungsfrage         |          |                                       | 1,00        | 0,05       | 0,05        |
| spezifische Oberfläche          | 0,68     | [mm <sup>2</sup> /mm <sup>3</sup> ]   | Funktion                   |          |                                       | 0,46        | 0,04       | 0,02        |
| TRP <sub>min</sub> <sup>1</sup> | 108,00   | [kWs <sup>1/2</sup> /m <sup>2</sup> ] | min. TRP                   | 95,00    | [kWs <sup>1/2</sup> /m <sup>2</sup> ] | 0,88        | 0,07       | 0,06        |
| <b>Teilergebnis Wärme</b>       |          |                                       |                            |          |                                       |             |            | <b>0,44</b> |
| Teilergebnis Rauch              |          |                                       |                            |          |                                       |             |            |             |
| Parameter                       | Wert     | Einheit                               | Bezug                      | Wert     | Einheit                               | Relativwert | Gewichtung | Gesamtwert  |
| Smoke Yield                     | 0,02     | [g/g]                                 | max. Smoke Yield           | 0,23     | [g/g]                                 | 0,08        | 0,07       | 0,07        |
| Wassergehalt                    | 34,00    | [M%]                                  | max. Wassergehalt          | 100,00   | [M%]                                  | 0,34        | 0,11       | 0,11        |
| Oberflächenverhältnis           | 0,71     | [-]                                   | max. Oberflächenverhältnis | 1,00     | [-]                                   | 0,29        | 0,03       | 0,03        |
| Windeinfluss                    | ja       | [-]                                   | Entscheidungsfrage         |          |                                       | 1,00        | 0,04       | 0,04        |
| spezifische Oberfläche          | 0,68     | [mm <sup>2</sup> /mm <sup>3</sup> ]   | Funktion                   |          |                                       | 0,47        | 0,04       | 0,04        |
| <b>Teilergebnis Rauch</b>       |          |                                       |                            |          |                                       |             |            | <b>0,29</b> |
| <b>Ergebnis Brandauswirkung</b> |          |                                       |                            |          |                                       |             |            | <b>0,74</b> |

Abbildung 36: Ergebnisblatt 2 zur Darstellung der Brandauswirkung

## 5.2 Anwendung der Risikobewertungsmethode

Die praktische Anwendung der Bewertungsmethode erfolgt durch eine Validierung anhand eines homogenen Stoffes und bekannten Parametern. In einem zweiten Schritt wird die Bewertung einer realen Abfalllagerung mit veränderlichen Eingabegrößen durchgeführt (Case Study).

### 5.2.1 Modellvalidierung

Um die abstrakte Vorstellung des Brandrisikos einer Abfallschüttung konkretisieren zu können wurde eine Modellvalidierung durchgeführt. Dafür wurde ein brennbares Lagergut mit folgenden Anforderungen gewählt:

- brennbarer Feststoff
- in Haufenform gelagert
- in Österreich weit verbreitet
- bestehende Vorschriften zur sicheren Lagerung
- Kenntnisse über die Stoffkenngrößen
- Kenntnisse über die Anzahl der Brandfälle

Die Wahl fiel schließlich auf Holzhackgut, da es nicht nur den Anforderungen gerecht wird, sondern auch, aufgrund der Vorgaben der Energiewirtschaft, mit einer wachsenden Anzahl solcher Lager gerechnet werden muss. Im vorliegenden Fall wurde ein überdachter Haufen aus Buchenholzhackgut untersucht, welcher der Kennzeichnung C1/P31 nach ÖNORM C 4005 entspricht. [75]

Die stofflichen Eigenschaften des Hackgutes wurden auf unterschiedliche Weise ermittelt. Der Heizwert (18600 kJ/kg), die Porosität (0,60), der Smoke Yield (0,0015 g/g), der Wassergehalt (0,25) und der TRP ( $134 \text{ kW}\cdot\text{s}^{1/2}/\text{m}^2$ ) entstammen Literaturdaten. [9][30] Für die Bestimmung der spezifischen Oberfläche wurden händisch Proben an 9 verschiedenen Stellen des Haufens gezogen (beschrieben in [76]). Diese Probemasse wurde durch die Methode „Kegeln und Vierteln“ so weit verjüngt, bis unter 10 M% der Ausgangsmasse vorhanden waren. Die verjüngte Probe wurde nun händisch vermessen, die einzelnen Partikel hatten in guter Näherung eine Quaderform. Hierbei ist anzumerken, dass nur Hackgutpartikel mit mindestens einer Dimension größer oder gleich 10 mm vermessen wurden, der Rest als Feinanteil nicht weiter berücksichtigt. Aus den Messdaten konnten für jedes einzelne Partikel die Oberfläche und das Volumen berechnet werden, welche in

Summe eine gesamte Oberfläche und ein gesamtes Volumen ergeben. Aus diesen Gesamtwerten wurde eine spezifische Oberfläche ermittelt, welche  $0,44 \text{ mm}^2/\text{mm}^3$  beträgt. Die Messung berücksichtigt weder die innere Oberfläche durch die Porosität des Holzes noch den Einfluss der Rauigkeit.

Für die Validierung werden die beschriebenen Stoffdaten des Hackgutes eingegeben, die systemspezifischen Parameter werden von denen der Case Study übernommen (Lagerform siehe Abbildung 37). Somit entspricht das Ergebnis dem Fall, dass der Abfallhaufen in der vorliegenden Form durch einen Hackguthaufen ausgetauscht wird.

### 5.2.2 Case Study

Die Case Study wurde für insgesamt sechs Abfallarten durchgeführt, welche in Tabelle 9 aufgelistet sind. Für diese Abfallarten sind typische Zusammensetzungen auf Basis von Sortieranaysen hinterlegt. Zudem sind für diese Zusammensetzungen Vergleichsstoffe und Partikelgrößen und -formen hinterlegt und eine automatische Berechnung der stoffspezifischen Parameter für die Schüttung ermöglicht. Die Abbildungen 28 – 34 enthalten die Eingabe-, Berechnungs- und Ergebnisschritte für die gemischten Siedlungsabfälle.

Tabelle 9: Abfallfraktionen der Case Study

| <b>Abfallgruppe/Abfallart</b>                      | <b>Kurzbezeichnung</b> |
|--|------------------------|
| Gemischte Siedlungsabfälle (Restmüll)              | RM                     |
| Leichtverpackungen (z.B. gelbe Tonne, gelber Sack) | LVP                    |
| Altpapier, Karton                                  | AK                     |
| Bauschutt  | BS                     |
| Grünschnitt  | GS                     |
| Altreifen (stückig)                                | AS                     |

Für alle Abfallarten wurden, bis auf die Gesamtmasse, dieselben systemspezifischen Parameter verwendet. Die Überdeckungshöhe betrug 9 m und die geplante bzw. maximale Lagerdauer 20 Tage bzw. 30 Tage. Es ist ein Windeinfluss vorhanden. die entsprechende Lagerform ist in Abbildung 37 dargestellt. Bei dem Lager handelt es sich um ein tatsächlich existierendes Lager eines österreichischen Abfallbehandlungsunternehmens.

Für die Darstellung wurden vier Berechnungsdurchgänge durchgeführt, um die Auswirkungen dreier Einflussparameter zeigen zu können:

1. Durchgang: Wassergehalt = 34 M%
2. Durchgang: Wassergehalt = 52 M% (z.B. durch Befeuchtungsmaßnahmen)
3. Durchgang: Gasdichte Schüttungsabdeckung, womit keine luftberührten Oberflächen und Windeinflüsse mehr
4. Durchgang: Entfernung aller zündfähigen Fraktionen im Abfall (z.B. durch Vorsortierung)

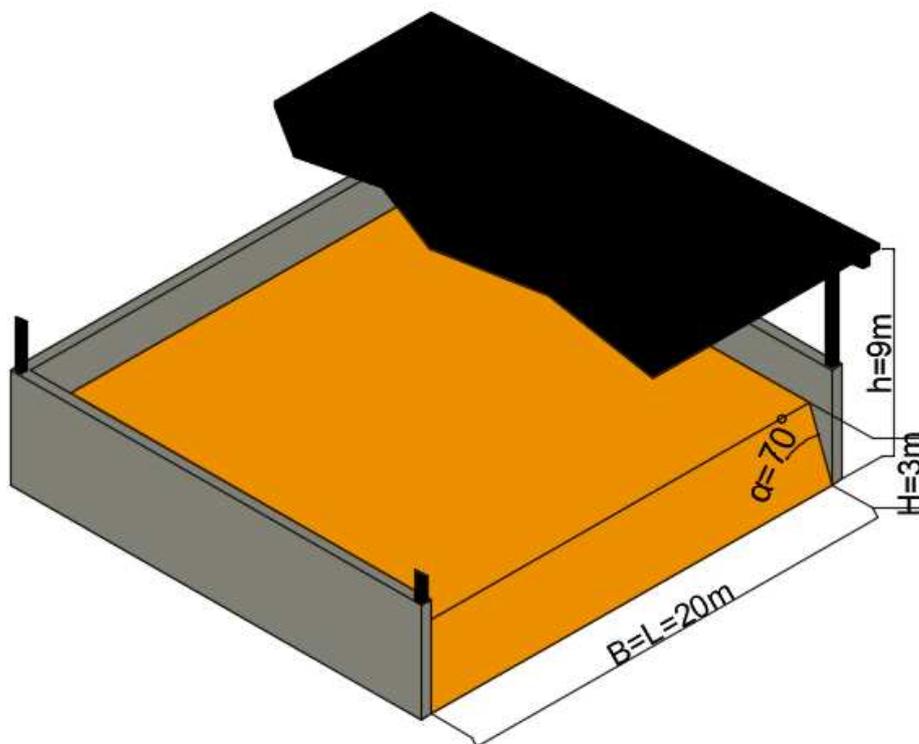


Abbildung 37: Abmessungen des Abfalllagers der Case Study-  
Berechnungen

## 6 Ergebnisse und Diskussion

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Modellvalidierung mit Hackgut und jene der in der Case Study untersuchten Abfallarten dargestellt und diskutiert. Anschließend erfolgt eine grundsätzliche Diskussion der Berechnungsmethodik.

### 6.1 Ergebnisse der Validierung

Die Validierung wurde für die beschriebene Geometrie mit Hackgut durchgeführt. Hackgut hat aufgrund des niedrigen Wassergehaltes und der hohen Kontinuität eine hohe Brandauswirkung. Da es sich um ein hergestelltes Produkt und nicht um einen Abfall handelt, ist die Zusammensetzung weitgehend bekannt. Zündfähige Stoffe sind mit allergrößter Wahrscheinlichkeit nicht enthalten, lediglich die Selbstentzündungsneigung bleibt bestehen. Nach dem Berechnungstool wird die Entzündungswahrscheinlichkeit zwischen 0,20 und 0,40 und die Brandauswirkung zwischen 0,60 und 0,80 angegeben, wie in der Risikomatrix in Abbildung 38 ersichtlich ist. Laut Tabelle 6 und Tabelle 7 ist alle zwei bis zehn Jahre mit einem Brandfall, welcher Betrieb, Sachwerte und Umwelt gefährdet, Menschen allerdings nicht, zu rechnen.

In einem persönlichen Gespräch mit einem großen europäischen Versicherungsunternehmen (Name wird auf besondere Bitte des Unternehmens nicht veröffentlicht) wurde bekanntgegeben, dass es ungefähr alle zwei bis drei Jahre zu einem Brand mit katastrophalen Auswirkungen in einem Hackgutlager kommt, allerdings glücklicherweise ohne Personenschäden (genaue Daten dürfen aus datenschutzrechtlichen

Gründen nicht veröffentlicht werden). Dies entspricht in guter Übereinstimmung den Ergebnissen dieser Brandrisikoanalyse für Abfälle.

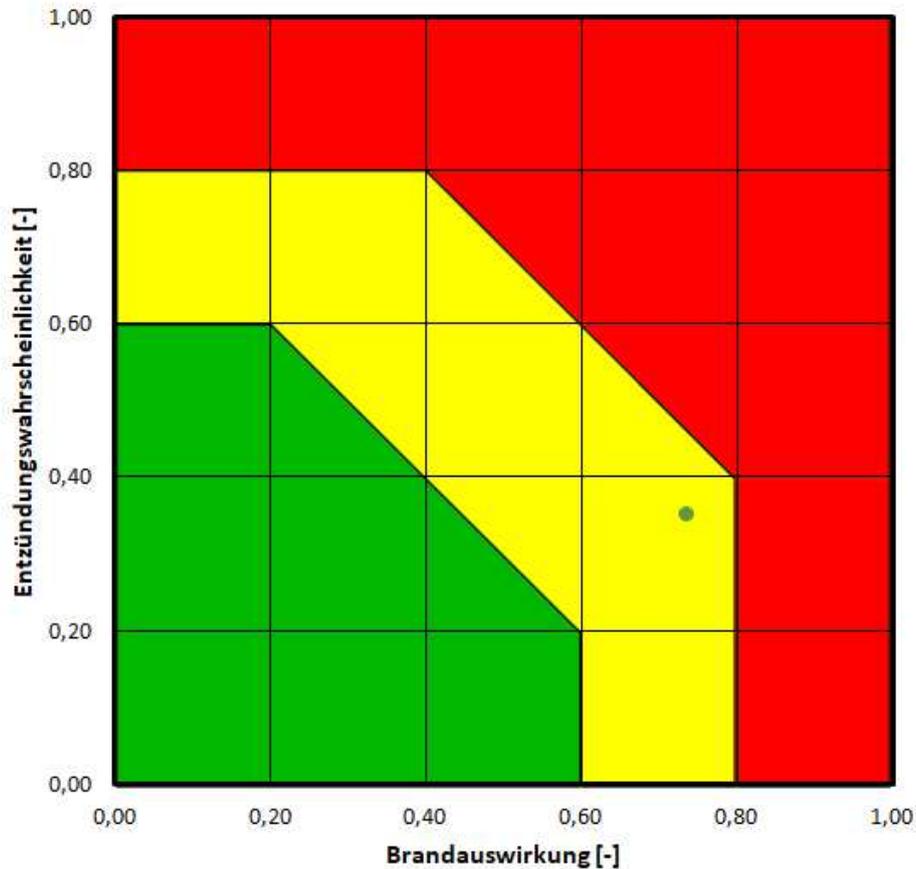


Abbildung 38: Ergebnismatrix der Modellvalidierung mit Hackgut

## 6.2 Ergebnisse der Case Study

In Tabelle 10 sind die Berechnungsergebnisse für die Entzündungswahrscheinlichkeit (EW) und die Brandauswirkung (BA) dargestellt, jeweils nach vorher beschriebenen Durchgängen aufgeteilt. Die Risikomatrix mit diesen Ergebnissen ist in Abbildung 39 dargestellt. Dabei sind die Berechnungsdurchgänge mit folgenden Farben markiert:

1. Durchgang: hellblau
2. Durchgang: violett
3. Durchgang: schwarz
3. Durchgang: grau (nur für RM)

Zudem sind die Abfallarten durch unterschiedliche Symbole markiert. Die gemischten Siedlungsabfälle (RM) werden als Kreis, die Leichtverpackungen (LVP) als Quadrat,

Altpapier (AK) als Dreieck, Bauschutt (BS) als Plus-Zeichen, Grünschnitt (GS) als Diamant und die stückigen Altreifen (AS) als Minus-Zeichen dargestellt.

Tabelle 10: Ergebnisse für Entzündungswahrscheinlichkeit und Brandauswirkung der Abfälle in der Case Study

| Durchgang | Kurzbezeichnung | BA   | EW   |
|-----------|-----------------|------|------|
| 1         | RM              | 0,74 | 0,90 |
| 1         | LVP             | 0,78 | 0,37 |
| 1         | AK              | 0,74 | 0,31 |
| 1         | BS              | 0,00 | 0,00 |
| 1         | GS              | 0,70 | 0,33 |
| 1         | AS              | 0,66 | 0,31 |
| 2         | RM              | 0,70 | 0,90 |
| 2         | LVP             | 0,72 | 0,37 |
| 2         | AK              | 0,71 | 0,31 |
| 2         | BS              | 0,00 | 0,00 |
| 2         | GS              | 0,67 | 0,33 |
| 2         | AS              | 0,61 | 0,31 |
| 3         | RM              | 0,61 | 0,86 |
| 3         | LVP             | 0,63 | 0,33 |
| 3         | AK              | 0,62 | 0,27 |
| 3         | BS              | 0,00 | 0,00 |
| 3         | GS              | 0,58 | 0,29 |
| 3         | AS              | 0,52 | 0,27 |
| 4         | RM              | 0,61 | 0,36 |

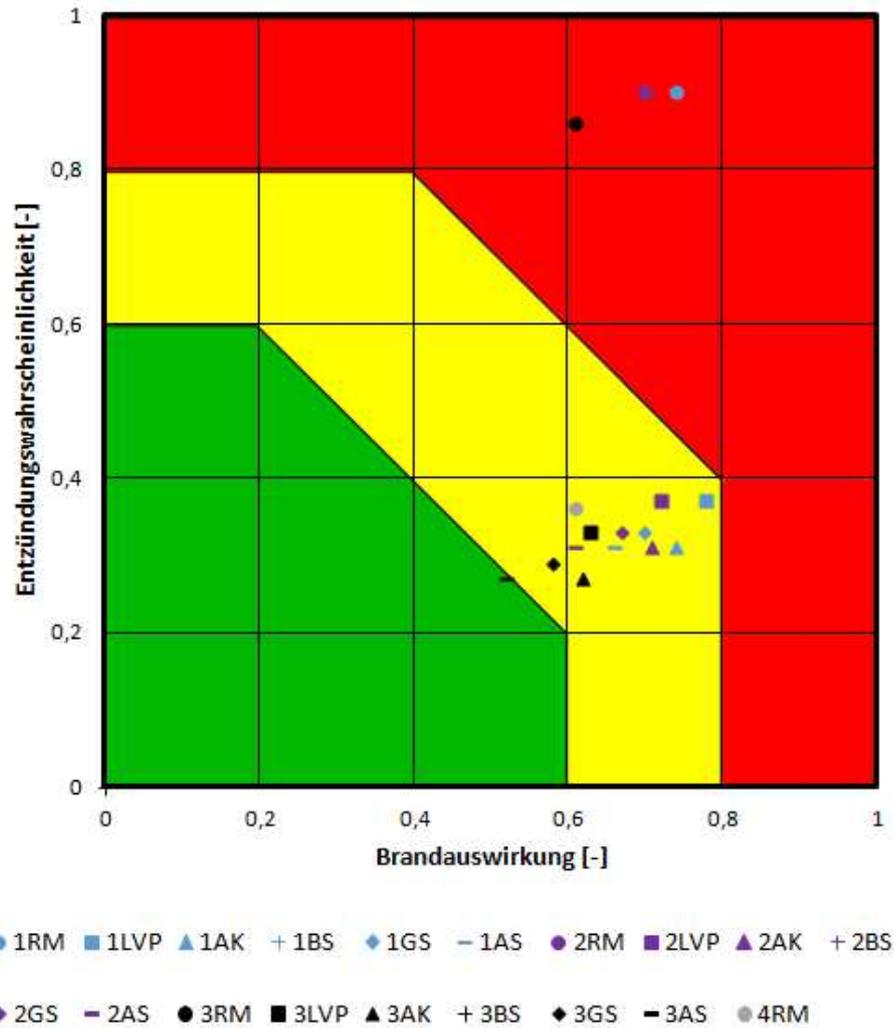


Abbildung 39: Risikomatrix der Ergebnisse aller Durchgänge der Case Study

Im ersten Durchgang ist der Restmüll eindeutig die kritischste Abfallart, da dieser sowohl viele heizwertreiche Fraktionen als auch kompostierbare und potenziell zündfähige Stoffe enthält. Die Leichtverpackung ist aufgrund des noch höheren Kunststoffanteils und des geringeren Inertstoffanteils, welcher mit einem insgesamt höheren Heizwert und Smoke Yield einhergeht als beispielsweise Lebensmittel, dem Restmüll bei der Brandauswirkung sogar noch voraus. Allerdings sind nur sehr geringe Anteile an zündfähigen Stoffen zu erwarten, wodurch die Selbstentzündung vor allem durch die hohe spezifische Oberfläche eine Gefahr darstellt. Das Altpapier hat insgesamt einen geringeren Heizwert und Smoke Yield, sowie eine geringere Neigung zur Selbstentzündung. Der Grünschnitt fällt vor allem durch den höheren Anteil an kompostierbarem Material auf, womit ein erhöhtes Risiko der Selbstentzündung besteht. Die Ergebnisse mit der geringsten Selbstentzündungsgefahr unter den Abfällen mit brennbaren Bestandteilen liefern hier die Altreifen, obwohl diese einen moderaten Heizwert und Smoke Yield aufweisen. Der Anteil an nicht brennbaren Füllstoffen

ist vergleichsweise hoch, die Porosität ist geringer als bei den anderen Abfällen. Vor allem aber sind keine kompostierbaren Stoffe vorhanden, und die Oxidationskinetik verläuft nur sehr langsam. Insgesamt am besten schneidet der Bauschutt (in Abbildung 39 links unten) ab, da keine brennbaren Stoffe enthalten sind und somit eine Entzündung gar nicht erst möglich ist.

Im zweiten Durchgang mit dem erhöhten Wassergehalt verschieben sich die Punkte in unterschiedlichen Abständen nach links in einen Bereich mit etwas geringerer Brandauswirkung. Auf die Selbstentzündungsneigung hat dies keinen Einfluss, da sowohl 34 M% als auch 52 M% hierfür kritische Werte sind.

Wird nun wie im dritten Durchgang die Luftzufuhr aus der Umgebung vollständig unterbunden, so verbessern sich die Ergebnisse im Allgemeinen. Bei den Altreifen ist sogar eine Einordnung in den grünen Bereich ersichtlich.

Der vierte Durchgang betrifft ausschließlich den Restmüll, dabei wurden alle zündfähigen Fraktionen entfernt. Übrig bleibt nur noch die Gefahr durch Selbstentzündung.

Abschließend ist festzuhalten, dass sich die Ergebnisse in diesem Fall kaum voneinander unterscheiden und immer im etwa selben Gebiet zu finden sind. Auch bei den Gegenmaßnahmen verändern sich die Werte immer um die gleichen Beträge in die gleiche Richtung. Die Methode erweist sich als wenig sensitiv gegenüber den stoffspezifischen Parametern. Die Sensitivität hängt hauptsächlich von den Gewichtungsfaktoren ab. Die Tendenzen der Entzündungswahrscheinlichkeit werden allerdings weitgehend realitätsgetreu dargestellt, da vor allem Restmüll mit deutlichem Abstand zu den anderen Fraktionen, bei denen eine Entzündung ungefähr gleich wahrscheinlich ist, zur Entzündung neigt. [2] Die Brandauswirkung stimmt ebenfalls mit den Erfahrungswerten, Beobachtungen und Einschätzungen der AbER-Vertreter überein. Auch wenn gewisse Gegenmaßnahmen das Risiko beinahe vollständig beseitigen können, wurde dies hier aus bereits erwähnten Gründen nicht angewendet. Was jedoch auch in der Realität dringend zu empfehlen wäre, ist die gleichzeitige Anwendung von mehreren Gegenmaßnahmen aus Gründen der Redundanz und Diversität. Eine für die Realität nicht zu vernachlässigende Tatsache ist, dass die Gegenmaßnahmen unter Umständen auch wieder rückgängig gemacht werden müssten, um den Abfall beispielsweise für einen nachfolgenden Behandlungsschritt vorzubereiten, da es sich um Zwischenlager handelt. Eine verbesserte Trennung der Fraktionen wäre wahrscheinlich nur von Vorteil. Der Wassergehalt könnte durch zusätzliche Befeuchtung so weit erhöht werden, dass ein Brand sehr unwahrscheinlich wird. Allerdings müsste bei einem Weitertransport entweder das zusätzliche Wasser entfernt oder mittransportiert werden.

Eine weitere Möglichkeit wäre das sogenannte Inertisieren, also die Erhöhung von nichtbrennbaren Anteilen und damit eine Herabsetzung der Kontinuität. Ein entscheidender Nachteil bei dieser Maßnahme ist, dass die zugeführten Inertstoffe jedoch die Menge des Abfalls erhöhen. Außerdem darf diese Maßnahme nicht im Widerspruch mit dem Vermischungsverbot nach § 15 (2) des AWG 2002 stehen.

Die Lagerdauer wird nicht nur aus Sicherheitsgründen begrenzt, sondern ist auch aus hygienischen Gesichtspunkten sinnvoll, da mit zunehmender Ablagerungszeit sowohl die Geruchbelästigung steigt als auch die Anzahl von unerwünschtem Ungeziefer (Fliegen, Ratten,...). In jedem Fall sollte der zuerst abgelagerte Abfall auch wieder zuerst entfernt werden („First in – first out“). Eine Möglichkeit, die Lagerdauer zu beeinflussen, ohne den Haufen abzutragen, ist das Umschichten in regelmäßigen Zeitabständen, womit erwärmte Bestandteile aus dem Inneren an die Oberfläche kommen und somit gekühlt werden.

### **6.3 Diskussion der Berechnungsmethodik**

Ein grundsätzliches Problem ist die oftmals unzureichende Kenntnis über die Zusammensetzung des gelagerten Abfalls. Deshalb bedient sich das Modell hinterlegten Werten aus Sortieranalysen und ermöglicht somit eine Abschätzung. Einzelnen Schwankungen (z. B. saisonal oder regional) bzw. extremen Fehlwürfen (z. B. nicht entleerter Benzinkanister im Restmüll) ist die Methode nicht erhaben. Der Wassergehalt wird häufig anhand von typischen Werten abgeschätzt und selten gemessen.

Die abgelagerte Masse ist im Normalfall bekannt, da jede Anlieferung gewogen wird. Die Geometrie lässt sich vergleichsweise einfach durch Abmessen ermitteln. Da dies vergleichsweise genaue Werte ergibt, setzt die Modellberechnung verstärkt auf diese.

Im Gegensatz dazu stellt die Ermittlung der spezifischen Oberfläche ein großes Problem dar, da dafür eine repräsentative Probe vermessen oder aus dem Sieb mit einer Siebkurve beschrieben werden müsste. Außerdem wird durch Abmessen der äußeren Abmessungen die innere spezifische Oberfläche von porösen Stoffen nicht erfasst.

Die Einflusskurven aus der Literatur waren nur für bestimmte Reinstoffe unter bestimmten Versuchsbedingungen verfügbar. Es ist unklar, inwiefern sich diese auf andere Stoffe und Realbedingungen umlegen lassen. Außerdem wurden Gemenge aus verschiedenen Reinstoffen mit verschiedenen Geometrien nicht untersucht, womit für ein Partikelkollektiv eine massive Unsicherheit besteht.

In der Realität ist es natürlich möglich, das Risiko eines Brandes vollkommen zu beseitigen. Da dies bewusst nicht berücksichtigt wurde, kann ein Wert von 0 nur bei nicht brennbaren Stoffen erreicht werden. Gleichzeitig ist es auch nicht möglich, einen Wert von 1 zu erreichen, da viele Einflussparameter sich gegenläufig verhalten.

Eine wichtige Tatsache, welche vor allem bei sicherheitstechnisch relevanten Kenngrößen wie TRP und Smoke Yield zum Tragen kommt ist, dass diese nur im jeweils vorliegenden Versuchsaufbau und –verfahren mit diesen Werten zustande kommen. Deswegen sollten sie nur zum Vergleich von Stoffen herangezogen und nicht als absolut angesehen werden.

Die Ermittlung der Gewichtungsfaktoren nach dem beschriebenen Verfahren ist zum Beispiel bei logarithmischen Funktionen problematisch, da diese eine ähnliche Steigung aufweisen und somit nur schwer zu unterscheiden sind. Ähnlich verhält es sich bei den Einflussparametern mit festgelegten Grenzen, hier ist die Steigung zum Teil auch von den Grenzen abhängig.

Auch das Vernachlässigen einzelner Einflüsse (z. B. Wetter) kann eine Ungenauigkeit darstellen, obwohl nicht immer sicher ist, ob es einen Einfluss gibt.

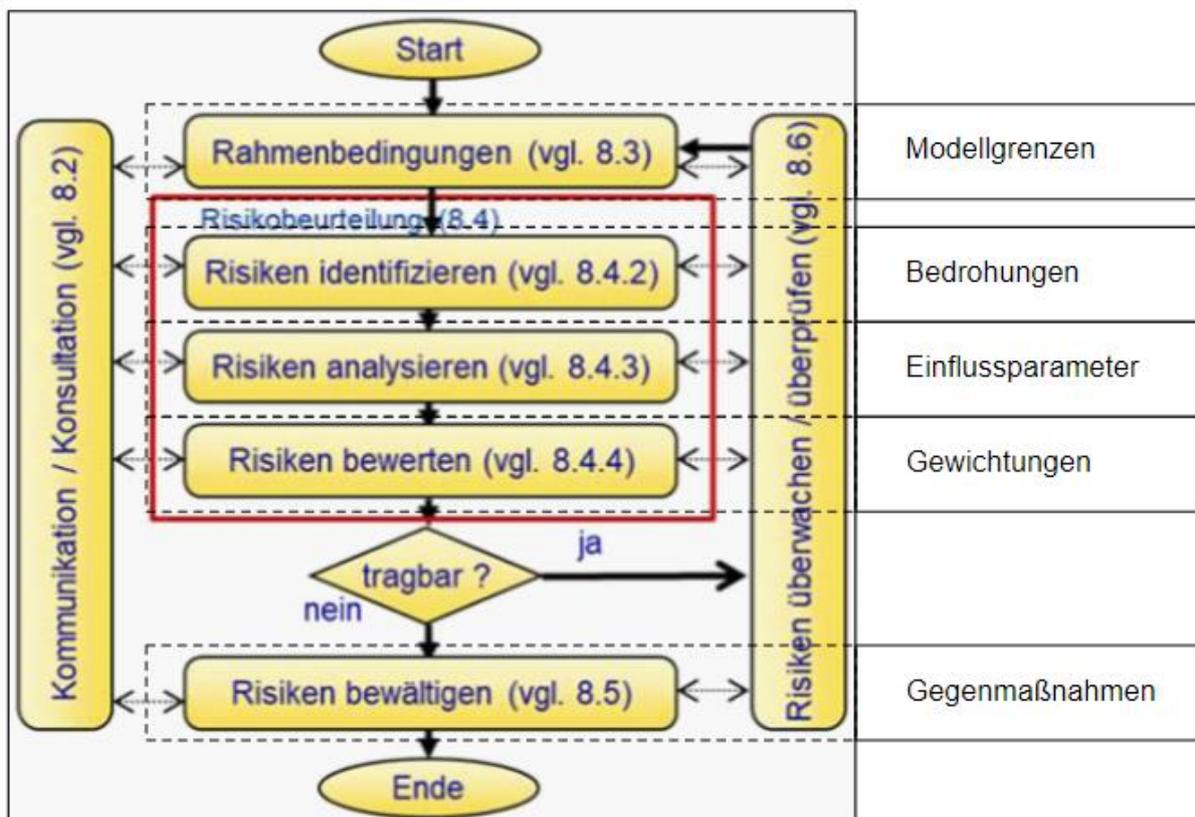


Abbildung 40: Vergleich des Risikomanagementprozesses mit der Methodenentwicklung

Da das Modell an den Risikomanagementprozess nach ÖNORM D 4900 angelehnt ist, kann jedem Schritt das entsprechende Gegenstück zugeteilt werden. Die Verwendung der Szenarioanalyse hat sich in diesem Fall als gute Voraussetzung erwiesen (siehe Abbildung 40).

## 7 Schlussfolgerung und Ausblick

Auch wenn die Methode in dieser Form sehr rudimentär erscheint, kann sie gut für eine erste Einschätzung herangezogen werden. Die einfache Anpassbarkeit ist durch die Gewichtungsfaktoren jederzeit gegeben. Das hier beschriebene Verfahren zur Ermittlung der Gewichtungsfaktoren sollte durch Erfahrungswerte ergänzt werden, um bessere Ergebnisse zu erhalten. Die intensive Erfassung, Auswertung und schließlich der Abgleich mit realen Brandereignissen sollte vorangetrieben werden.

Ein großes Problem ist das geringe Wissen über die Zusammensetzung des Abfalls, welches sich vor allem bei sehr inhomogenen Fraktionen mit vielen unterschiedlichen Eigenschaften negativ auswirkt. Selbstverständlich sind die Ergebnisse nur so gut wie die Eingabedaten, ein Ziel für die Zukunft sollte es deshalb sein, mehr über die Abfälle in Erfahrung zu bringen. Untersuchungen in der Vergangenheit, ob zum Brandverhalten oder der Selbstentzündung wurden größtenteils nur für Reinstoffe mit bekannten Geometrien und Versuchsbedingungen durchgeführt. Eine Möglichkeit zur Weiterentwicklung wäre ein besseres Verständnis für inhomogene Schüttungen und der daraus resultierende Einfluss auf die Brandauswirkung und Entzündungswahrscheinlichkeit. Denkbar wäre auch ein System aus variablen Gewichtungen, welche sich automatisch der Zusammensetzung anpassen oder eine Konkretisierung hin zu bestimmten Abfallarten.

Bei gewissen Abfallarten muss allerdings aufgrund ihrer Beschaffenheit immer ein Restrisiko mit einbezogen werden, welches sich nicht mehr beseitigen lässt.

Überdies wäre eine Verringerung der vernachlässigten Einflussparameter wahrscheinlich insofern zielführend, als dass genauere Ergebnisse erzielt werden können. Dafür müsste allerdings wieder mehr über den Abfall bekannt sein.

## Literaturverzeichnis

- [1] Bundesministerium für Klimaschutz, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (2021). *Die Bestandsaufnahme der Abfallwirtschaft in Österreich – Statusbericht 2021*. Bundesministerium für Klimaschutz, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie, Wien, Österreich
- [2] Nigl T. (2021). *Vertiefende Brandursachenermittlung zu Brandereignissen in der österreichischen Abfall-, Entsorgungs- und Ressourcenwirtschaft*. Workshop Projekt AbER innovation, Lehrstuhl für Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft, Montanuniversität Leoben, Leoben, Österreich
- [3] Nigl T., Pomberger R. (2018). *Brandgefährlicher Abfall – Über Risiken und Strategien in der Abfallwirtschaft*. Lehrstuhl für Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft, Montanuniversität Leoben, Leoben, Österreich
- [4] Austrian Standards Institute (2018). *ÖNORM ISO 31000 – Risikomanagement – Leitlinien*. Austrian Standards Institute, Wien, Österreich
- [5] Austrian Standards Institute (2021). *ÖNORM D 4900 – Risikomanagement für Organisationen und Systeme – Begriffe und Grundlagen*. Austrian Standards Institute, Wien, Österreich
- [6] National Fire Protection Association (2022). *NFPA 551 – Guide for the Evaluation of Fire Risk Assessments*. National Fire Protection Association, Quincy, Massachusetts, USA
- [7] Austrian Standards Institute (2021). *ÖNORM D 4901 – Risikomanagement für Organisationen und Systeme – Anforderungen an das Risikomanagementsystem*. Austrian Standards Institute, Wien, Österreich
- [8] Austrian Standards Institute (2021). *ÖNORM D 4902-2 – Risikomanagement für Organisationen und Systeme – Leitfaden Teil 2: Methoden der Risikobeurteilung*. Austrian Standards Institute, Wien, Österreich

- [9] Schüller J. C. H., Brinkman J.L., van Gestel P.J., van Otterloo R. W. (2005). *Methods for determining and processing probabilities – „Red Book“*. Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Den Haag, Niederlande.
- [10] Austrian Standards Institute (2021). *ÖNORM EN 12845 – Ortsfeste Brandbekämpfungsanlagen – Automatische Sprinkleranlagen – Planung, Installation und Instandhaltung*. Austrian Standards Institute, Wien, Österreich
- [11] Österreichisches Institut für Bautechnik (2019). *OIB-Richtlinie 2.1 – Brandschutz bei Betriebsbauten*. Österreichisches Institut für Bautechnik, Wien, Österreich
- [12] Österreichischer Bundesfeuerwehrverband (2010). *TRVB 100 A – Brandschutzeinrichtungen Rechnerischer Nachweis*. Österreichischer Bundesfeuerwehrverband, Wien, Österreich
- [13] Nigl T., Pomberger R. (2019). *Risikoeinstufung von Abfällen in Abhängigkeit ausgewählter Eigenschaften*. Lehrstuhl für Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft, Montanuniversität Leoben, Leoben, Österreich
- [14] Austrian Standards Institute (2021). *ÖNORM EN 15188 – Bestimmung des Selbstentzündungsverhaltens von Staubschüttungen*. Austrian Standards Institute, Wien, Österreich
- [15] Ferrero F., Malow M., Schmidt M., Krause U. (2009). *Leitfaden zur Brandvermeidung bei der Lagerung von Biomasse – Forschungsbericht 284*. Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung, Berlin, Deutschland
- [16] Austrian Standards Institute (2007). *ÖNORM F 1000 – Feuerwehrtechnik und Brandschutzwesen – Allgemeine Begriffe*. Austrian Standards Institute, Wien, Österreich
- [17] Austrian Standards Institute (2017). *ÖNORM EN ISO 13943 – Brandschutz – Vokabular*. Austrian Standards Institute, Wien, Österreich
- [18] Widetschek O. (2012). *Heiße Zahlen – eine kleine Brandschadenstatistik*. Brandschutzforum Austria, Graz, Österreich
- [19] Hurley M. J. (2016). *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*. Society of Fire Protection Engineering, Greenbelt, Maryland, USA. ISBN 978-1-4939-2564-3
- [20] Raupenstrauch H. (1997). *Gasdurchströmte, chemisch reagierende Schüttschichten*. Technische Universität Graz, Graz, Österreich
- [21] Wallner S. (2004). *Ein Modell zur Untersuchung des Selbsterwärmungsverhaltens von Schüttgütern*. Institut für Apparatebau, Mechanische Verfahrenstechnik und Feuerungstechnik, Technische Universität Graz, Graz, Österreich
- [22] Schmal D. (1987). *A model for the spontaneous heating of stored coal*. Technische Universität Delft, Delft, Niederlande

- 
- [23] Frank-Kamenetzki D. A. (1959). *Stoff- und Wärmeübertragung in der chemischen Kinetik*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH
- [24] Semenov N. N. (1959). *Some Problems of chemical Kinetics and Reactivity – Volume 2*. Institute of Chemical Physics, Academy of Sciences of the U.S.S.R.
- [25] Verein Deutscher Ingenieure (2013). *VDI-Wärmeatlas*. Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf, Deutschland. ISBN 978-3-642-19980-6
- [26] Focht D. D. (2020). *Biodegradation*. Department of Soil and Environmental Sciences, University of California, Riverside, California, USA. doi.org/10.1036/1097-8542.422025
- [27] Vert M., Doi Y., Hellwich K-H., Hess M., Hodge P., Kubisa P., Rinaudo M., Schue F. (2012). *Terminology für biorelated polymers and applications (IUPAC Recommendations 2012)*. Pure and Applied Chemistry 84. doi.org/10.1351/PAC-REC-10-12-04
- [28] Bahl S., Dolma J., Singh J. J., Sehgal S. (2021). *Biodegradation of plastics: A state of the art review*. Materials Today: Proceedings 39. doi.org/10.1016/j.matpr.2020.06.096
- [29] Kranert M. (2010). *Einführung in die Abfallwirtschaft*. Vieweg + Teubner Verlag / Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, Wiesbaden, Deutschland. ISBN 978-3-8351-0060-2
- [30] Moqbel S. (2009). *Characterizing Spontaneous Fires in Landfills*. University of Central Florida, Orlando, Florida. stars.library.ucf.edu/etd/3855
- [31] Walling E. (2021). *Novel simple approaches to modeling composting kinetics*. Journal of Environmental Chemical Engineering 9. doi.org/10.1016/j.jece.2021.105243
- [32] Lanini S., Houi D., Aguilar O., Lefebvre X. (2001). *The role of aerobic activity on refuse temperature rise: II. Experimental and numerical modelling*. Waste Management & Research 19. ISSN 0734-242X
- [33] Ratkowsky D. A., Lowry R. K., McMeekin T. A., Stokes A. N., Chandler R. E. (1983). *Model for Bacterial Culture Growth Rate Throughout the Entire Biokinetic Temperature Range*. Journal of Bacteriology 154
- [34] Lohrer C. (2005). *Einflussgrößen auf die Selbstentzündung von Schüttgütern und Stäuben – experimentelle Untersuchungen und numerische Simulationen*. Fakultät III – Prozesswissenschaften, Technische Universität Berlin, Berlin, Deutschland
- [35] Walkner R. (2005). *Untersuchung des Selbsterwärmungsverhaltens eines Lagers für aufbereiteten Substitut Brennstoff (ASB)*. Institut für Apparatebau, Mechanische Verfahrenstechnik und Feuerungstechnik, Technische Universität Graz, Graz, Österreich
- [36] Hamann C. H., Hoogestrat D., Koch R. (2017). *Grundlagen der Kinetik*. Springer Spektrum, Berlin, Deutschland. ISBN 978-3-662-49392-2

- 
- [37] Küçük A., Kadioglu Y., Gülaboglu M. S. (2003). *A study of spontaneous combustion characteristics of a Turkish lignite: particle size, moisture of coal, humidity of air*. Combustion and Flame 133. DOI 10.1016/S0010-2180(02)00553-9
- [38] Mishra D. P. (2022). *Effects of intrinsic properties, particle size and specific surface area on WOP and spontaneous combustion susceptibility of coal*. Advanced Powder Technology 33. doi.org/10.1016/j.appt.2022.103454
- [39] Haug R. T. (1993). *The practical handbook of compost engineering*. Lewis Publishers, Boca Raton, Florida. ISBN 0-87371-373-7
- [40] Babrauskas V. (2003). *Ignition Handbook*. Fire Science Publishers, Clarkdale, Arizona, USA. ISBN 978-0-9728111-3-2
- [41] Carnegie Mellon - Environmental Health & Safety (2019). *Pyrophoric Handling Procedure*, Pittsburgh, USA. <https://www.cmu.edu/ehs/Guidelines/pyrophorichandlingprocedure.pdf>, abgerufen am 22.09.2022
- [42] Portz H. (2005). *Brand- und Explosionsschutz von A-Z*. Vieweg & Sohn Verlag, Wiesbaden, Deutschland. ISBN 978-3-322-80198-2
- [43] Max D., Dinkov I. (2017). *Anwendungsbereich und –grenzen von Ingenieurverfahren bei nachweisen für die Einhaltung der Anforderungen für die Sicherstellung des abwehrenden Brandschutzes – Forschungsbericht 180*. Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe, Deutschland
- [44] Tran H. C., White R. H. (1992). *Burning rate of Solid Wood Measured in Heat Release Rate Calorimeter*. Fire and Materials 16
- [45] Drysdale D. (2011). *An Introduction to Fire Dynamics*. University of Scotland, Schottland, UK. ISBN 978-0-4703-1903-1
- [46] Vershinia K., Nyashina G., Strizhak P. (2022). *Combustion, Pyrolysis, and Gasification of Waste-Derived Fuel Slurries, Low-Grade Liquids, and High-Moisture Waste: Review*. National Research. Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russland. doi.org/10.3390/app12031039
- [47] Rothermel R. C., Anderson H. E. (1966). *Fire Spread Characteristics determined in the Laboratory*. Research Paper INT-30, US Forest Service, Ogden, Utah, USA
- [48] Neves D., Thunman H., Matos A., Tarelho L. (2011). *Characterization and prediction of biomass pyrolysis products*. University of Aveiro, Aveiro, Portugal. doi:10.1016/j.pecs.2011.01.001
- [49] Kanury A. M. (1972). *Thermal Decomposition Kinetics of Wood Pyrolysis*. Combustion and Flame 18

- 
- [50] Wang S., Ding P., Lin S., Gong J., Huang X. (2021). *Smoldering and Flaming of Disc Wood Particles under External Radiation: Autoignition and Size Effect*. *Frontiers in Mechanical Engineering* 7. doi.org/10.3389/fmech.2021.686638
- [51] Ohlemiller T. J. (1985). *Modeling of Smoldering Combustion Propagation*. *Progress in Energy and Combustion Science* 11
- [52] Sarvaranta L., Kokkala M., (1995). *Smoke Production in Fires*. VTT – Technical Research Centre of Finland, Espoo, Finland
- [53] Auburn University's College of Forestry, Wildlife and Environment. *Smoke Production*, [https://www.auburn.edu/academic/forestry\\_wildlife/fire/smoke\\_guide/smoke\\_production.htm](https://www.auburn.edu/academic/forestry_wildlife/fire/smoke_guide/smoke_production.htm) abgerufen am 27.1.2022
- [54] Liu Z., Murphy J. P., Maghirang R., Devlin D. (2016). *Health and Environment Impacts of Smoke from Vegetation Fires: A Review*. *Journal of Environmental Protection* 7. doi.org/10.4236/jep.2016.712148
- [55] Draxler J., Wolf-Zöllner V., (2020). *Skriptum zur Vorlesung Thermische Verfahrenstechnik*. Lehrstuhl für Verfahrenstechnik des industriellen Umweltschutzes, Montanuniversität Leoben, Leoben, Österreich
- [56] Artner F. (2022). *Untersuchung von Brandereignissen in der österreichischen Abfall-, Entsorgungs- und Recyclingwirtschaft im Zuge eines langfristigen Monitorings*. Lehrstuhl für Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft, Montanuniversität Leoben, Leoben, Österreich
- [57] Austrian Standards Institute (2004). *ÖNORM EN 2 – Brandklassen*. Austrian Standards Institute, Wien, Österreich
- [58] Hertz H. (1881). *Über die Berührung fester elastischer Körper*. *Journal für die reine und angewandte Mathematik* 92
- [59] TBU (2019). *Restmüllanalysen im Land Steiermark 2018/2019*. Technisches Büro für Umweltschutz GmbH, Innsbruck, Tirol, Österreich
- [60] Forest Products Laboratory (2010). *Wood Handbook*. USDA Forest Service, Madison, Wisconsin, USA.
- [61] Horisawa S., Tamai Y., Sakuma Y., Doi S., Terazawa M. (2000). *Effect of moisture of a wood matrix on a small-scale biodegradation system for organic solid waste*. The Japan Wood Research Society, Tokio, Japan
- [62] Österreichischer Bundesfeuerwehrverband (1981). *TRVB C 141 81 - Lagerung fester, brennbarer Stoffe im Freien*. Österreichischer Bundesfeuerwehrverband, Wien, Österreich.
- [63] McAllister S. (2019). *The Role of Fuel Bed Geometry and Wind on the Burning Rate of Porous Fuels*. *Frontiers in Mechanical Engineering* 5. doi.org/10.3389/fmech.2019.00011

- 
- [64] Chu T., Zhu G., Gao Y., Wang P., Chai G., Wang Z. (2019). *Combined effects of width and moisture content on upward flame spread over cotton fabrics*. Case Studies in Thermal Engineering 15. doi.org/10.1016/j.csite.2019.1005145
- [65] Anderson H. E. (1969). *Heat Transfer and Fire Spread*. Research Paper INT-69, US Forest Service, Ogden, Utah, USA
- [66] Österreichisches Institut für Bautechnik (2019). *OIB-Richtlinie 2*. Österreichisches Institut für Bautechnik, Wien, Österreich
- [67] Bundesministerium für Arbeit, Gesundheit und Soziales (2022). *Arbeitsstättenverordnung – konsolidierte Fassung*. Bundesministerium für Arbeit, Gesundheit und Soziales, Wien, Österreich
- [68] Butler K. M., Mulholland G. W. (2004). *Generation and Transport of Smoke Components*. Fire Technology 40
- [69] Chomanee J., Tekasakul S., Tekasakul P., Furuuchi M., Otani Y. (2009). *Effects of Moisture Content and Burning Period on Concentration of Smoke Particles and Particle-Bound Polycyclic Aromatic Hydrocarbons from Rubber-Wood Combustion*. Aerosol and Air Quality Research 9. DOI 10.4209/aaqr.2009.02.0013
- [70] Barboni T., Leonelli L., Santoni P-A., Tihay-Felicelli V. (2017). *Influence of particle size on the heat release rate and smoke opacity during the burning of dead Cistus leaves and twigs*. Journal of Fire Sciences. DOI 10.1177/0734904117709964
- [71] Cai N., Chow W. K., (2012). *Wind Effect on Spread of Fire and Smoke*. Department of Building Services, The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong, China
- [72] Siebertz K., van Bebbber D., Hochkirchen T. (2010). *Statistische Versuchsplanung*. Springer Heidelberg Dordrecht London New York. ISBN 978-3-642-05492-1
- [73] Mechanical Engineer`s Information Hub - MEADinfo. FMEA Template for AIAG and Six Sigma, <https://www.meadinfo.org/2009/11/download-fmea-template-aiag-six-sigma.html>, abgerufen am 22.09.2022
- [74] Hafellner M. P. (2016). *Automotives Projekt- und Risikomanagement am Beispiel der Elektromobilität*. Lehrstuhl für Wirtschafts- und Betriebswissenschaften, Montanuniversität Leoben, Leoben, Österreich
- [75] Austrian Standards Institute (2016). *ÖNORM C 4005 - Holzhackgut und Schredderholz für die energetische Verwertung in Anlagen mit einer Nenn-Wärmeleistung über 500 kW - Anforderungen und Prüfbestimmungen*. Austrian Standards Institute, Wien, Österreich
- [76] Steiner M. (2015). *ÖNORM C 4005 – Holzhackgut und Schredderholz für die energetische Verwertung*. Holzforschung Austria, Wien, Österreich

- [77] Health and Safety Executive (2001). *Reducing Risks, Protecting People*. Norwich, UK. ISBN 0 7176 2151 0
- [78] Österreichisches Institut für Bautechnik (2019). *Leitfaden OBI-Richtlinie 2.1 – Abweichungen im Brandschutz und Brandschutzkonzepte*. Österreichisches Institut für Bautechnik, Wien, Österreich
- [79] Österreichischer Bundesfeuerwehrverband (2021). *TRVB 137 F – Löschwasserbedarf*. Österreichischer Bundesfeuerwehrverband, Wien, Österreich
- [80] Österreichischer Bundesfeuerwehrverband (1996). *Löschmittelbedarf für Betriebsanlagen*. Österreichischer Bundesfeuerwehrverband, Wien, Österreich
- [81] Kaltschmitt et al. (2016). *Energie aus Biomasse*. Springer Berlin Heidelberg, Deutschland. ISBN 978-3-662-47437-2
- [82] Ray et al. (2020). Factors influencing the persistence of reindeer lichens (*Cladonia* subgenus *Cladina*) within frequent-fire environments of the Mid-Atlantic Coastal Plain, USA. *Fire Ecology* 16. DOI 10.1186/s42408-019-0063-7
- [83] Will J. (2005). *Entwicklung eines sauerstoffkalorimetrischen Verfahrens zur Bestimmung von Brandparametern bei unterschiedlich ventilerten Bränden*. Technische Universität Carolo-Wilhelmina, Braunschweig, Deutschland
- [84] Peng F., Zhang X., Zhai C., Li J. (2021). *Effect of ceiling height on flame spread over horizontal poly (methyl methacrylate) slabs in corridor*. Changsha University of Science and Technology, Changsha, China. DOI 10/1016/j.csite.2021.101576

# Anhang I – informativ

## Liste von bekannten Stoffen mit pyrophorem Verhalten [41]

### (a) Pyrophoric alkyl metals and derivatives

#### Groups

Dialkylzincs  
Diplumbanes  
Trialkylaluminiums  
Trialkylbismuths

#### Compounds

Bis-dimethylstibinyl oxide  
Bis(dimethylthallium) acetylide  
Butyllithium  
Diethylberyllium

Diethylcadmium  
Diethylmagnesium  
Diethylzinc  
Diisopropylberyllium  
Dimethylberyllium  
Dimethylbismuth chloride  
Dimethylcadmium  
Dimethylmagnesium  
Dimethylmercury  
Dimethyl-phenylethynylthallium  
Dimethyl-1-propynylthallium  
Dimethylzinc  
Ethoxydiethylaluminium  
Methylbismuth oxide  
Methylcopper  
Methylithium  
Methylpotassium  
Methylsilver  
Methylsodium  
Poly (methylenemagnesium)  
Propylcopper  
Tetramethyldistibine  
Tetramethyllead  
Triethylantimony  
Triethyl bismuth  
Triethylgallium  
Trimethylantimony  
Trimethylgallium  
Trimethylthallium  
Trivinylbismuth  
Vinylithium

#### (b) Pyrophoric carbonyl metals

Carbonyllithium  
Carbonylpotassium  
Carboylsodium  
Dodecacarbonyldivanadium

Dodecacarbonyltetracobalt  
Dodecacarbonyltriiron  
Hexacarbonylchromium  
Hexacarbonylmolybdenum  
Hexacarbonylungsten  
Nonacarbonyldiiron

Octacarbonyldicobalt  
Pentacarbonyliron  
Tetracarbonylnickel

#### (c) Pyrophoric metals (findy divided stae)

|           |                   |
|-----------|-------------------|
| Caesium   | Rubidium          |
| Calcium   | Sodium            |
| Cerium    | Tantalum          |
| Chromium  | Thorium           |
| Cobalt    | Titanium          |
| Hafnium   | Uranium           |
| Iridium   | Zirconium         |
| Iron      |                   |
| Lead      | Alloys            |
| Lithium   | Aluminium-Mercury |
| Manganese | Bismuth-Plutonium |
| Nickel    | Copper-Zirconium  |
| Palladium | Nickel-Titanium   |
| Platinum  |                   |
| Plutonium |                   |
| Potassium |                   |

#### (d) Pyrophoric metal sulphides

(Ammonium sulphide)  
Barium sulphide  
Calcium sulphide  
Chromium (II) sulphide  
Copper (II) sulphide  
Diantimony trisulphide  
Dibismuth trisulphide  
Dicaesium selenide  
Dicerium trisulphide  
Digold trisulphide  
Europium (II) sulphide  
Germanium (II) sulphide  
Iron disulphide  
Iron (II) sulphide  
Manganese (II) sulphide  
Mercury (II) sulphide  
Molybdenum (IV) sulphide  
Potassium sulphide  
Rhenium (VII) sulphide

Silver sulphide  
Sodium disulphide  
Sodium polysulphide  
Sodium sulphide  
Tin (II) sulphide  
Tin (IV) sulphide  
Titanium (IV) sulphide  
Uranium (IV) sulphide

#### (e) Pyrophoric alkyl non-metals

Bis-(dibutylborino) acetylene  
Bis-dimethylarsinyl oxide  
Bis-dimethylarsinyl sulphide  
Bis-trimethylsilyl oxide  
Dibutyl-3-methyl-3-buten-1-Ynborane  
Diethoxydimethylsilane  
Diethylmethylphosphine  
Ethylidimethylphosphine  
Tetraethylarsine  
Tetramethyldiarsine  
Tetramethylsilane  
Tribenzylarsine  
mixo-Tributylborane  
Tributylphosphine  
Triethylarsine  
Triethylborane  
Triethylphosphine  
Triisopropylphosphine  
Trimethylarsine  
Trimethylborane  
Trimethylphosphine

#### (f) Pyrophoric alkyl non-metal halides

Butyldichloroborane  
Dichlorodiethylsilane  
Dichlorodimethylsilane  
Dichloro(ethyl)silane  
Dichloro(methyl)silane  
Iododimethylarsine  
Trichloro(ethyl)silane  
Trichloro(methyl)silane  
Trichloro(vinyl)silane

#### (g) Pyrophoric alkyl non-metal hydrides

Diethylarsine  
Diethylphosphine  
Dimethylarsine  
1,1-Dimethyldiborane  
1,2-Dimethyldiborane  
Dimethylphosphine  
Ethylphosphine  
Methylphosphine  
Methylsilane

**Auflistung von Methoden des Risikomanagements mit Erklärung [8]**

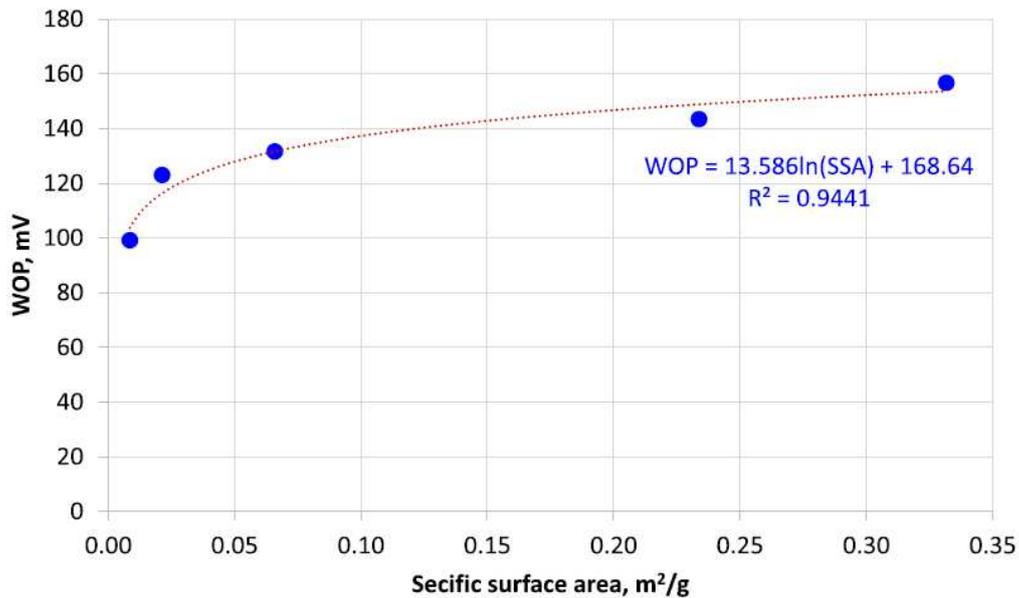
| Methode  | Risikoidentifikation | Risikobewertung |                    |            | Risikobewältigung |
|--|----------------------|-----------------|--------------------|------------|-------------------|
|  |                      | Auswirkungen    | Wahrscheinlichkeit | Risikohöhe |                   |
| Brainstorming                                      | +++                  | +               | +                  | -          | +                 |
| World Café   | +++                  | +               | +                  | -          | -                 |
| Delphi-Technik                                     | ++                   | ++              | ++                 | -          | ++                |
| Ursache-Wirkungs-Diagramm                          | ++                   | +               | +                  | -          | +++               |
| London-Protokoll                                   | +++                  | +               | -                  | -          | +++               |
| Fehlerbaum- und Ereignisbaumanalyse (FTA/ETA)      | -                    | ++              | +++                | +          | +                 |
| Szenarioanalyse                                    | +++                  | +++             | ++                 | ++         | +++               |
| CIRS (Critical Incident Reporting System)          | +++                  | -               | +                  | -          | ++                |
| Horizon Scanning                                   | +++                  | +               | -                  | ++         | -                 |
| FMEA (Failure Mode and Effects Analysis)           | +++                  | ++              | ++                 | +          | +++               |
| Gefährdungsanalyse                                 | ++                   | +++             | ++                 | ++         | +++               |
| HAZOP-Analyse (Hazard and Operability Study)       | +++                  | +++             | ++                 | +          | +++               |
| HACCP (Hazard Analysis and Critical Control Point) | ++                   | ++              | -                  | -          | +++               |
| Statistische Grundlagen                            | -                    | ++              | +++                | ++         | -                 |
| Quantitative Analysen                              | -                    | ++              | +++                | ++         | -                 |

# Anhang II – Diagramme

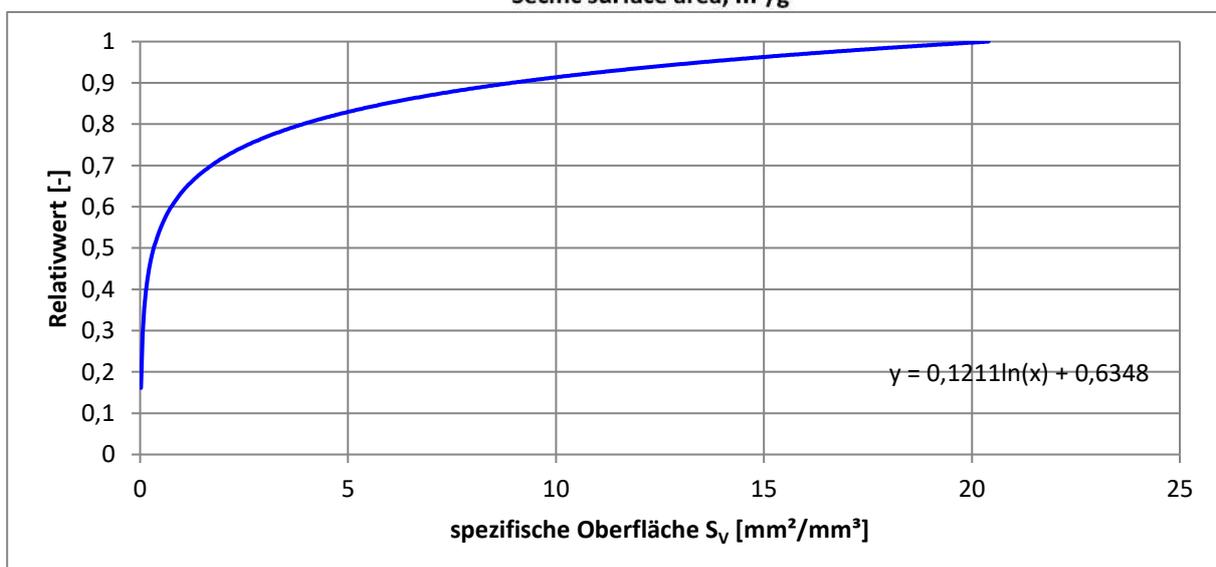
Die Diagramme sind folgendermaßen gereiht: Zuerst die Einflusskurven aus der Literatur, dann die Relativwertkurven, schließlich die normierten Einflusskurven mit Steigung. Blaue Datenreihen betreffen die Selbstentzündung, rote Datenreihen die Brandwärme und gelbe Datenreihen den Brandrauch.

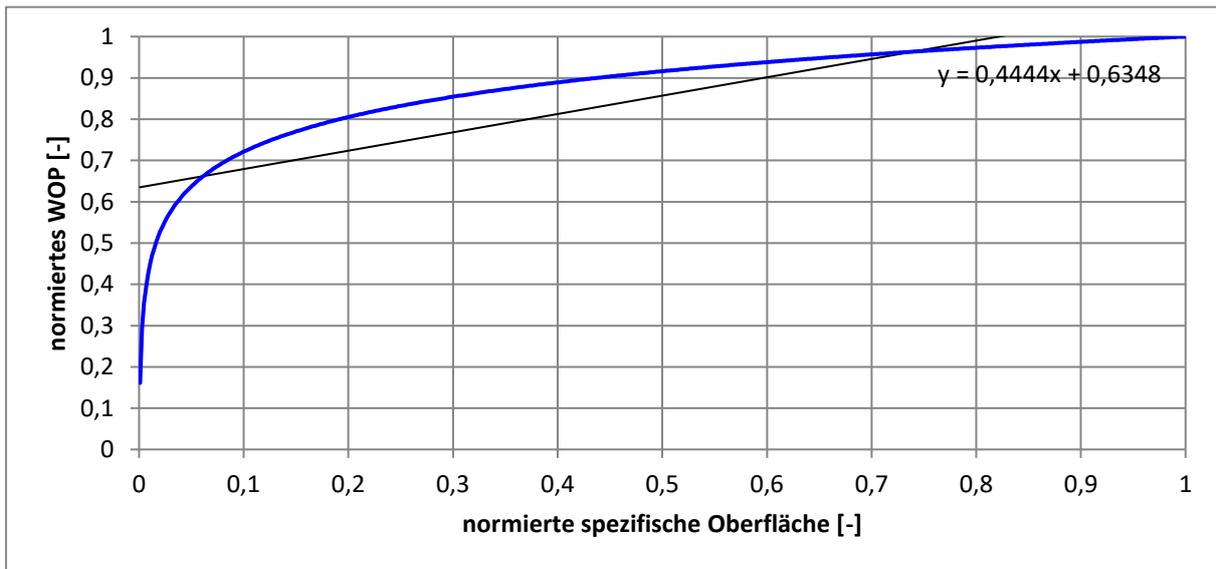
## Selbstentzündung

Spezifische Oberfläche

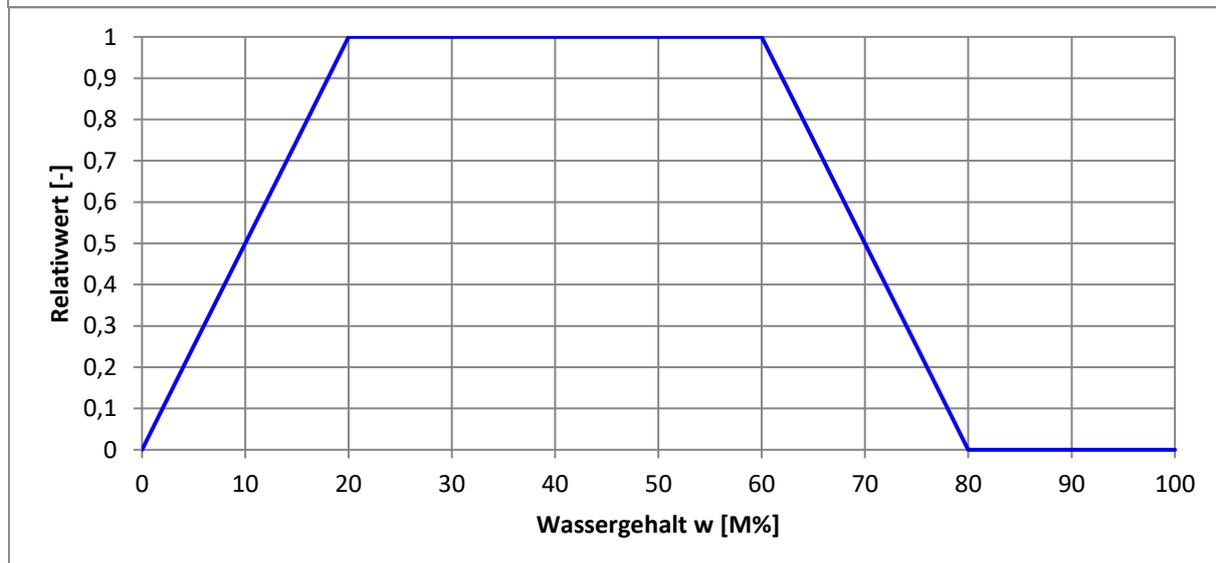
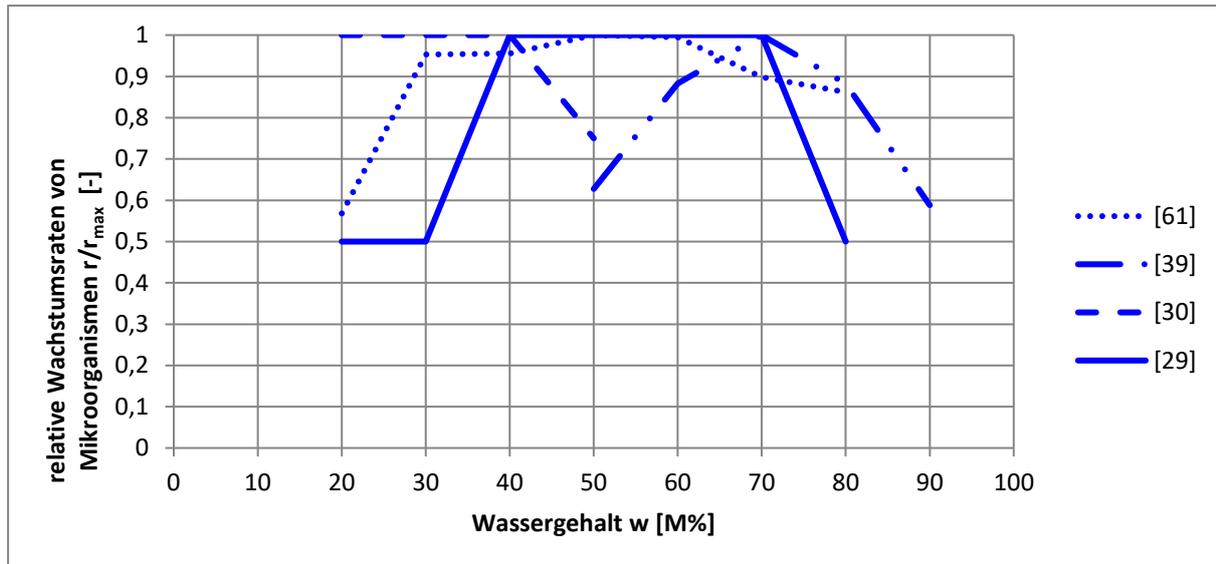


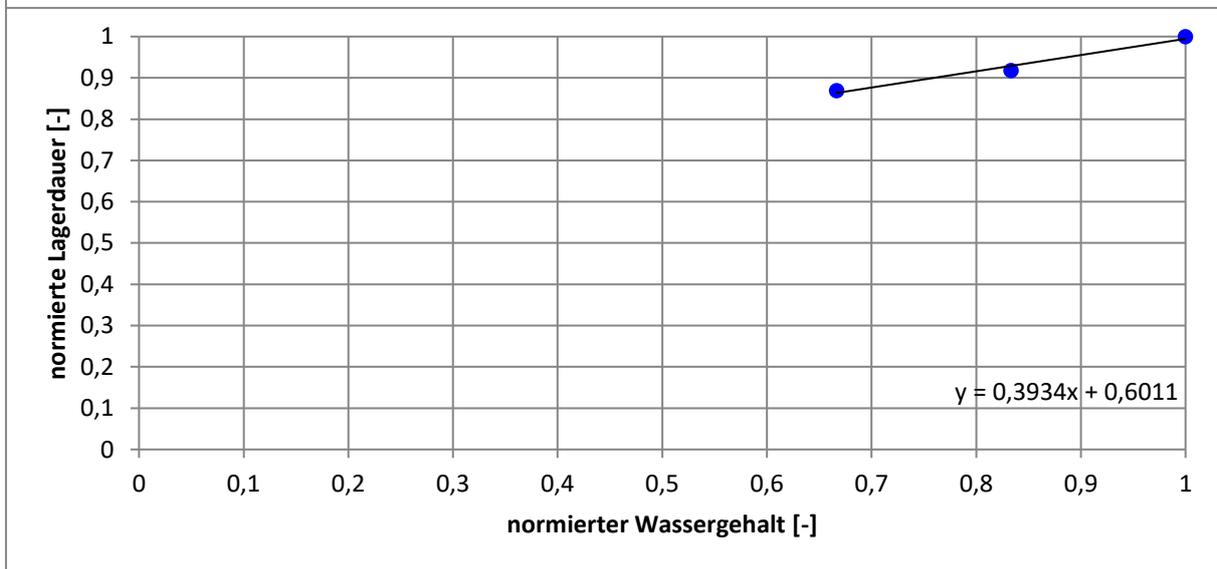
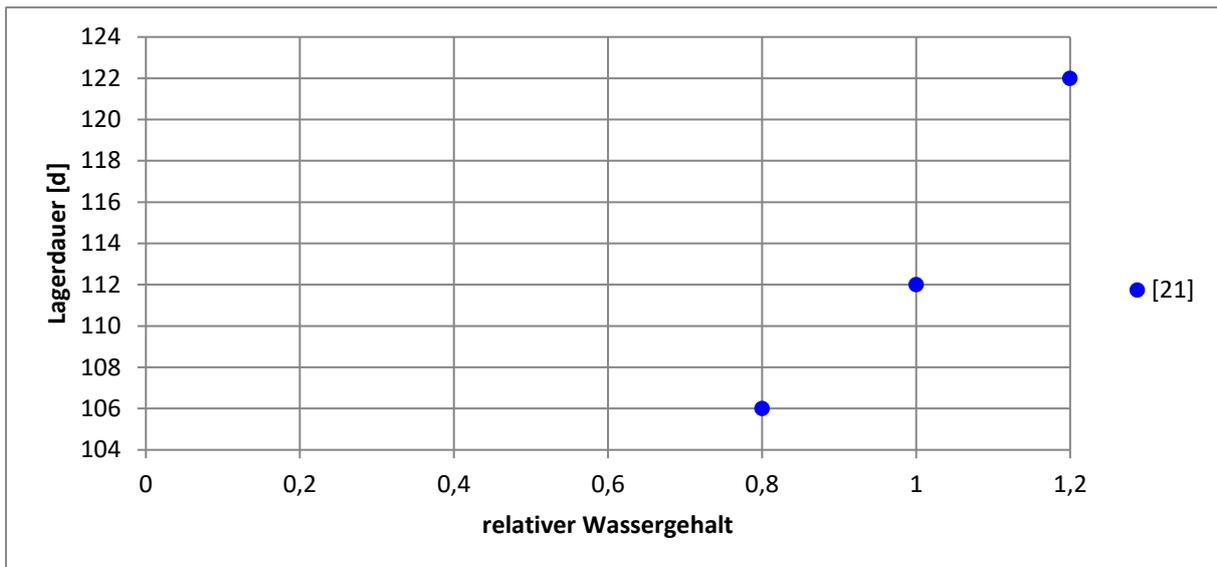
[38]



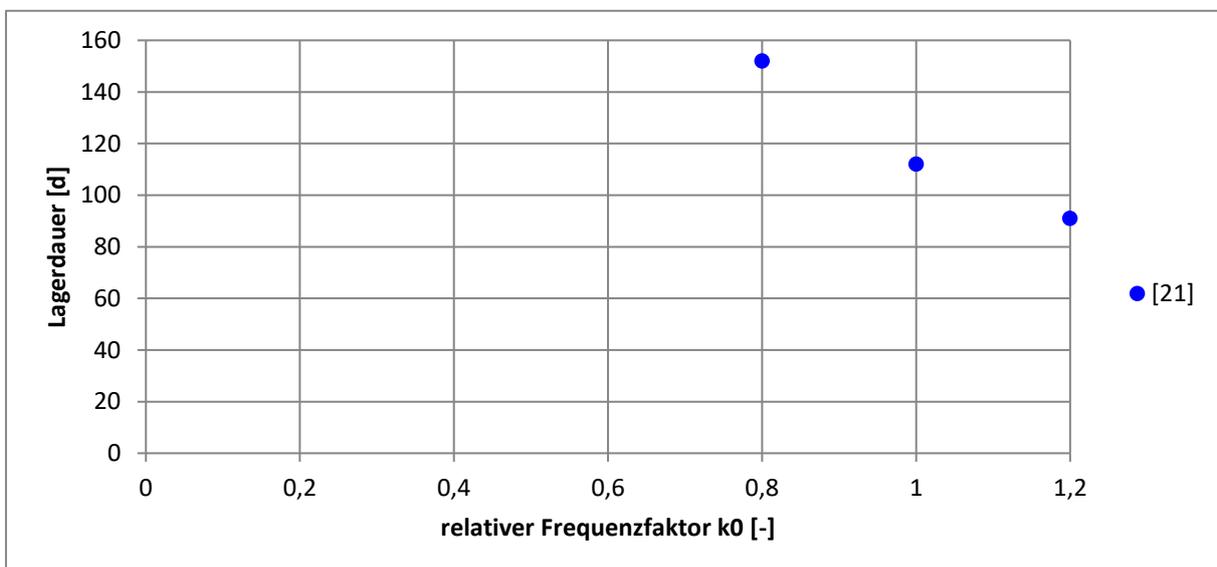


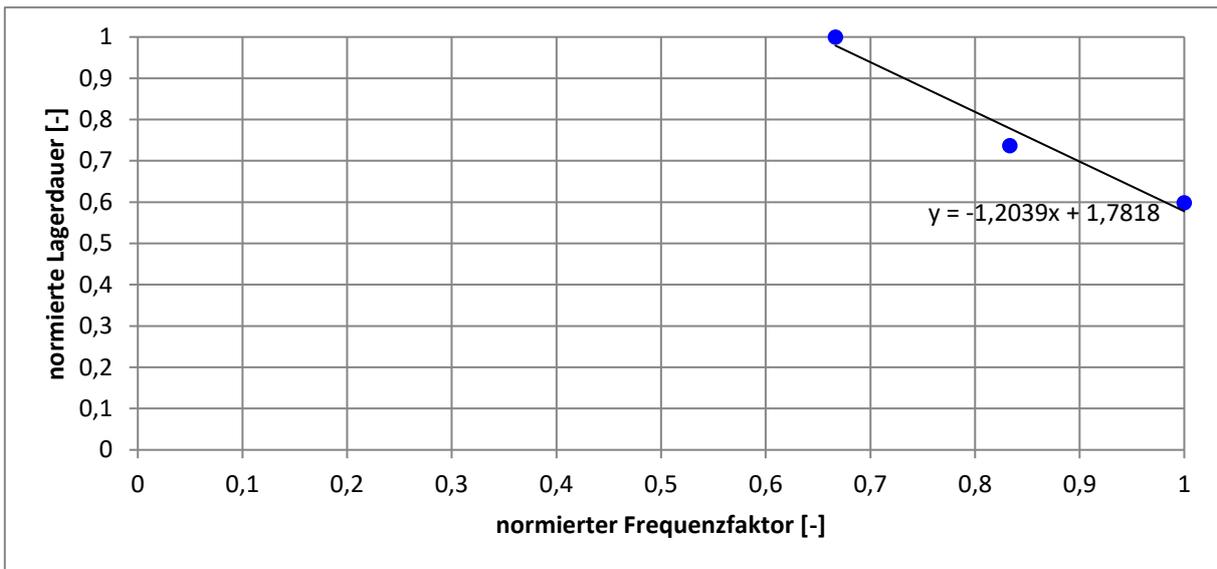
Wassergehalt



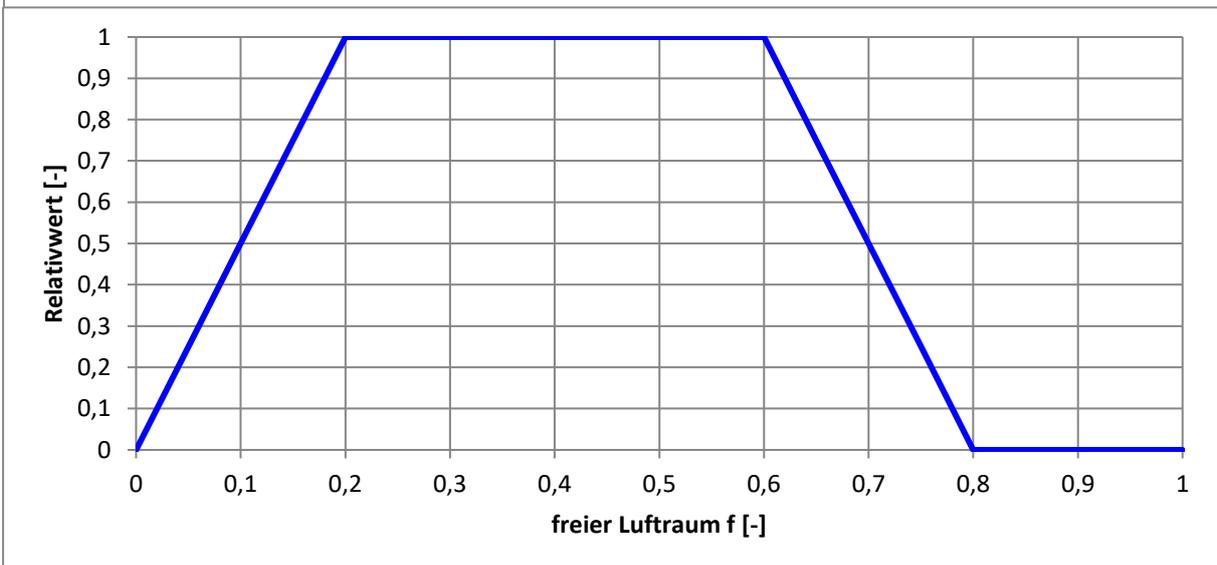
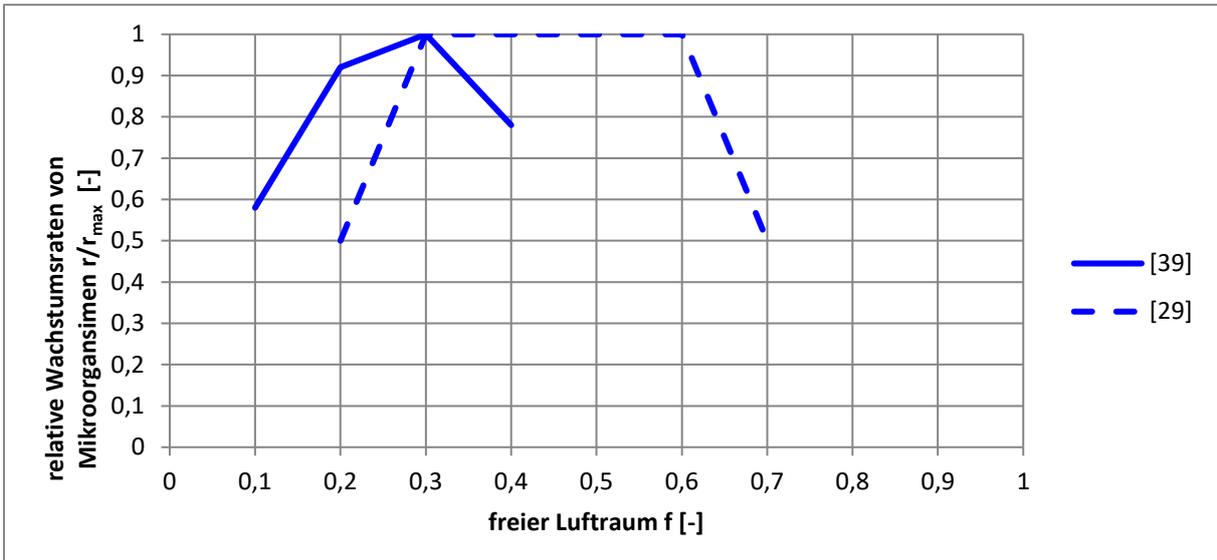


Frequenzfaktor

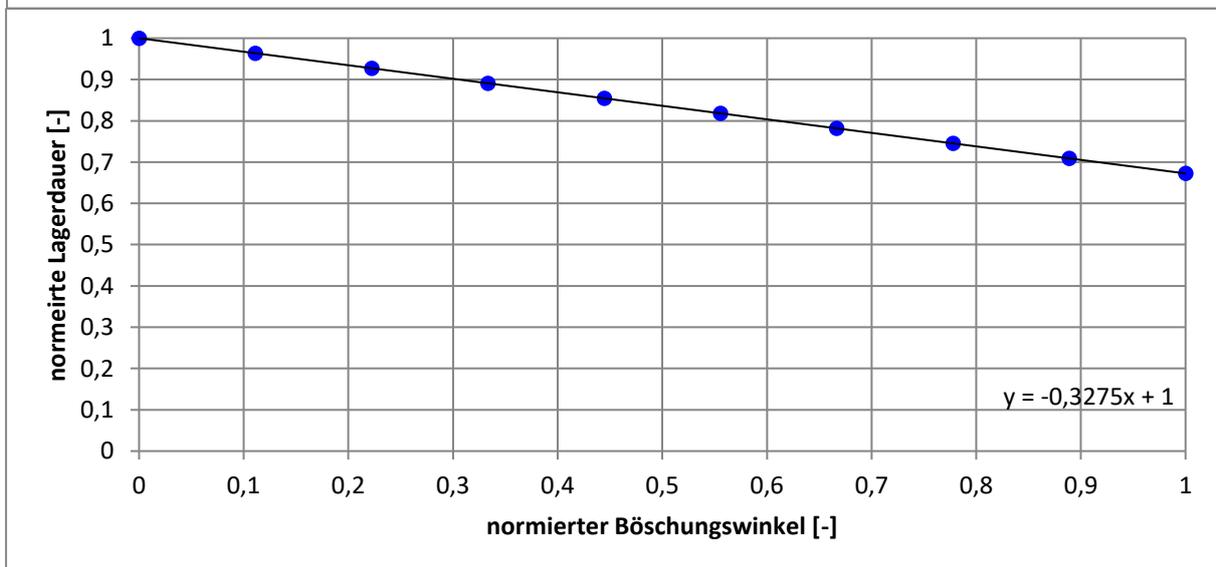
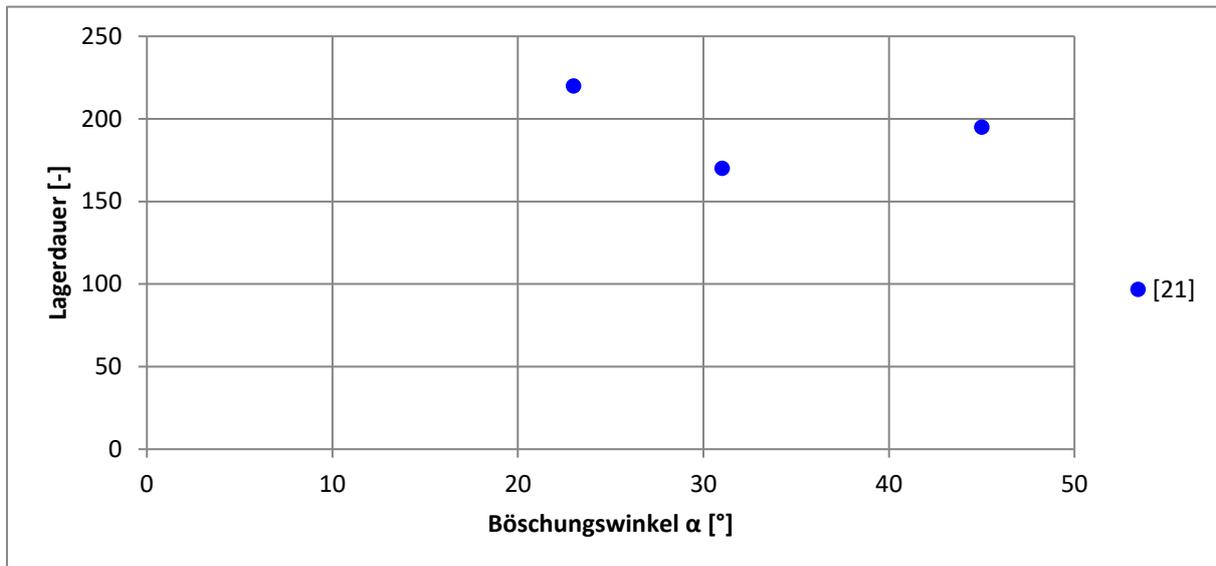




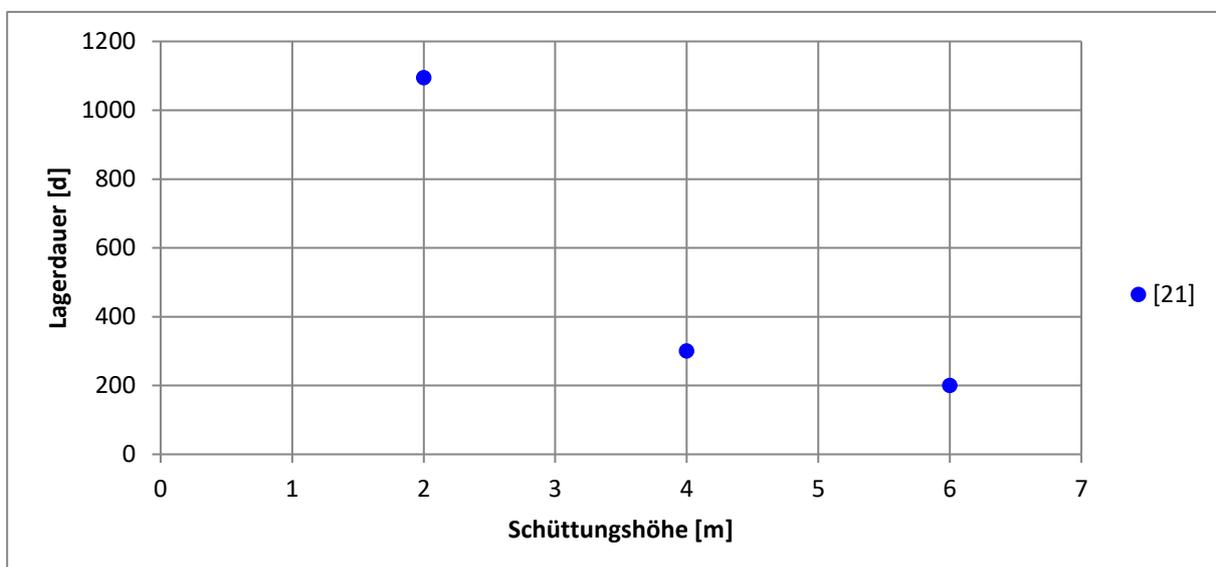
freier Luftraum

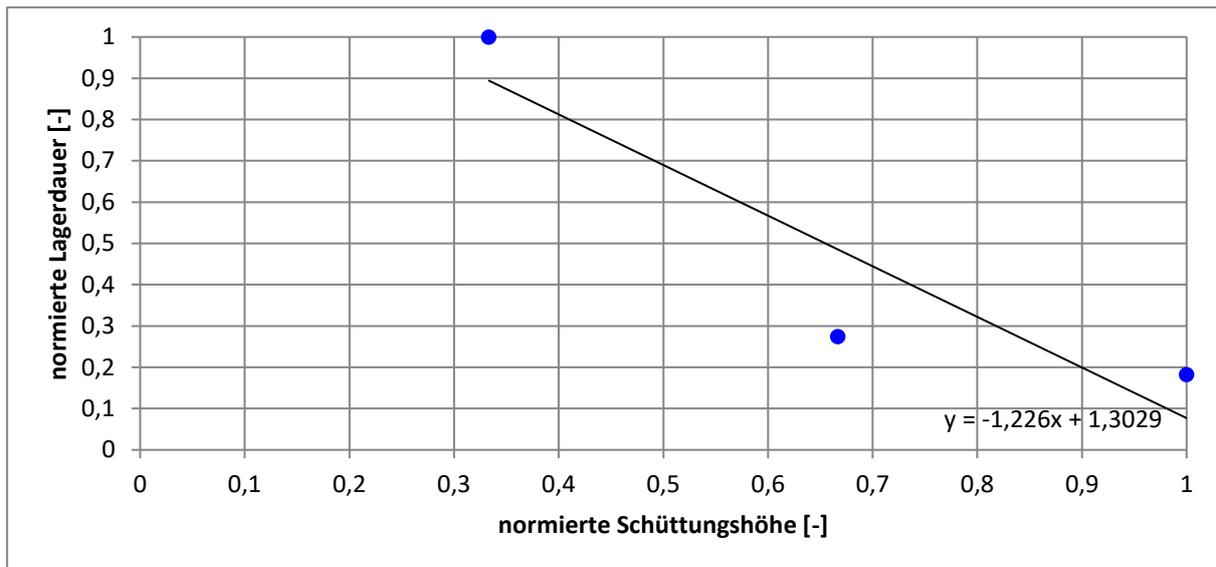


### Böschungswinkel

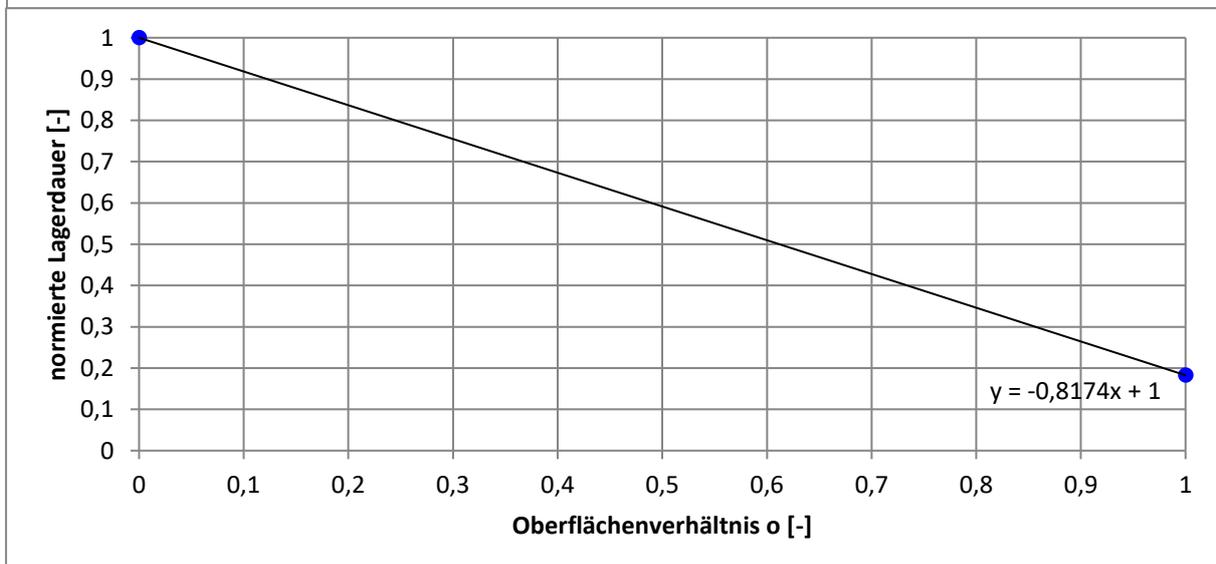
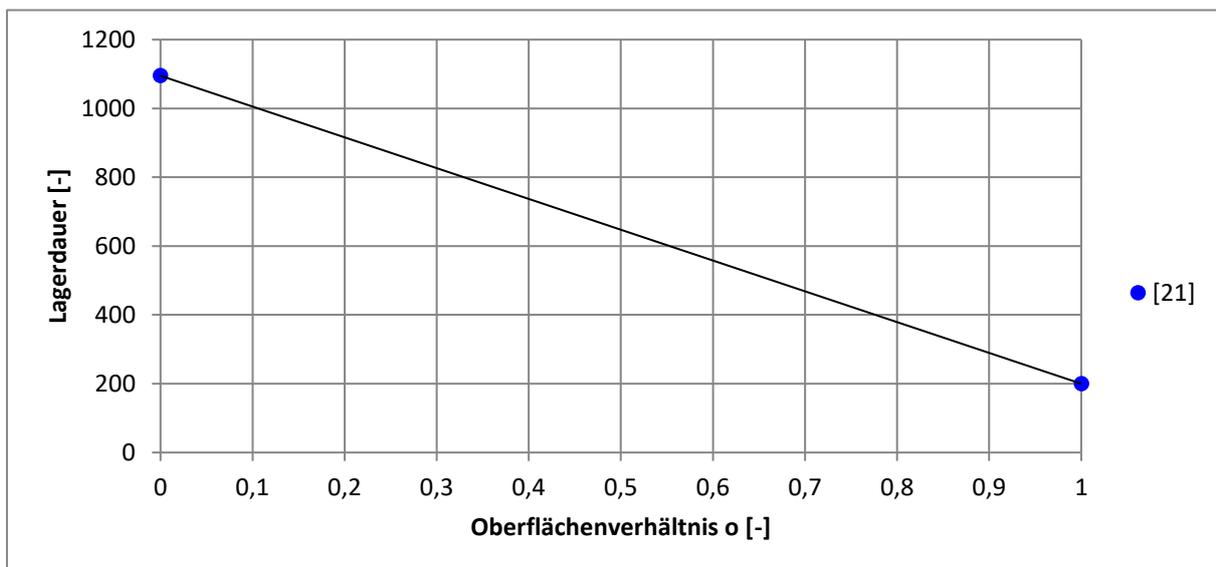


### Schüttungshöhe

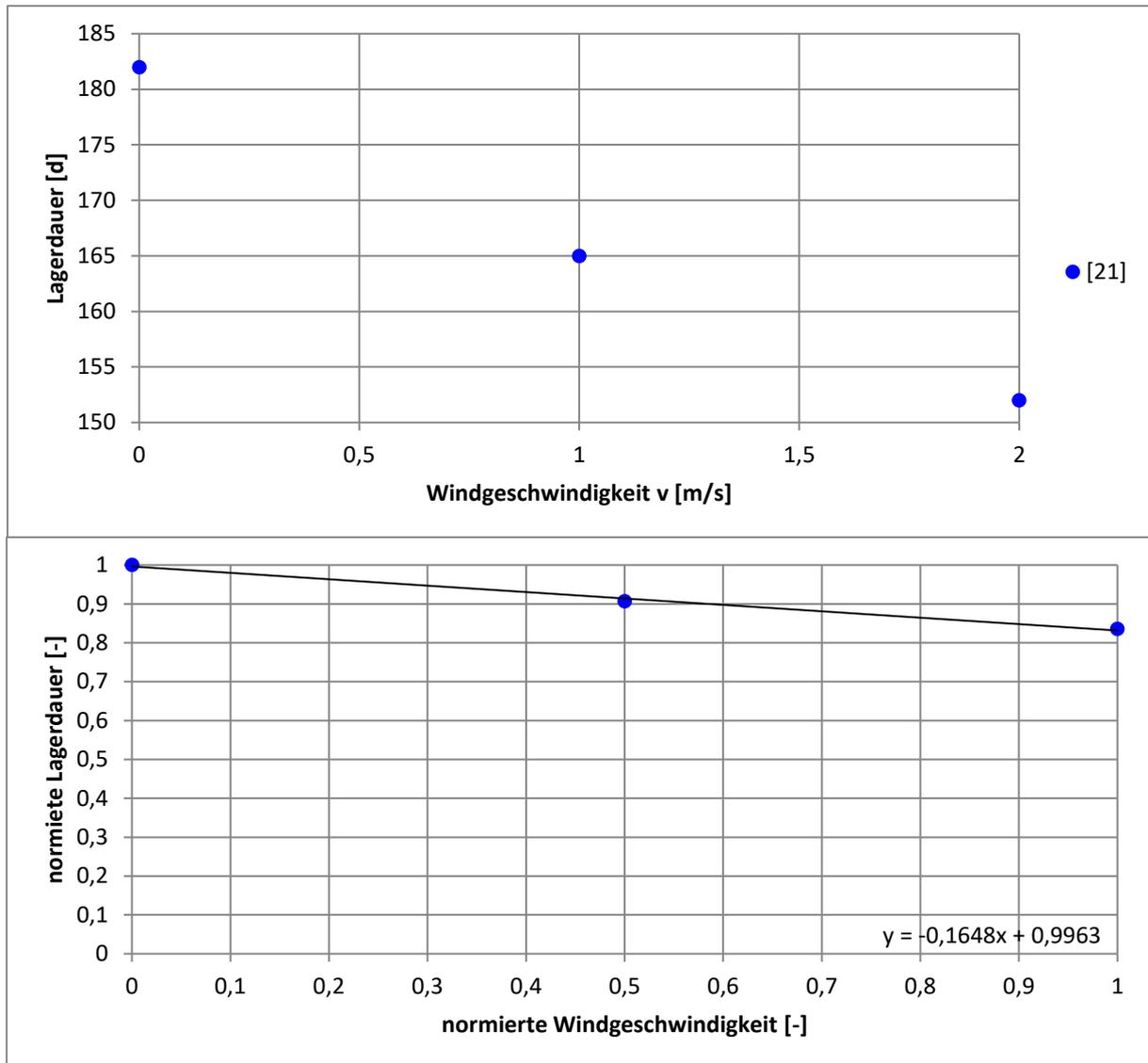




Oberflächenverhältnis

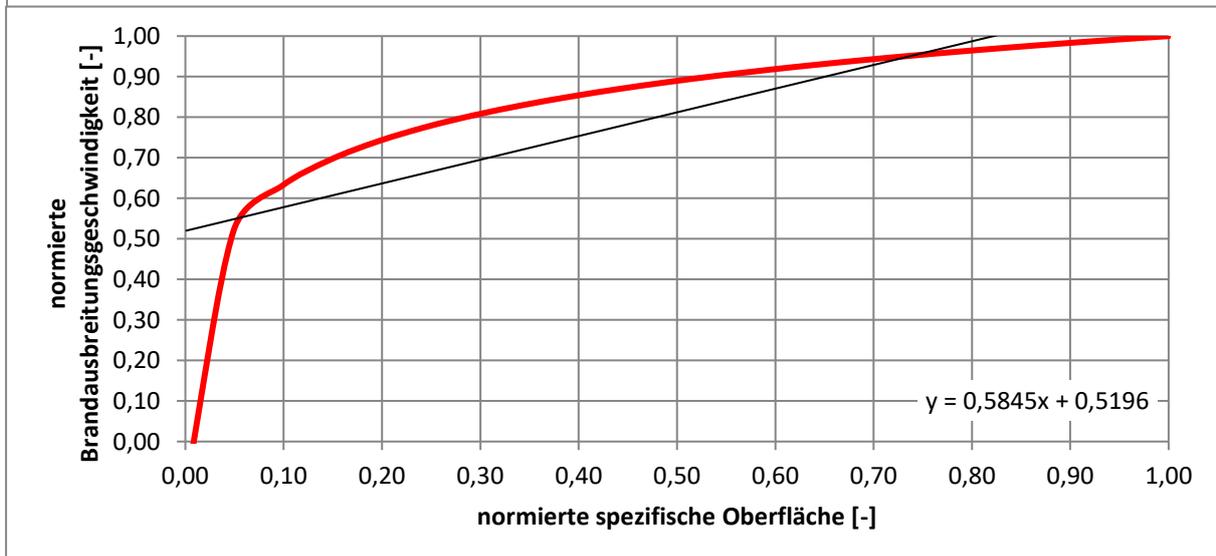
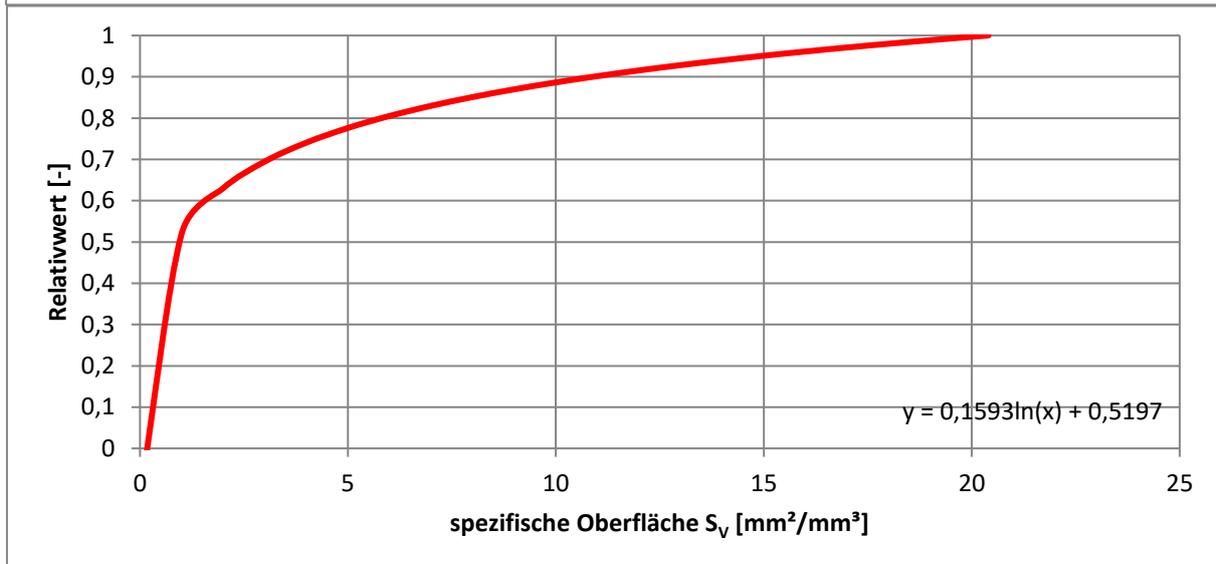
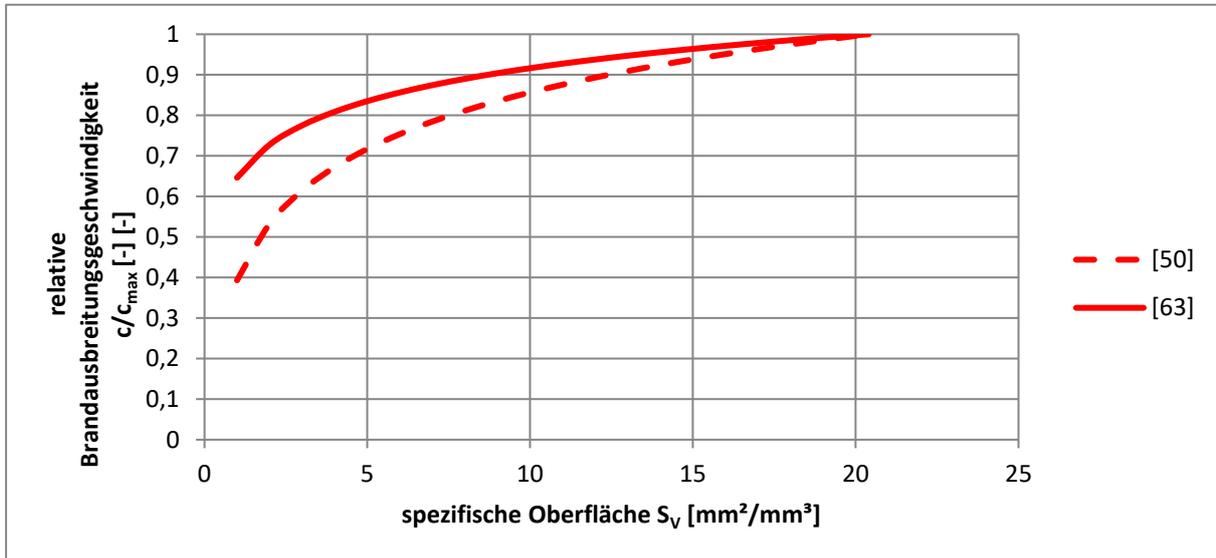


Windeinfluss

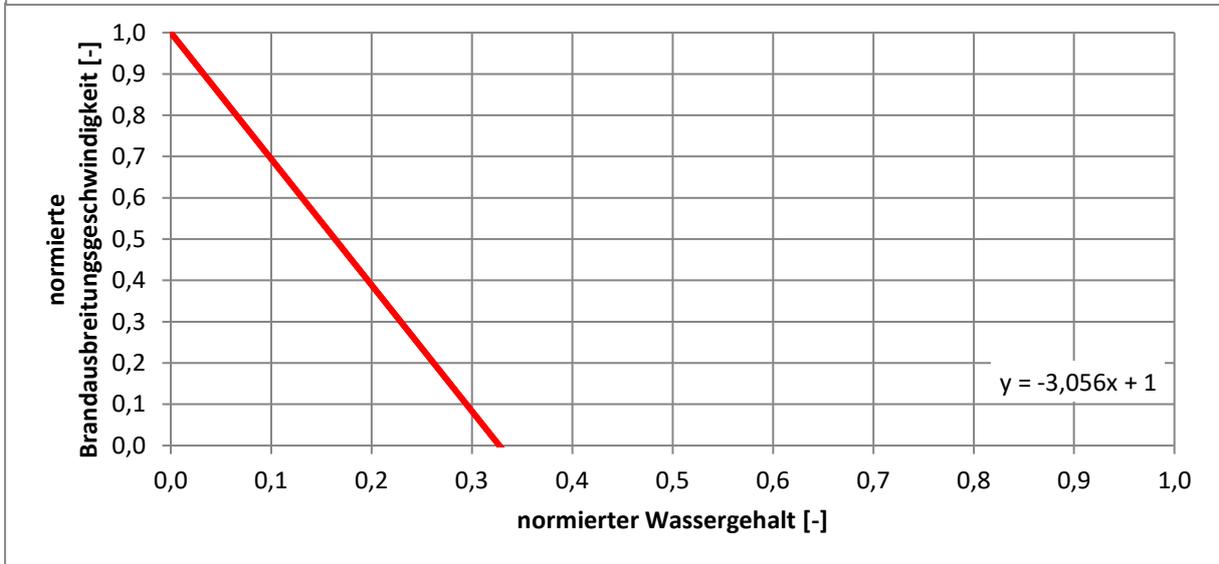
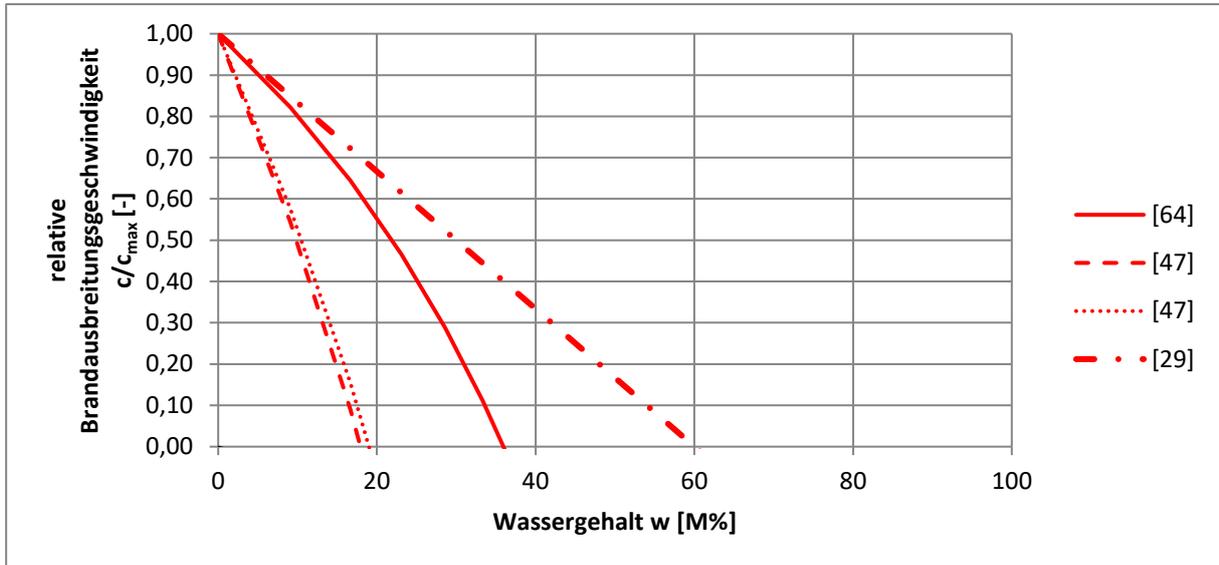


### Brandwärme

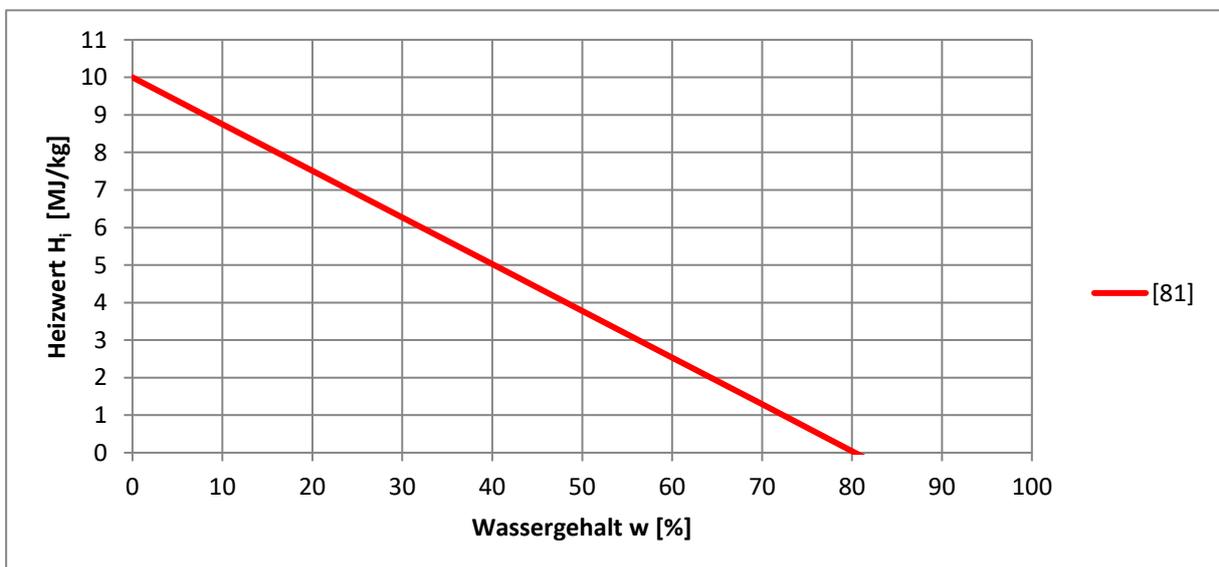
#### Spezifische Oberfläche

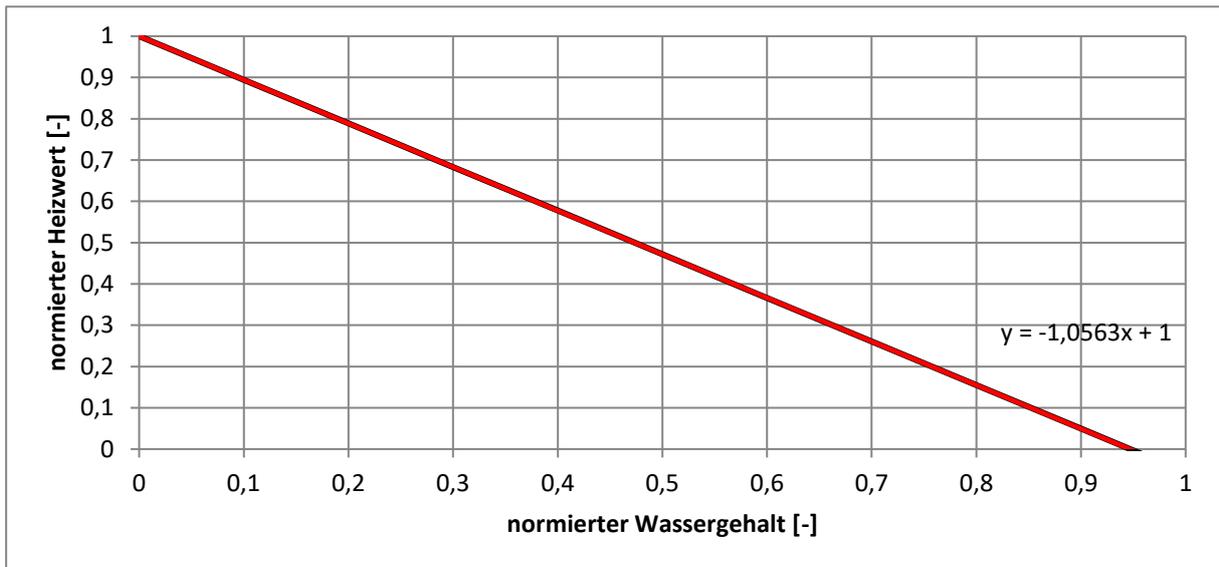


Wassergehalt

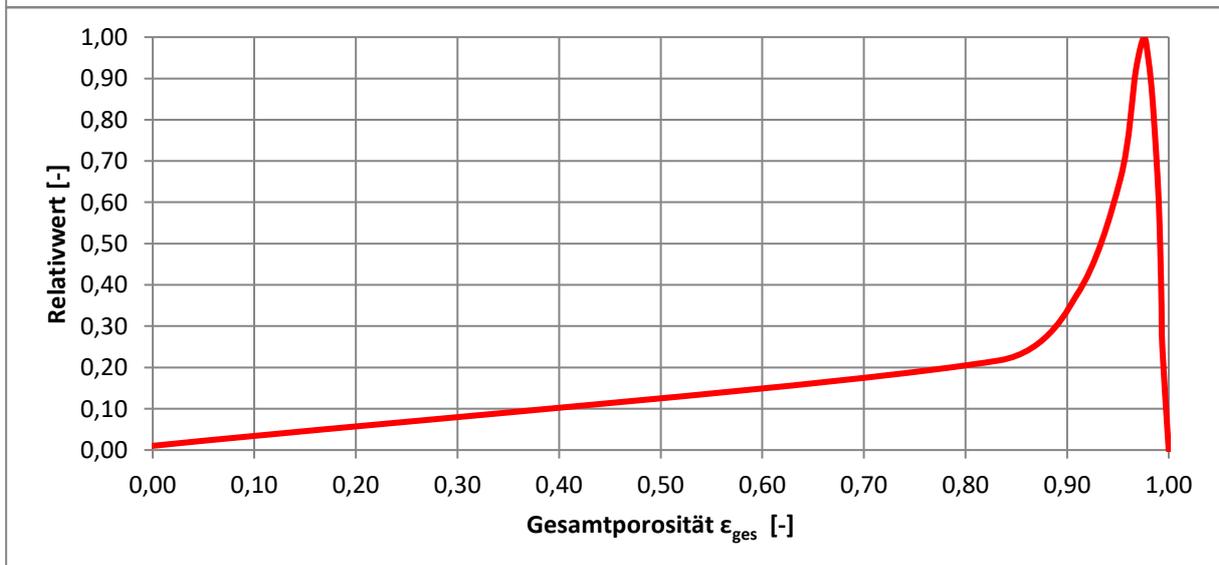
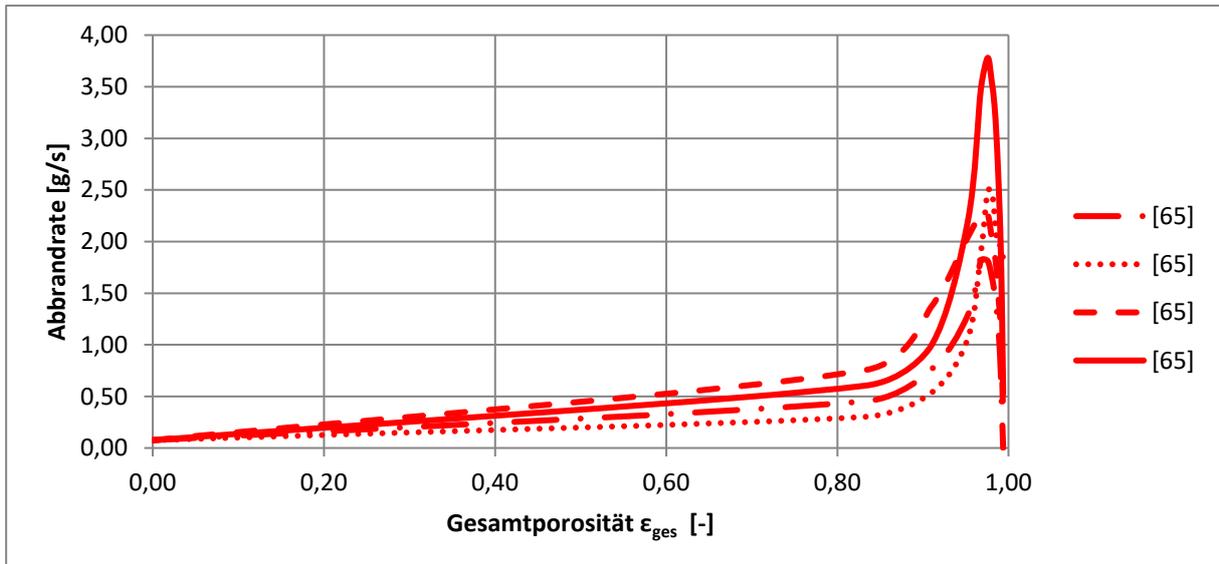


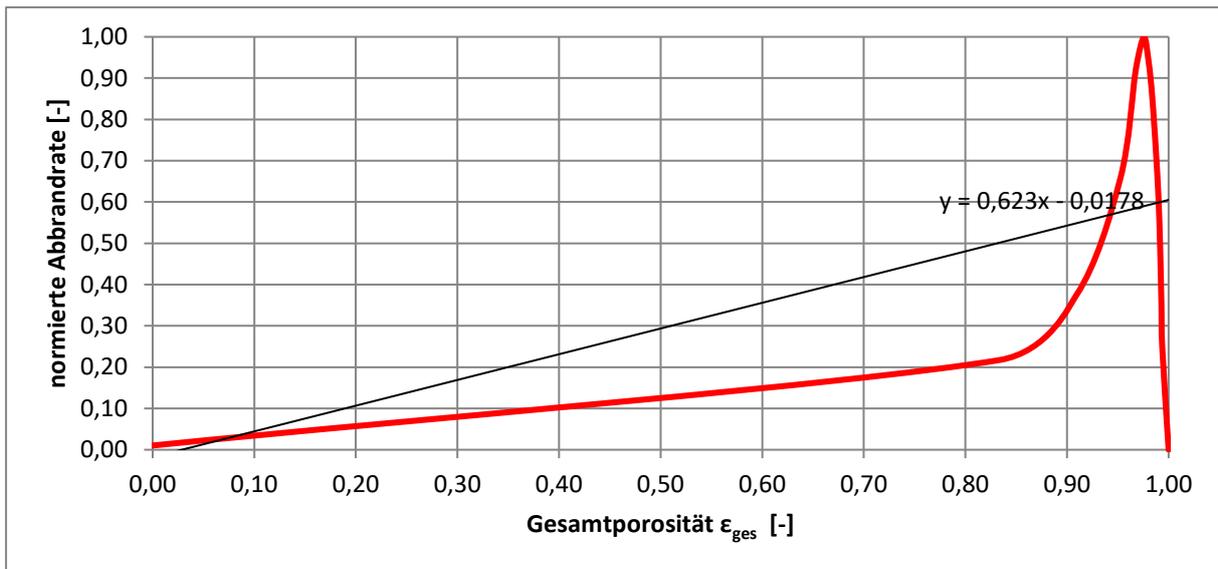
Heizwert



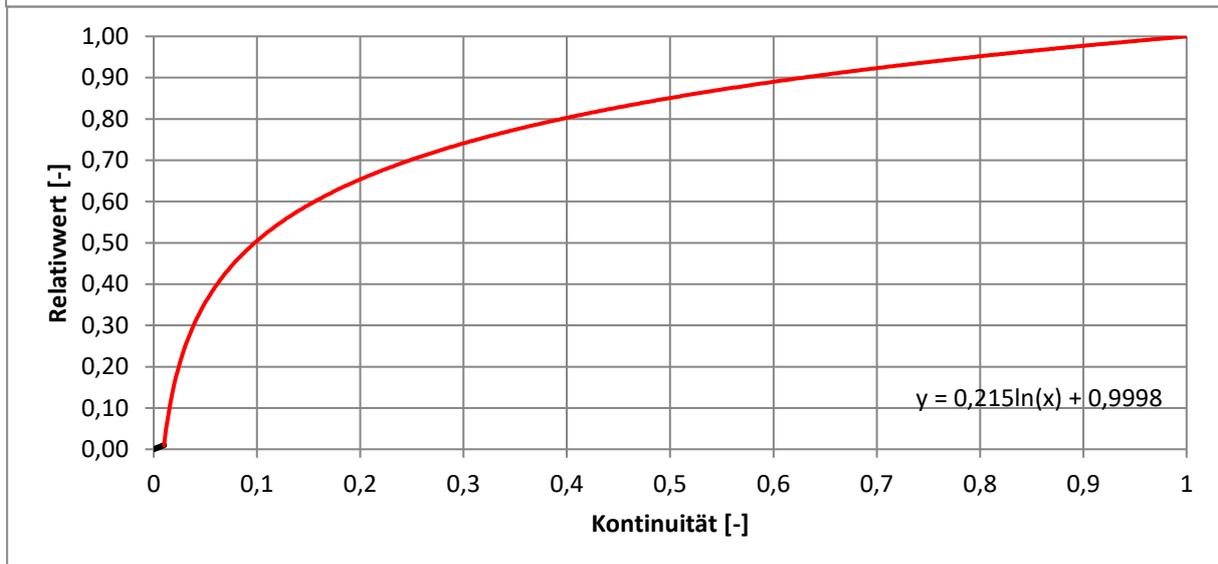
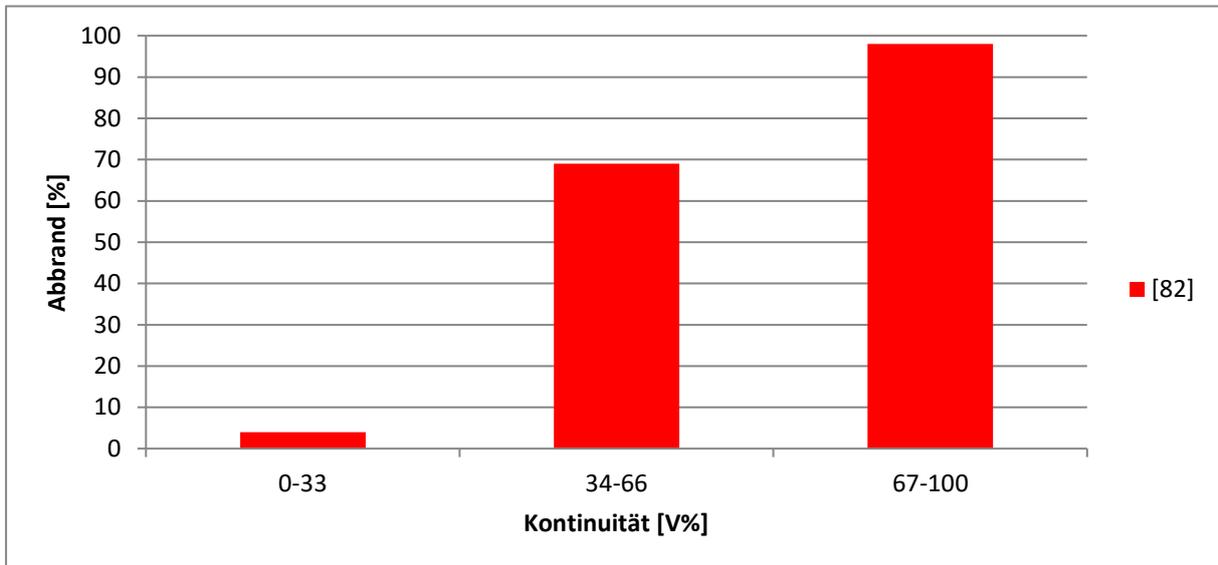


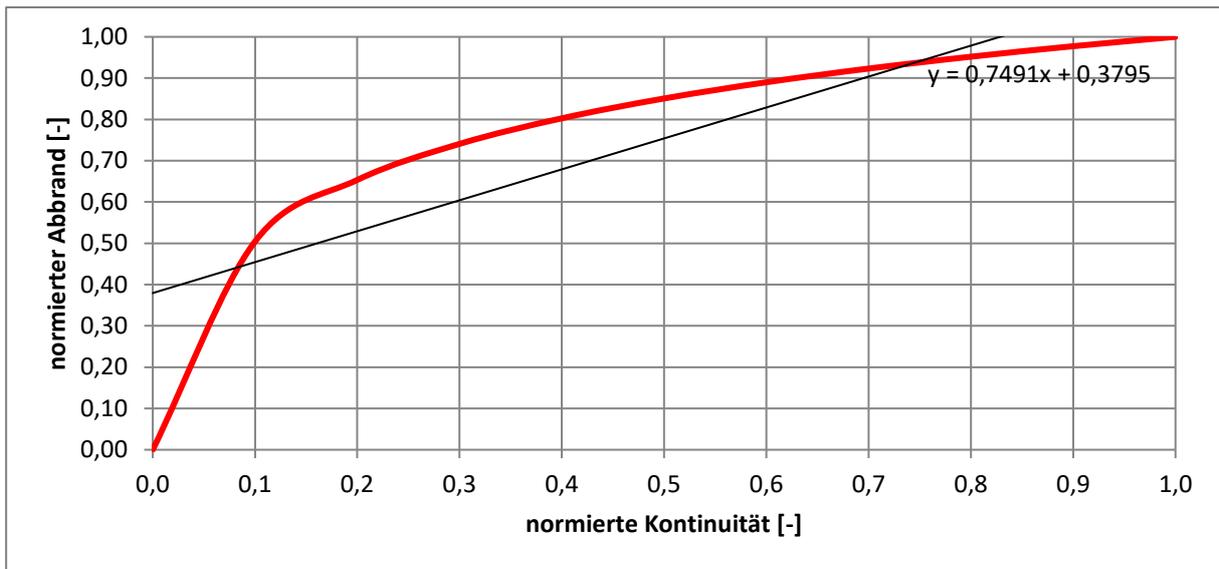
Gesamtporosität



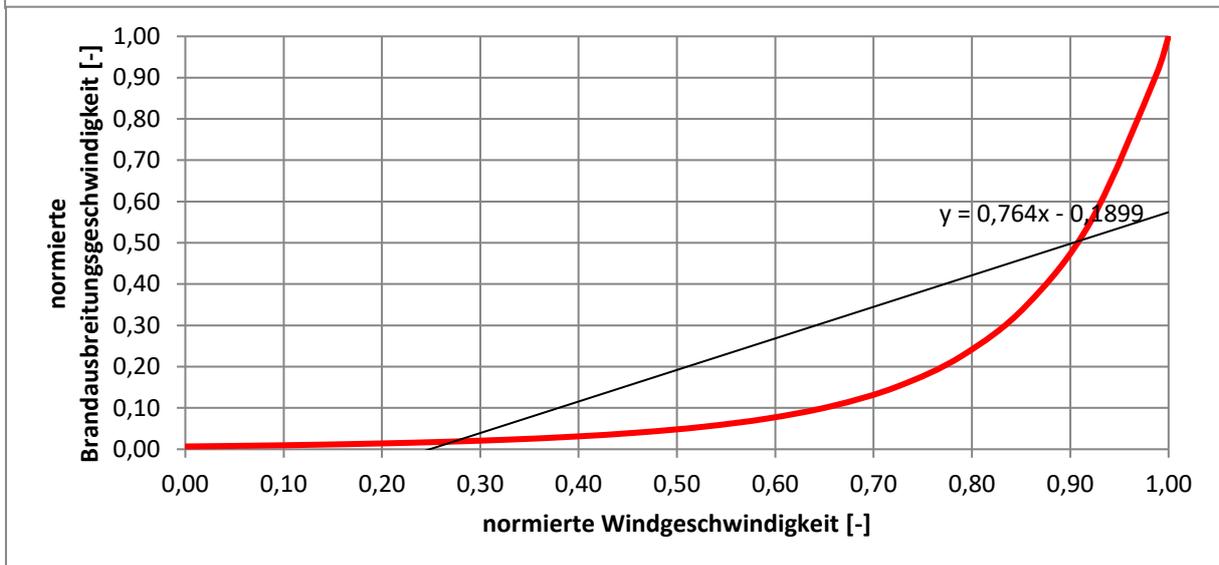
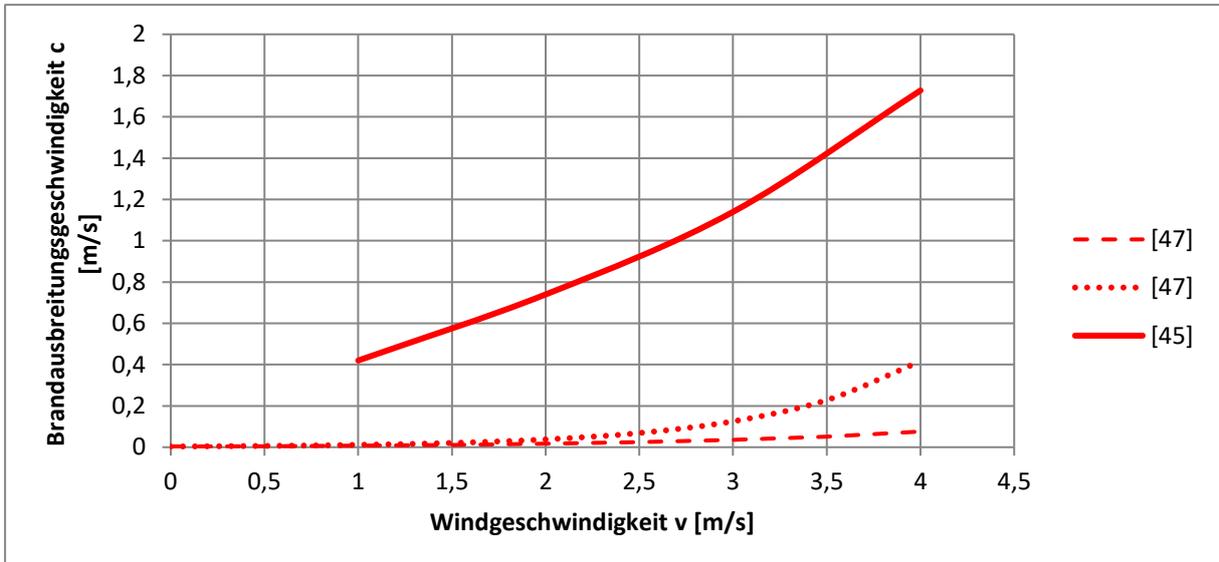


Kontinuität

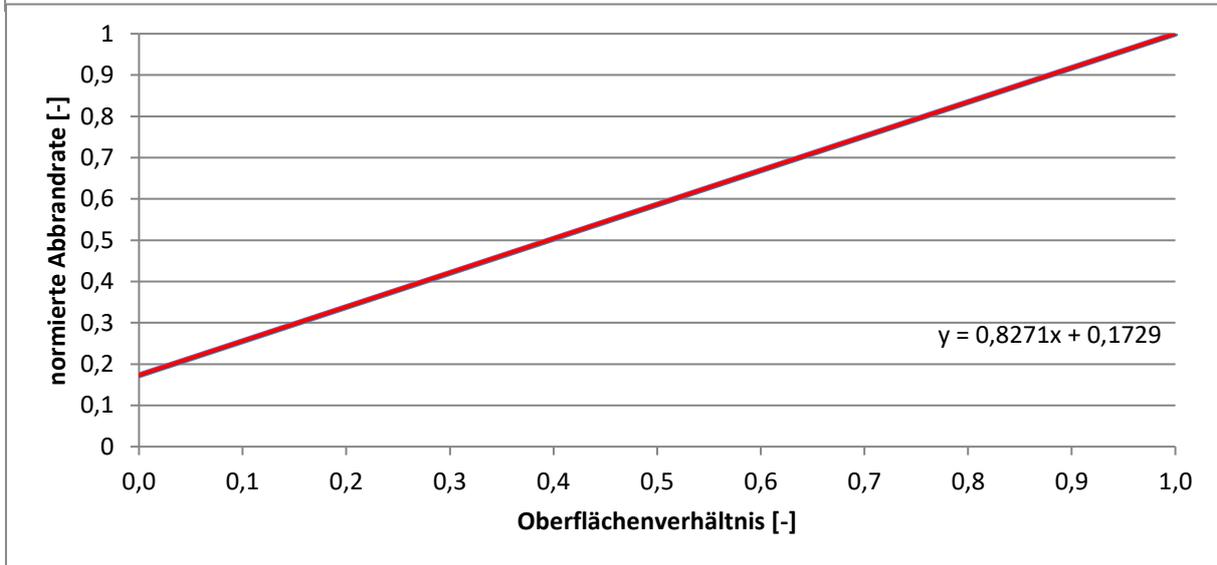
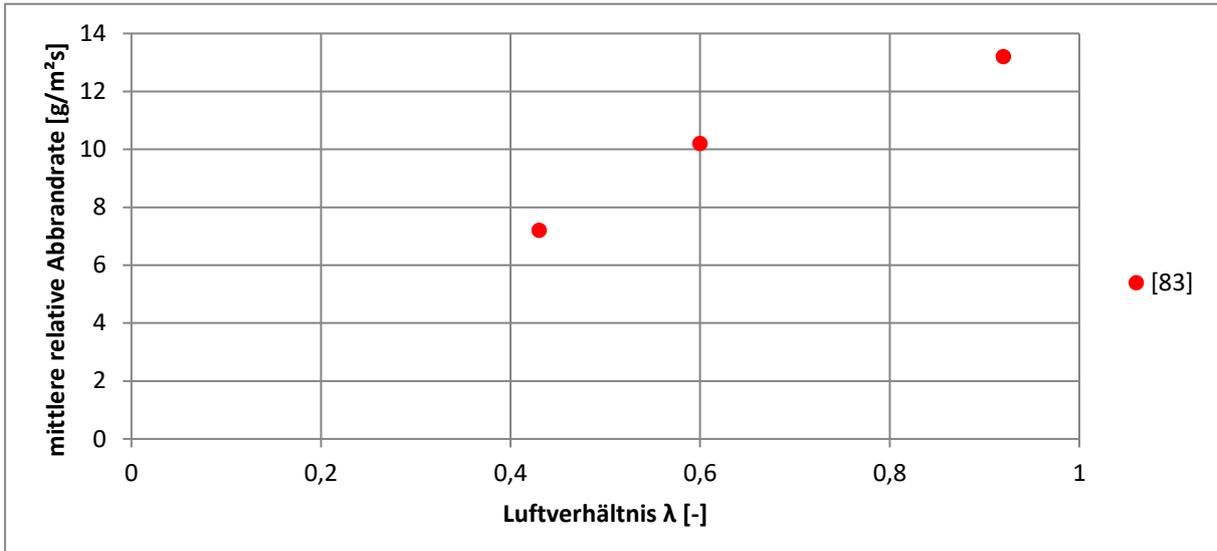




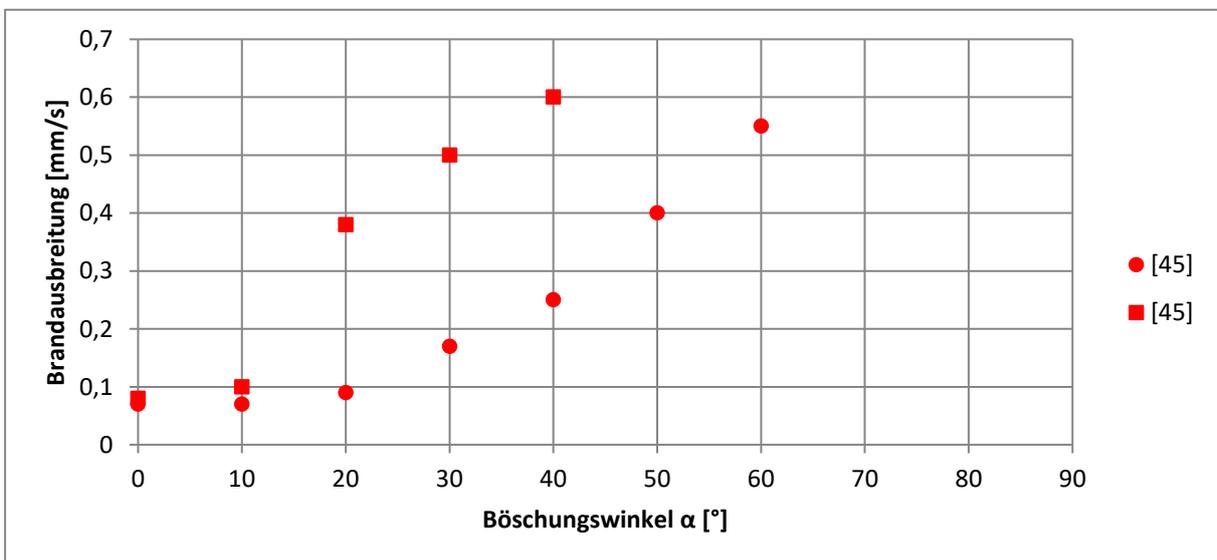
Windeinfluss

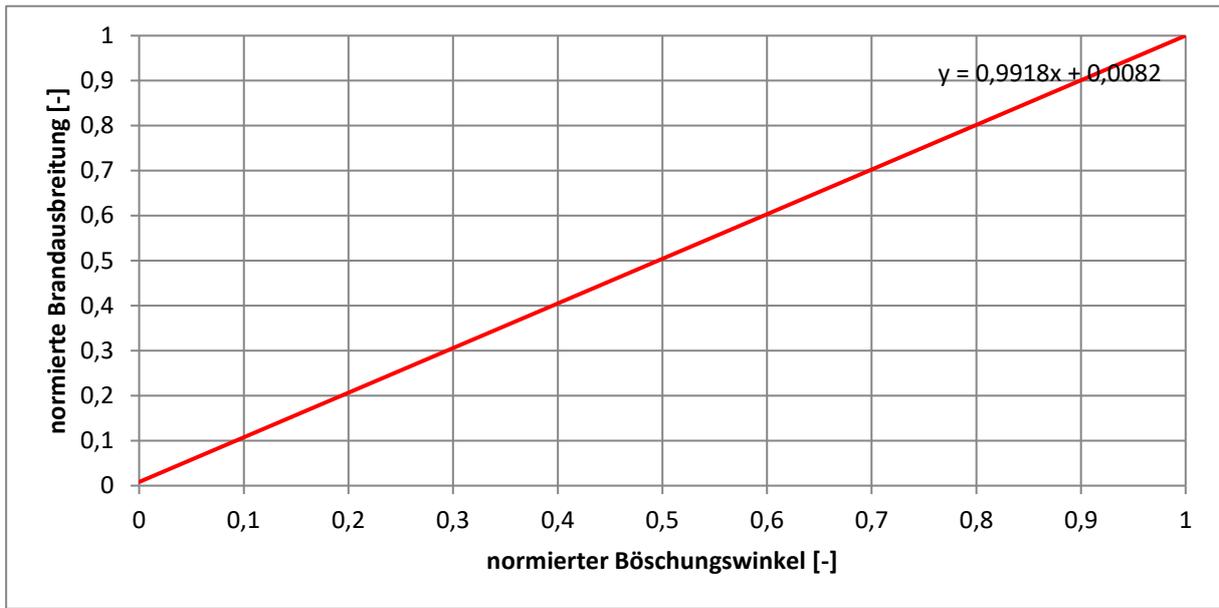


Oberflächenverhältnis

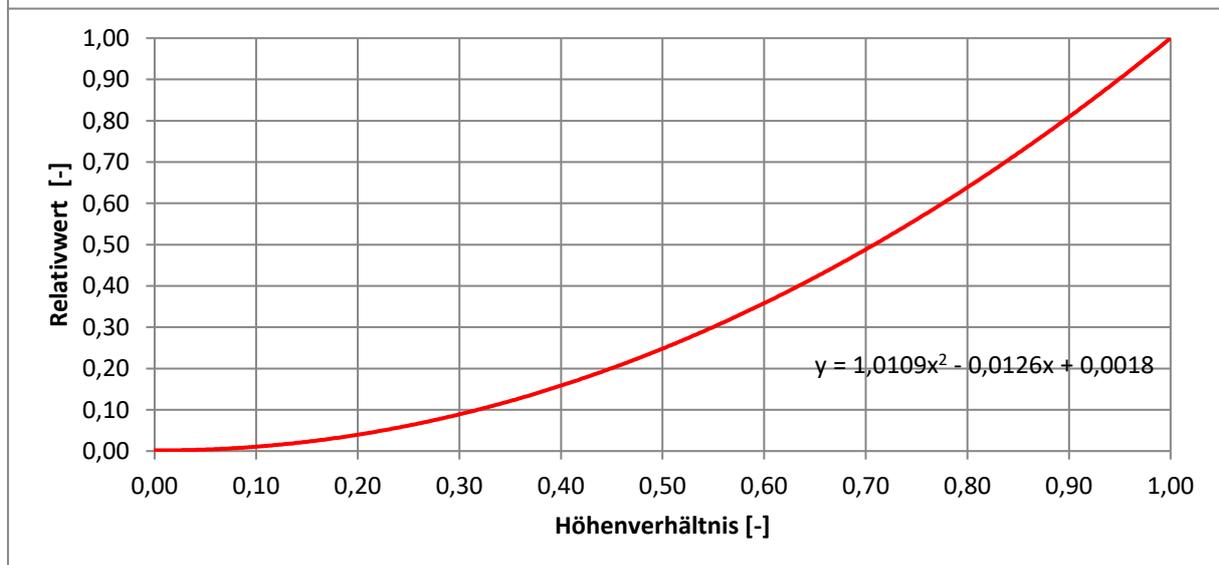
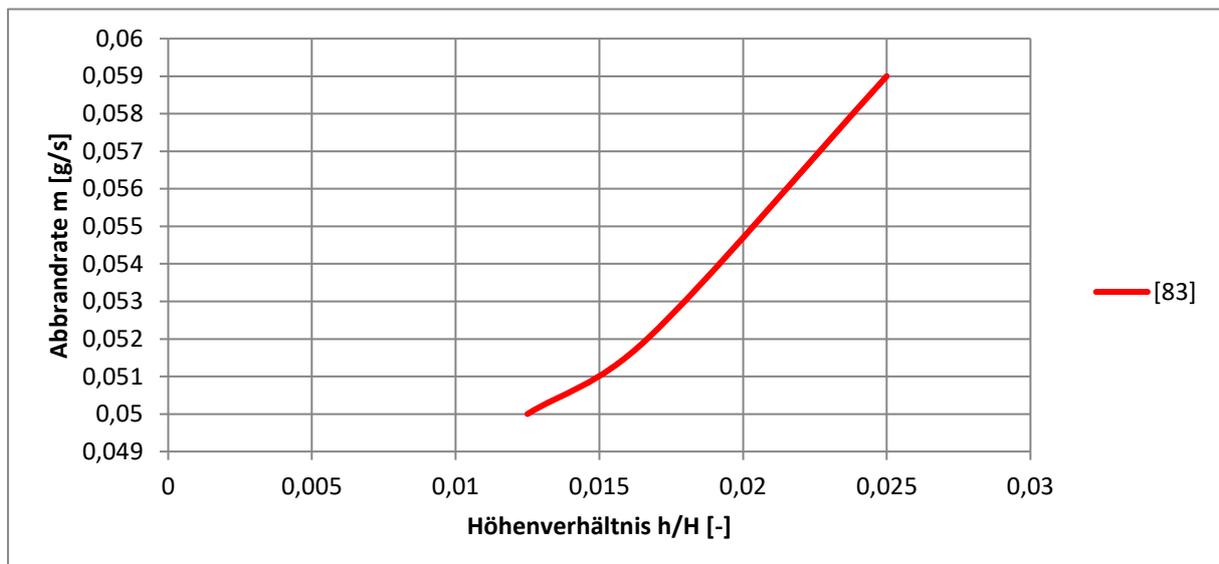


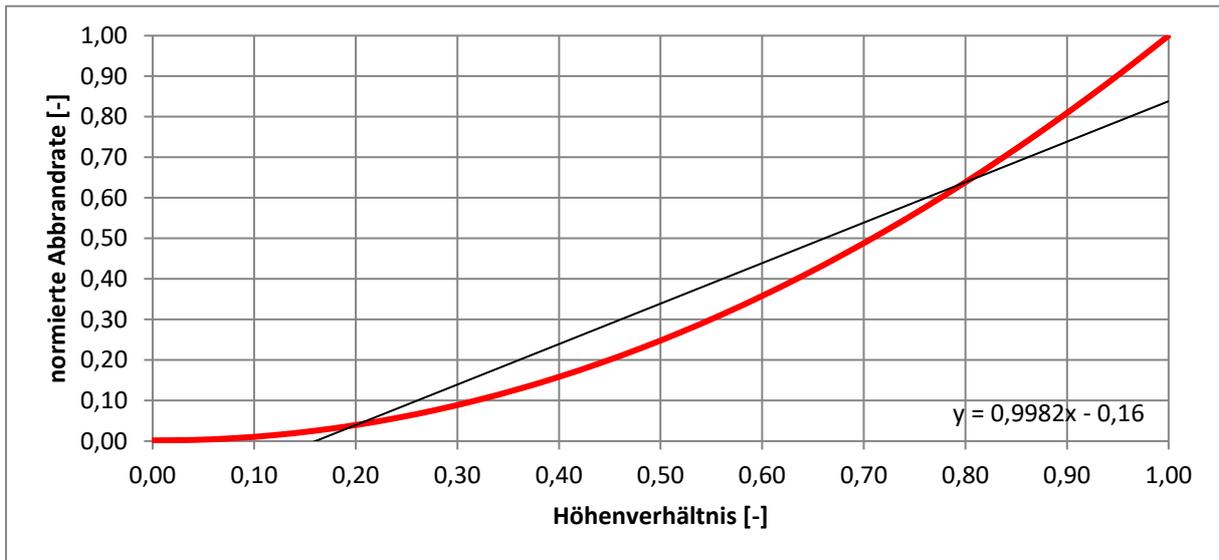
Böschungswinkel





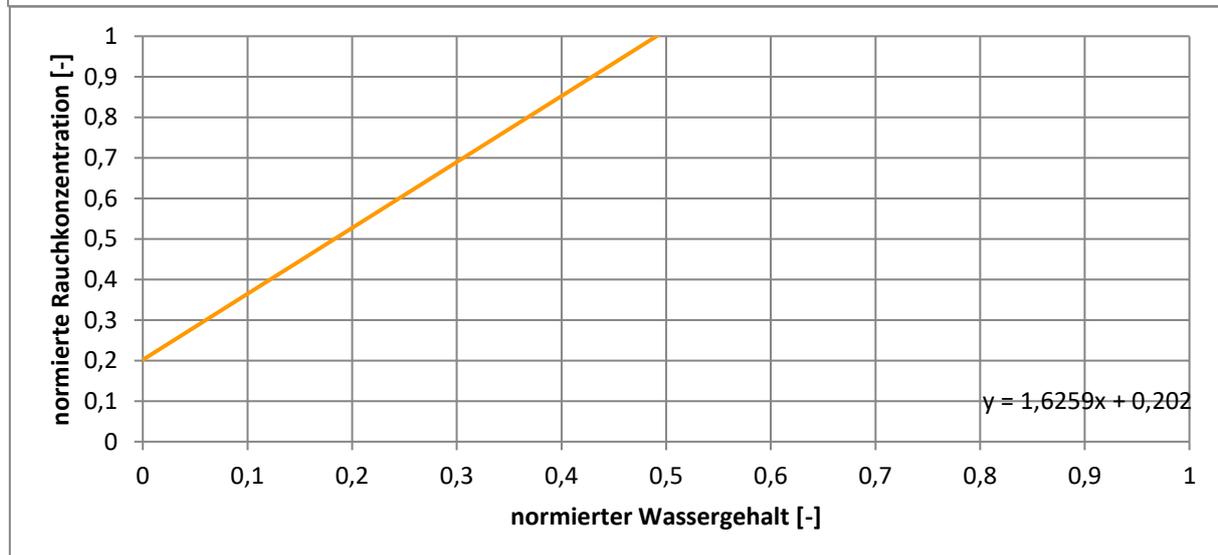
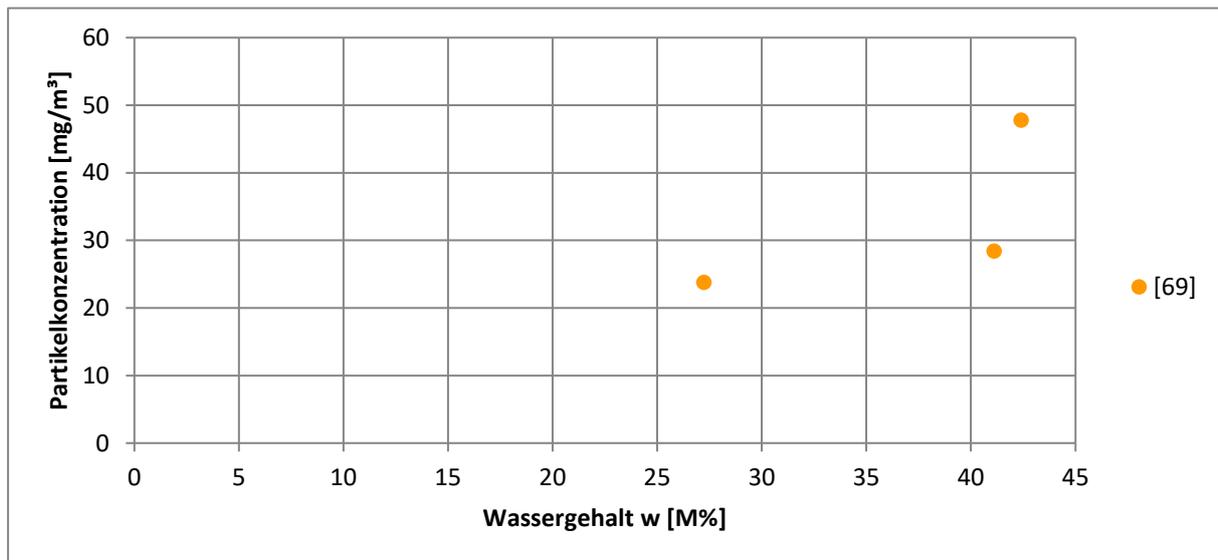
Höhenverhältnis



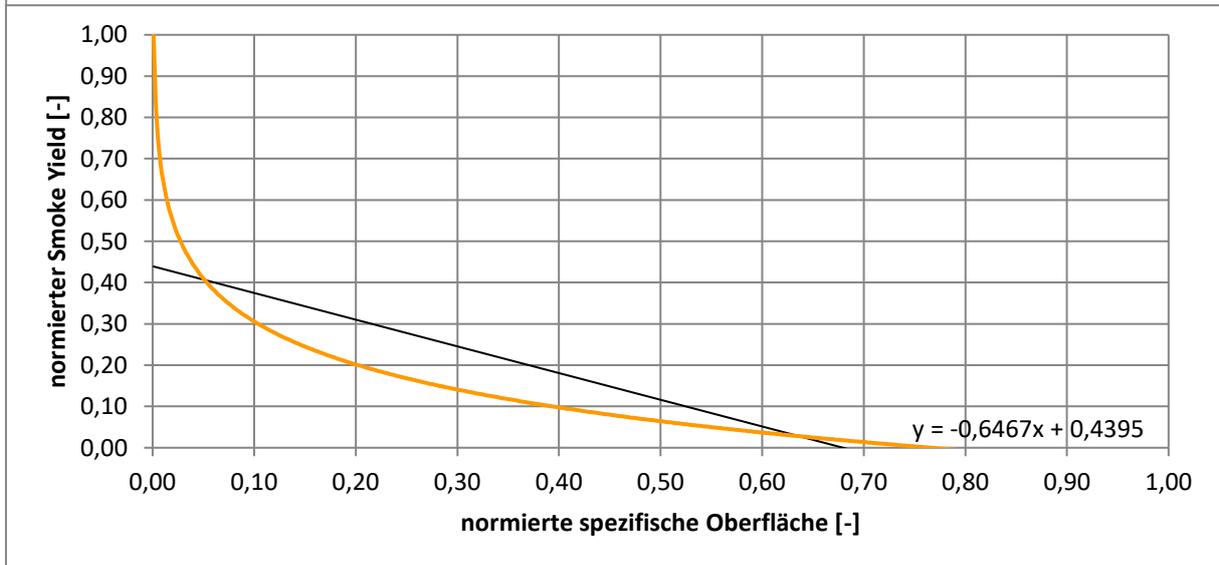
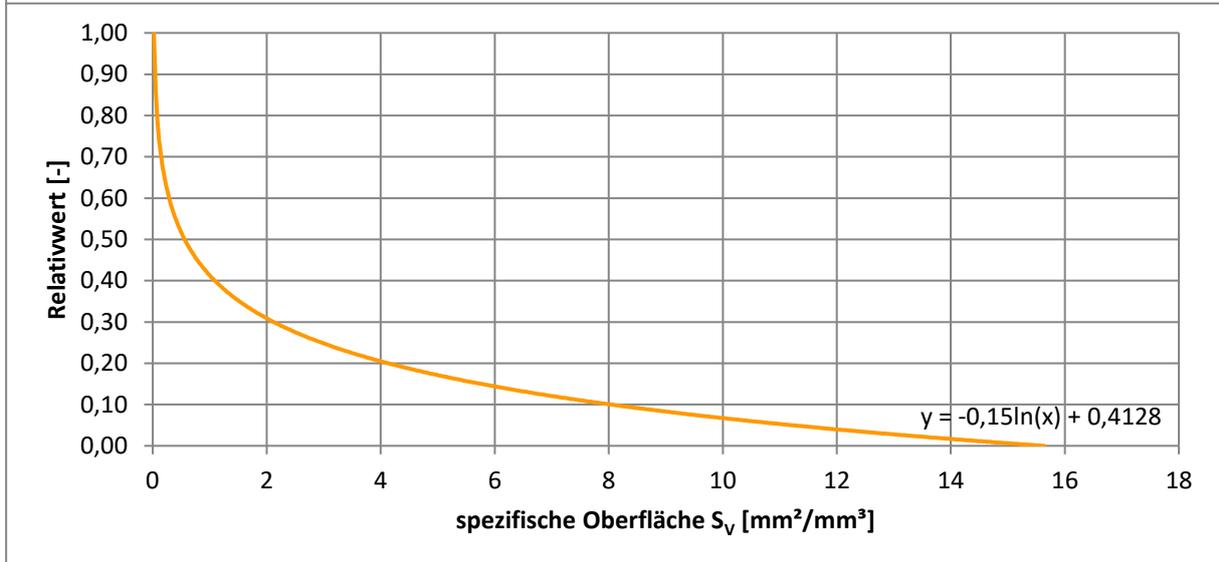
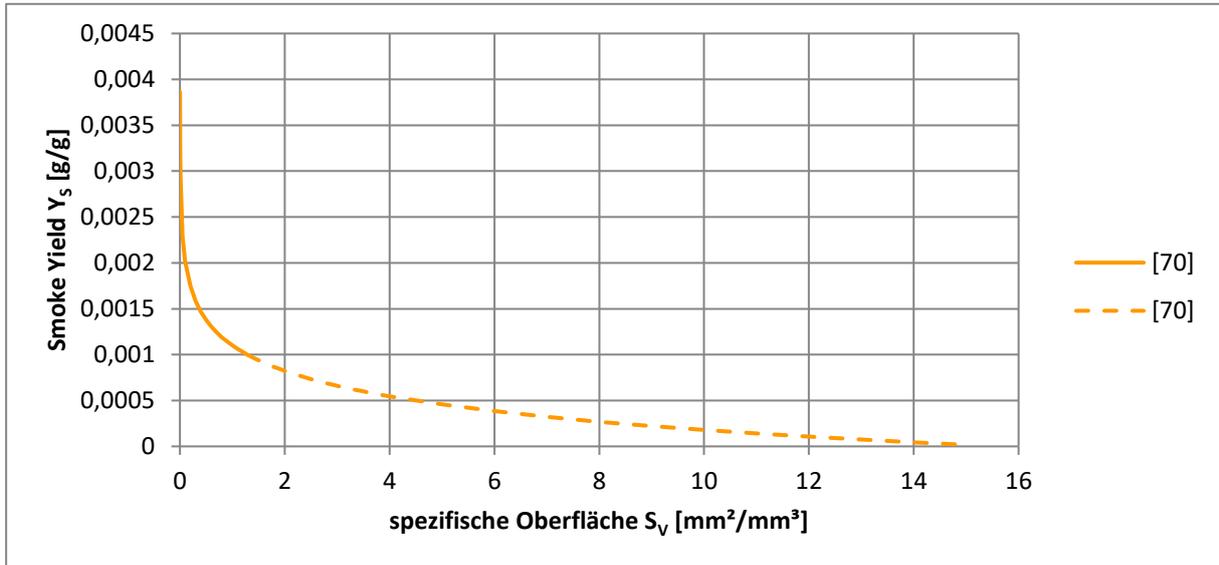


**Brandrauch**

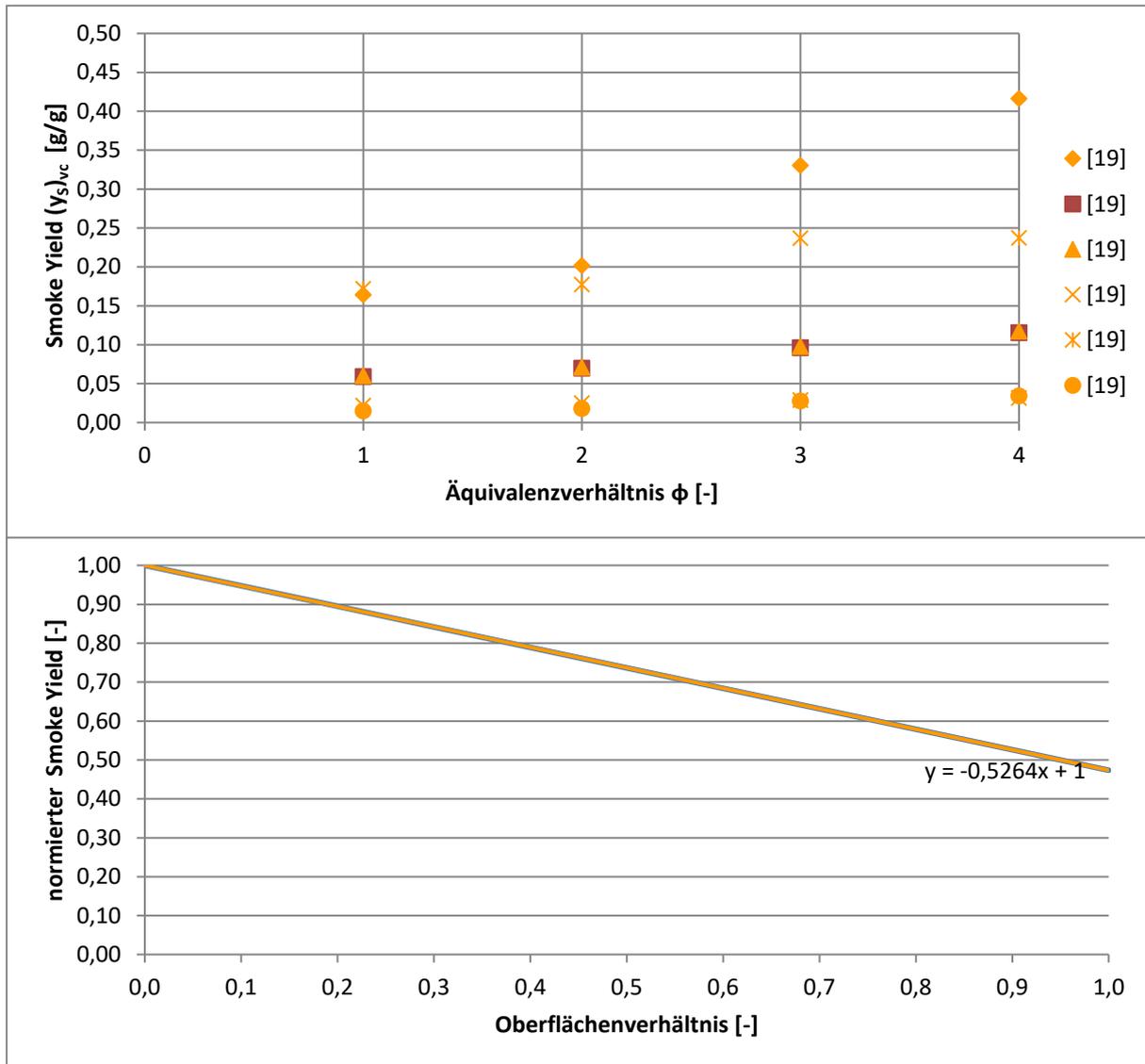
Wassergehalt



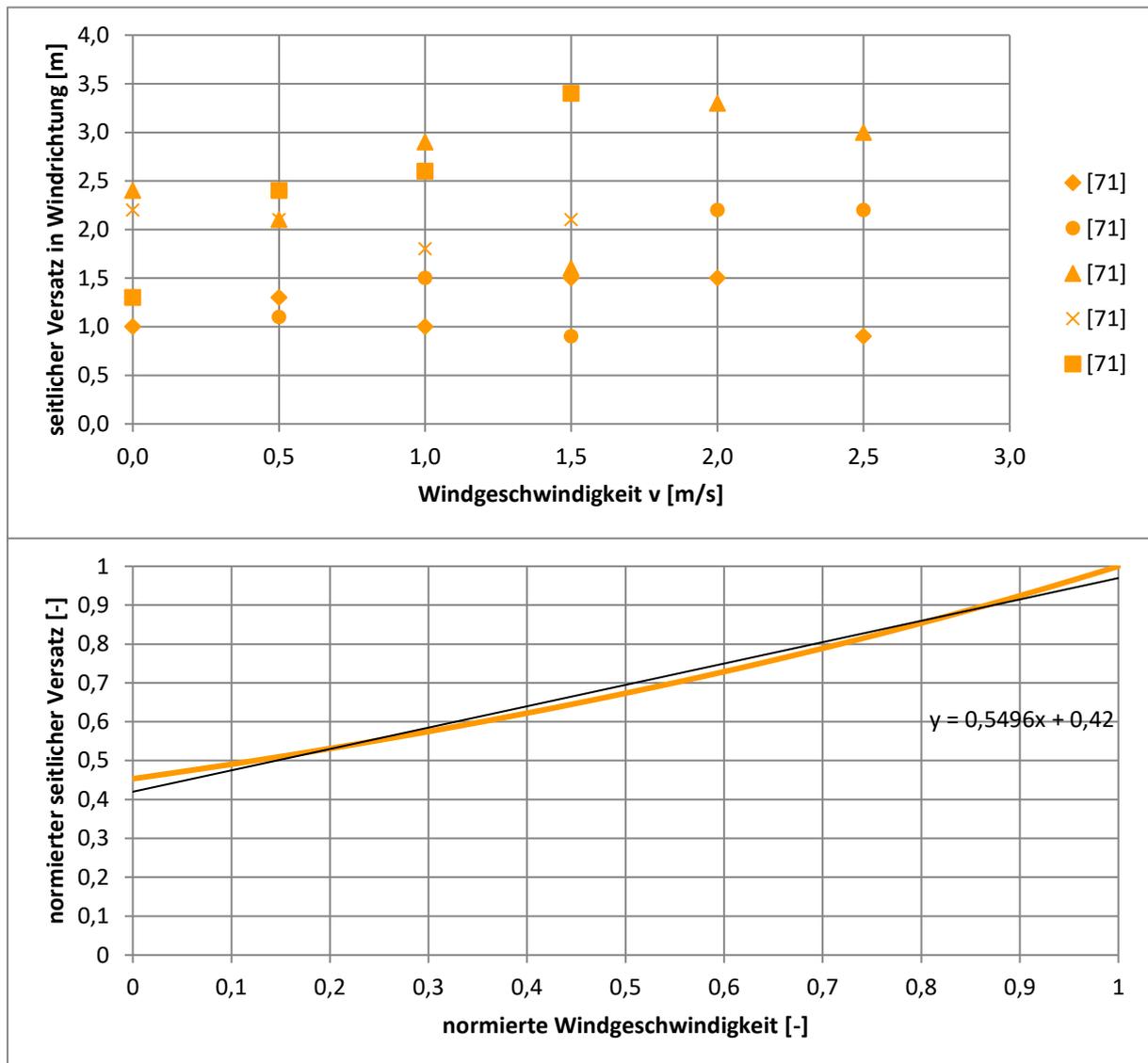
Spezifische Oberfläche



Oberflächenverhältnis



Windeinfluss



| Auflistung der Ermittlung der Relativwerte |                                       |   |
|--|---------------------------------------|---|
| Einflussparameter                          | Bezug                                 | Relativwert   |
| Fremdentzündung                            |                                       |   |
| Anteil zündfähiger Masse                   | Feststoffmasse                        | $\frac{\text{zündfähige Masse}}{\text{Feststoffmasse}}$   |
| Selbstentzündung                           |                                       |   |
| Abbauverhalten                             | Klasseneinteilung                     | $\left\{ \begin{array}{l} \text{kompostierbar} \rightarrow 1 \\ \text{biol. abbaubar} \rightarrow 0,5 \\ \text{vernachlässigbar} \rightarrow 0 \end{array} \right.$ |
| Wassergehalt                               | Funktion                              | Siehe Anhang II   |
| Freier Luftraum                            | Funktion                              | Siehe Anhang II   |
| Oberflächenverhältnis                      | Maximales Oberflächenverhältnis       | $\frac{\text{luftberührte Oberfläche}}{\text{Gesamtoberfläche}'}$   |
| Böschungswinkel                            | Rechter Winkel                        | $\frac{\text{Böschungswinkel}}{\text{rechter Winkel}}$  |
| Geplante Lagerdauer                        | Maximale Lagerdauer                   | $\frac{\text{geplante Lagerdauer}}{\text{maximale Lagerdauer}}$   |
| Schüttungshöhe                             | Maximale Schüttungshöhe               | $\frac{\text{Schüttungshöhe}}{\text{maximale Schüttungshöhe}}$  |
| Windeinfluss                               | Entscheidungsfrage                    | $\left\{ \begin{array}{l} \text{ja} \rightarrow 1 \\ \text{nein} \rightarrow 0 \end{array} \right.$   |
| Spezifische Oberfläche                     | Funktion                              | $0,1211 * LN(S_V) + 0,6348$   |
| Bildungsrate CO <sub>2</sub>               | Maximale Bildungsrate CO <sub>2</sub> | $\frac{\text{Bildungsrate CO}_2}{\text{maximale Bildungsrate CO}_2}$  |
| Brandwärme                                 |                                       |   |
| Heizwert                                   | Maximaler Heizwert wasserfrei         | $\frac{\text{gesamter Heizwert}}{\text{maximaler Heizwert wasserfrei}}$   |
| Porosität                                  | Funktion                              | Siehe Anhang II   |
| Kontinuität                                | Funktion                              | $0,215 * LN(k) + 0,9998$  |
| Oberflächenverhältnis                      | Maximales Oberflächenverhältnis       | $\frac{\text{luftberührte Oberfläche}}{\text{Gesamtoberfläche}'}$   |

|                        |                                 |  |
|------------------------|---------------------------------|--|
| Böschungswinkel        | Rechter Winkel                  | $\frac{\text{Böschungswinkel}}{\text{rechter Winkel}}$                             |
| Höhenverhältnis        | Funktion                        | $1,1019 * \left(\frac{h}{H}\right)^2 - 0,0126 * \left(\frac{h}{H}\right) + 0,0018$ |
| Wassergehalt           | Maximaler Wassergehalt          | $1 - \frac{\text{Wassergehalt}}{\text{maximaler Wassergehalt}}$                    |
| Windeinfluss           | Entscheidungsfrage              | $\begin{cases} ja \rightarrow 1 \\ nein \rightarrow 0 \end{cases}$                 |
| Spezifische Oberfläche | Funktion                        | $0,1593 * LN(S_V) + 0,5197$  |
| TRP <sub>min'</sub>    | Minimaler TRP                   | $\frac{TRP_{min'}}{\text{minimaler TRP}}$  |
| Brandrauch             |                                 |  |
| Smoke Yield            | Maximaler Smoke Yield           | $\frac{\text{gesamter Smoke Yield}}{\text{maximaler Smoke Yield}}$                 |
| Wassergehalt           | Maximaler Wassergehalt          | $\frac{\text{Wassergehalt}}{\text{maximaler Wassergehalt}}$                        |
| Oberflächenverhältnis  | Maximales Oberflächenverhältnis | $1 - \frac{\text{luftberührte Oberfläche}}{\text{Gesamtoberfläche'}}$              |
| Windeinfluss           | Entscheidungsfrage              | $\begin{cases} ja \rightarrow 1 \\ nein \rightarrow 0 \end{cases}$                 |
| Spezifische Oberfläche | Funktion                        | $0,15 * LN(S_V) + 0,4128$  |

# Anhang III – Ergebnisse

## Anhang B: Objektbezogene Löschwasserbedarfsermittlung gemäß TRVB 137 F

Firma / Objekt: .....

Brandabschnitt: .....

Hinweis zu  
Projektunterlagen:  
(Projekt/Plannummer, etc.) .....

### 1. Verwendete Bauprodukte, Nutzung, vorhandene Brandschutzeinrichtungen, rechnerische Brandfläche

#### 1.1 Spezifische Löschwasserrate für die immobile Brandbelastung - $q_{Lwi}$

| Wände:   | $q_{Lwi-Wand}$ |                         |
|--|----------------|-------------------------|
| <input type="checkbox"/> Wände einschließlich Dämmung Klasse A2  | 0 (NULL)       | l/(m <sup>2</sup> ·min) |
| <input type="checkbox"/> Wände aus Sandwichpaneelen Gesamtsystem Klasse B  | 0,25           | l/(m <sup>2</sup> ·min) |
| <input type="checkbox"/> Wände aus Baustoffen der Klasse A2 mit Dämmstoffen der Klasse D   | 0,25           | l/(m <sup>2</sup> ·min) |
| <input type="checkbox"/> Wände aus Holz und Holzwerkstoffen der Klasse D mit Dämmstoffen Klasse A2                               | 0,35           | l/(m <sup>2</sup> ·min) |
| <input type="checkbox"/> Wände aus Sandwichpaneelen Gesamtsystem Klasse C  | 0,35           | l/(m <sup>2</sup> ·min) |
| <input type="checkbox"/> Außenwandbekleidungen sowie Gesamtsystem von nichttragenden Außenwänden der Klasse C                    | 0,35           | l/(m <sup>2</sup> ·min) |
| <input type="checkbox"/> Wände aus Holz und Holzwerkstoffen der Klasse D   | 0,50           | l/(m <sup>2</sup> ·min) |
| <input type="checkbox"/> Mischform von Wandsystemen -<br>anteilmäßige Berechnung oder individuelle Festlegung von $q_{Lwi-Wand}$ | .....          | l/(m <sup>2</sup> ·min) |

| Decke / Dach:   | $q_{Lwi-Decke}$ |                         |
|---|-----------------|-------------------------|
| <input type="checkbox"/> Decken/Dächer und Dämmung Klasse A2  | 0 (NULL)        | l/(m <sup>2</sup> ·min) |
| <input type="checkbox"/> Decken/Dächer aus Sandwichpaneelen Gesamtsystem Klasse B   | 0,25            | l/(m <sup>2</sup> ·min) |
| <input type="checkbox"/> Dächer - Gesamtsystem $B_{total}(t1)$ , Untersicht mindestens in Klasse A2                                 | 0,25            | l/(m <sup>2</sup> ·min) |
| <input type="checkbox"/> Decken/Dächer aus Holz und Holzwerkstoffen der Klasse D mit Dämmstoffen Klasse A2                          | 0,35            | l/(m <sup>2</sup> ·min) |
| <input type="checkbox"/> Decken/Dächer aus Sandwichpaneelen Gesamtsystem Klasse C   | 0,35            | l/(m <sup>2</sup> ·min) |
| <input type="checkbox"/> Decken/Dächer aus Holz und Holzwerkstoffen der Klasse D  | 0,50            | l/(m <sup>2</sup> ·min) |
| <input type="checkbox"/> Mischform von Deckensystemen -<br>anteilmäßige Berechnung oder individuelle Festlegung von $q_{Lwi-Decke}$ | .....           | l/(m <sup>2</sup> ·min) |

$$q_{Lwi} = q_{Lwi-Wand} + q_{Lwi-Decke} = \underline{\underline{0}} \quad \text{l/(m}^2\text{·min)}$$

#### 1.2 Spezifische Löschwasserrate für die mobile Brandbelastung - $q_{Lwm}$

aus Anhang A

Lfd. Nr.: ..... Nutzung: .....

oder

anteilmäßige Ermittlung:

Angewendete Nutzungen: .....

Gesonderte Berechnung beiliegend  ja  nein

$$q_{Lwm} = \frac{5,8}{5,8} \text{ l/(m}^2 \cdot \text{min)}$$

**1.3 Rechnerische Brandfläche -  $A_B$**

Brandabschnittsfläche: 400 m<sup>2</sup>

ja Brandschutzeinrichtungen vorhanden  
 nein →  $A_B$  = Brandabschnittsfläche

Unter folgenden Voraussetzungen ist eine Reduzierung möglich auf:

- Automatische Brandmeldeanlage gem. TRVB 123 S mit automatischer Alarmweiterleitung gem. TRVB 114 S 2.000 m<sup>2</sup>
- Betriebsfeuerwehr mit ständigem Bereitschaftsdienst (24/7) - Sicherheitskategorie K 3.2 gem. OIB-RL - und automatische Brandmeldeanlage gem. TRVB 123 S mit Alarmweiterleitung zur Betriebsfeuerwehr 1.200 m<sup>2</sup>
- Automatische Feuerlöschanlage (z.B. Sprinkleranlage gemäß TRVB 127 S) oder Sauerstoffreduktionsanlage gem. TRVB S 155 und gesicherter, automatischer Alarmweiterleitung gem. TRVB 114 S 750 m<sup>2</sup>

$$A_B = 400 \text{ m}^2$$

**2. Berechnung des Löschwasserbedarfs für den Objektschutz**

**2.1 Löschwasserrate für den Objektschutz -  $Q_{Lwo}$**

$$Q_{Lwo-Allgemein} = (q_{Lwi} + q_{Lwm}) \cdot A_B = ( \quad + \quad ) \text{ l/m}^2 \cdot \text{min} \cdot \quad \text{m}^2 = \quad \text{l/min}$$

oder bei Lager oder Lagerungen in Kundenbereichen von Verkaufsstätten mit einer Lagerguthöhe  $h_L > 2,5 \text{ m}$ :

$$h_L = 3 \text{ m} \quad Q_{Lwo-Lager} = (q_{Lwi} + q_{Lwm}) \cdot [A_B + 4 \cdot (h_L - 2,5) \cdot A_B]$$

$$Q_{Lwo-Lager} = ( 0 + 5,8 ) \text{ l/m}^2 \cdot \text{min} \cdot [ 400 \text{ m}^2 + 4 \cdot ( 3 \text{ m} - 2,5 \text{ m} ) \cdot 400 \text{ m}^2 ] = 2552 \text{ l/min}$$

Lager gesprinklert und  $Q_{Lwo-Lager} > 2 \cdot Q_{Lwo-Allgemein}$   Ja →  $Q_{Lwo} = 2 \cdot Q_{Lwo-Allgemein}$   
 Nein →  $Q_{Lwo} = Q_{Lwo-Lager}$

$$Q_{Lwo} = 2552 \text{ l/min}$$

$Q_{Lwo} \leq 8.000 \text{ l/min}$   Ja → keine weiteren Maßnahmen erforderlich  
 Nein → Reduktion durch zusätzliche Brandschutzvorkehrungen

**2.2 Löschwasservorrat für den Objektschutz -  $V_{Lwo}$**

$$V_{Lwo} = Q_{Lwo} \cdot t_{LO} / 1.000 = 2552 \text{ l/min} \cdot 90 \text{ min} / 1.000 \quad V_{Lwo} = 229,68 \text{ m}^3$$

Datum: \_\_\_\_\_ Bearbeiter: \_\_\_\_\_