

«unsere Friedhöfe

verseuchen

das Grundwasser

vergiften

den Boden

Medikamente

und

Schwermetalle

eine einzige Sauerei

Gift sind wir

Gift

Gerade als Leichen»

Hansjörg Schertenleib

Ivo Willimann

# Leichenzersetzung im Erdgrab

Zersetzungsstörungen

–

Hygiene

–

Massnahmen

# INHALTSVERZEICHNIS

<b>Einleitung</b> .....	<b>1</b>
<b>1. Zersetzungsprozesse beim Menschen</b> .....	<b>3</b>
Zusammenfassung.....	3
1.1. Zusammensetzung des Menschen.....	4
1.2. Autolyse.....	6
1.3. Fäulnis und Verwesung.....	7
1.4. Zeitbedarf.....	9
1.4.1. Insekten.....	10
1.4.2. Temperatur.....	10
1.4.3. Chemikalien und Medikamente.....	11
1.4.4. Mumifikation.....	12
Offene Fragen.....	12
<b>2. Fettsäurekonservierung</b> .....	<b>14</b>
Zusammenfassung.....	14
2.1. Mechanismus.....	15
2.2. Fetthärtung.....	16
2.3. Chemische Zusammensetzung und Morphologie der Adipocire.....	19
2.4. Abbauresistenz der Adipocire.....	20
2.4.1. Inhibition des Fäulnisprozesses.....	20
2.4.2. Persistenz der Adipocire.....	23
2.4.3. Abbau der Adipocire.....	24
2.5. Einflussfaktoren der Adipocirebildung.....	25
2.5.1. Sauerstoff.....	26
2.5.2. Körpertemperatur.....	26
2.5.3. Wärmetransport.....	27
2.5.3.1. Wärmeleitung (Konduktion).....	27
2.5.3.2. Wasserdampfdiffusion (latenter Wärmefluss).....	29
2.5.4. Bakterienvielfalt.....	30
2.5.5. Fettreichtum und Fettverteilung.....	31
2.5.6. Pflanzliches Material.....	32
Offene Fragen.....	32
<b>3. Wechselwirkungen zwischen Boden und Leichenzerersetzung</b> .....	<b>35</b>
Zusammenfassung.....	35
3.1. Bodentemperatur.....	36
3.2. Wasserhaushalt des Bodens.....	36
3.2.1. Der Porenraum.....	37
3.2.2. Textur.....	39
3.2.3. Strukturbildung.....	40
3.3. Zersetzungsbedingungen in verschiedenen Böden.....	41

3.4. Auswirkungen der Bestattungstätigkeit auf den Boden.....	43
3.4.1. Mechanische Bodenverdichtung.....	44
3.4.2. Mechanische Schleifschicht.....	44
3.4.3. Podsolierung.....	45
3.4.3.1. Allgemeine Einführung.....	45
3.4.3.2. Podsolierung auf Bestattungstiefe.....	46
3.4.4. Organische Porenverstopfung.....	47
3.4.4.1. Durch Huminstoffe.....	47
3.4.4.2. Durch Bakterien.....	48
3.4.5. Tonverlagerung.....	49
3.5. Feldabklärungen im Friedhof Zürich-Affoltern.....	50
Offene Fragen.....	51
<b>4. Hygienische Aspekte in Friedhöfen.....</b>	<b>53</b>
Zusammenfassung.....	53
4.1. Geschichtlicher Rückblick.....	54
4.2. Bakterien und Viren .....	55
4.2.1. Austrag an Krankheitskeimen aus Leichen.....	56
4.2.2. Überlebensfähigkeit von Krankheitserregern im Boden.....	56
4.2.3. Transport von Krankheitserregern zum Grundwasser .....	58
4.3. Beeinträchtigung durch organische Abbauprodukte.....	59
4.3.1. Toxizität der Leichenkatabolite.....	60
4.3.2. Transport der Leichenkatabolite .....	60
4.3.3. Quantitative Vergleiche.....	60
4.4. Eintrag von Quecksilber.....	61
Offene Fragen.....	62
<b>5. Massnahmen .....</b>	<b>64</b>
Zusammenfassung.....	64
5.1. Grundstückwahl.....	65
5.2. Bestattungstiefe.....	66
5.3. Friedhofsbepflanzung .....	68
5.4. Sarg.....	69
5.4.1. Exkurs zum Muslimfriedhof in Zürich.....	69
5.5. Leichenbekleidung.....	70
5.6. Beschleunigte Zersetzung durch pflanzliches Füllmaterial.....	70
5.7. Friedhofsanierungen.....	71
5.7.1. Zur Drainageleitung.....	71
<b>Dank.....</b>	<b>74</b>
<b>Glossar.....</b>	<b>75</b>
<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>77</b>
<b>Anhang .....</b>	<b>81</b>
Anhang A: Daten und Beobachtungen zum Versuch von Rodriguez/Bass.....	82
Anhang B: Säurewirkung langkettiger Fettsäuren.....	84
Anhang C: Zusammenstellung von Leichenkataboliten.....	85
Anhang D: Datenmaterial zu den bodenkundlich-geologischen Sondierungen im Friedhof Zürich-Affoltern .....	87

# EINLEITUNG

«Der Mensch ist ein Unglück für diese Welt», sagte er verschwörerisch und schloss das Ofentor.

«Selbst als Tote verpesteten wir Luft und Erde. Unsere Friedhöfe verseuchen das Grundwasser, vergiften den Boden. Medikamente und Schwermetalle, eine einzige Sauerei! Gift sind wir. Gift! Gerade als Leichen.»

*Hansjörg Schertenleib: Das Zimmer der Signora*

Noch im letzten Jahrhundert führten Wissenschaftler leidenschaftliche Streitgespräche über die hygienischen Komplikationen, die sich aus den Friedhöfen ergeben könnten. Diese Debatten standen unter dem Einfluss der "Miasmenlehre" - der Vorstellung, dass Krankheiten durch schlechte Gerüche übertragen werden können. Gerade Kremationsbefürworter wussten diese "Miasmen" vortrefflich in ihr Argumentarium einzubauen. Um die Jahrhundertwende, die Bakterien waren in der Zwischenzeit als krankheitsverursachende Organismen erkannt, verloren die Diskussionen um die Erdbestattung zunächst ihren polemischen Charakter und nahmen sodann gänzlich ab. Seit den 20er Jahren dieses Jahrhunderts stehen die Friedhöfe nunmehr weitgehend abseits des Blickfeldes der Wissenschaften. Lediglich in der Gerichtsmedizin wurde im Hinblick auf die Bestimmung der Todesursache und des Todeszeitpunktes Forschungsarbeit betrieben, die auch für das Verständnis der Abläufe in einer erdbestatteten Leiche aufschlussreich sind.

In Anbetracht des geringen Interesses von seiten der Naturwissenschaften an den Friedhöfen stellt es keine Überraschung dar, dass die diesem Bericht zugrundeliegende Diplomarbeit nicht aus eigenem Antrieb zustande kam. Vielmehr geht sie auf die Initiative des Bestattungsamtes der Stadt Zürich zurück. Die Beobachtung, dass Leichen nach Ablauf der Grabesruhe noch weitgehend unzersetzt sein können, weckte das Bedürfnis nach einer eingehenderen Abklärung dieses Phänomens. Verschiedene Fragen standen für die BestattungsbeamtInnen im Raume: Welche Prozesse führen zum Stillstand in der Leichenzersetzung? Welche Faktoren begünstigen die Konservierung einer Leiche? Und wie kann das Auftreten konservierter Leichen verhindert werden?

Das Studium der Hintergründe von Zersetzungsstörungen in Friedhöfen stand im Zentrum der vorliegenden Diplomarbeit. Mittels einer Literaturrecherche galt es, ein möglichst genaues Bild der Prozesse zu erhalten, die in einer Leiche ablaufen können. Die Resultate dieser Nachforschungen sind in den Kapiteln 1 und 2 zusammengetragen. Das Kapitel 1 thematisiert dabei den ungestörten Zersetzungsprozess einer Leiche bis zu ihrer vollständigen Skelettierung. Im Kapitel 2 wird auf die Fettsäurekonservierung eingegangen. Es ist dies jene Zersetzungsstörung, die in einigen Friedhöfen Zürichs, aber auch in etlichen Begräbnisstätten anderer Orte häufig auftritt. Neben der mechanistischen Vorstellung, wie die Fettsäurekonservierung vonstatten gehen könnte, werden ferner verschiedene Einflussfaktoren diskutiert.

Im Kapitel 3 wird erwogen, wie sich verschiedene Bodenbedingungen auf den Abbauprozess einer Leiche auswirken. Als Grundlage dienen hierzu jene Faktoren, die im vorangegangenen Kapitel als der Fettsäurekonservierung fördernd hervorgingen. Andererseits werden im Kapitel 3 auch die Auswirkungen hinterfragt, die von der Leichenzersetzung auf den Boden ausgehen können. In diesem Zusammenhang fanden Feldabklärungen im Friedhof Zürich-Affoltern statt.

Einige hygienische Aspekte werden im Kapitel 4 aufgeworfen. Der Kremationsangestellte, den Hansjörg Schertenleib im einleitenden Zitat sprechen lässt, nimmt auf eine überspitzte Weise zur hygienischen Situation in Friedhöfen Stellung. Die gehegten Bedenken sind allerdings unbegründet. In ihnen drückt sich vielmehr ein Unbehagen aus, wie es heute noch manch einer den Friedhöfen entgegenbringt. Im Unterschied zur Stossrichtung des genannten Zitates, werden im vierten Kapitel jedoch vorab die Ausbreitungsmöglichkeiten von Krankheitskeimen abgeschätzt. Auf eine allfällige chemische Beeinträchtigung des Friedhofbodens wird nur kurz eingegangen.

Im 5. Kapitel werden Massnahmen für die Bestattungspraxis erörtert. In diesem Kapitel sind Vorschläge wiedergegeben, wie den Zersetzungsstörungen vorgebeugt oder aber diese abgewendet respektive abgeschwächt werden können.

# 1. ZERSETZUNGSPROZESSE BEIM MENSCHEN

## Zusammenfassung

Im Erdgrab erfolgt die Leichenzersetzung zum grossen Teil unter Ausschluss der Tierwelt. Insbesondere hält die den Sarg abdeckende Erdschicht die Insektenmaden fern, was sich auf die Zersetzung verlangsamernd auswirkt. Der durchschnittliche Zeitbedarf bis zur Skelettierung einer erdbestatteten Leiche beträgt rund fünf bis sieben Jahre.

Bereits kurz nach Eintritt des Todes beginnen die körpereigenen Enzyme mit dem Zersetzungsprozess. Die Zellmembranen werden infolge dieses autolytischen Prozesses durchlässiger, was zu einer Vermischung der Zellinhaltsstoffe mit den Zwischenzellsubstanzen führt. Morphologisch findet eine Verflüssigung des Weichgewebes statt. Für den weiteren Zersetzungsprozess von herausragender Bedeutung ist ferner die Veränderungen an den Wänden der Hohlorgane (insbesondere den Darmwänden), welche weicher und dünner werden. Dies ermöglicht der Darmflora, sich im Körper auszubreiten und die Zersetzung der Leiche zu unterstützen. Mit dem Eingreifen der Bakterien in den Abbauvorgang wird nun von einem Fäulnisprozess gesprochen.

Während der intensiven Fäulnisphase ist die biochemische Aktivität so stark erhöht, dass es in der Leiche zu einem Temperaturanstieg kommt. Diese Temperaturentwicklung wirkt sich wiederum aktivitätssteigernd auf die Enzyme und Mikroorganismen aus. Die Verflüssigung des Weichgewebes wird beschleunigt, wobei sich ein Teil der freiwerdenden Flüssigkeit in den Hohlorganen ansammelt. Aufgrund der Gasbildung des Bakterienstoffwechsels baut sich im Körper zudem ein Binnendruck auf, der die Hohlorgane zusammenpresst und die darin angesammelte Flüssigkeit durch die Körperöffnungen nach aussen drängt. Auf diese Weise findet eine Entwässerung der Leiche statt. Mit dem zunehmenden Flüssigkeitsverlust in der Leiche nehmen die aeroben Verwesungsprozesse zu, die zur vollständigen Skelettierung führen.

Wenn Pflanzen und Tiere sterben, dienen ihre Körper andern Organismen als Nahrungsressource. Aus diesem Auf- und Abbau von organischer Substanz ergibt sich ein Kreislauf der Nährstoffe, der den Tod in einem fortwährenden Zyklus an das Leben bindet. Die Aktivitäten der Mikroflora und der Detritivoren (tierische Konsumenten toten Materials) sind dabei eng miteinander verzahnt und oft synergistisch,<sup>1</sup> wodurch bedeutend an Abbaueffizienz gewonnen wird. Dieser Effizienzgewinn und somit die schnelle Rückführung der Nährstoffe an die Pflanzenwelt ist für die Fruchtbarkeit eines Ökosystems von grosser Bedeutung.

Beim Menschen ergibt sich durch die Inhumation der Leiche eine gewichtige Abweichung zum obgenannten Abbauprozess der Natur. Durch die Sargbestattung in relativ grosser Bodentiefe bietet sich den Detritivoren eine schlechte Zugänglichkeit zur Leiche. Oft erfolgt deshalb die Zersetzung alleine durch die körpereigenen Enzyme (Autolyse) und während der Fäulnis- und Verwesungsphase durch die im Körper angesiedelten Mikroorganismen (vor allem Darmbakterien). Dieser Umstand trägt zu einer langsamen Zersetzungsrate der Leiche bei. Auf den Nährstoffkreislauf der Natur zeitigt dies allerdings keine Auswirkungen, hierfür besteht ein menschlicher Körper im Vergleich zum Nährstoffumsatz eines hiesigen Ökosystems aus zuwenig organischer Substanz (vgl. Kap. 1.1. Zusammensetzung des Menschen und Kap. 4.3.3. Quantitative Vergleiche).

### 1.1. Zusammensetzung des Menschen

Die Zusammensetzung eines Körpers wirkt sich auf seine Zersetzbarkeit aus. Bei SCHMIDT (1969) wird z.B. der Magerkeit eine fäulnishemmende Wirkung zugeschrieben.<sup>2</sup> Des weitem interessiert die Zusammensetzung des Körpers, um Anhaltspunkte über die entstehenden Abbauprodukte zu erhalten. In den Tabellen 1.1 bis 1.3 sind verschiedene Informationen zum stofflichen Aufbau des Menschen zusammengestellt, die teils auf den Analyseresultate eines einzelnen Körpers basieren (Tab. 1.2), teils sich auf einen gemittelten "Standardmenschen" beziehen (Tab. 1.1 und 1.3).

Organ	Gewicht (in g)
Fett	10'000
Muskeln	30'000
Skelett:	
Knochen	7'000
Rotes Knochenmark	1'500
Weisses Knochenmark	1'500
Blut	5'400
Magendarmkanal (ohne Inhalt)	2'000
Lungen	1'000
Leber	1'700
Niere	300
Milz	150
Pankras	70
Schilddrüse	20
Testes	40
Herz	300
Lymphdrüsen	700
Gehirn	1'500
Rückenmark	30
Blase	150
Speicheldrüse	50
Augen	30
Zähne	20
Prostata	20
Nebennieren	20
Thymusdrüse	10
Haut	2'100
Bindegewebe	4'100

Tab. 1.1: Gewichtsverteilung beim "Standardmenschen" (Gesamtkörpergewicht rund 70 kg). Quelle: SCHMIDT (1969): S. 202

	Prozent vom Körpergewicht	Wasser (%)	Ätherextrakt (%)	Rohprotein (%)
Haut	7.8	64.7	13.0	22.2
Skelett	14.8	31.8	17.2	18.9
Zähne	0.1	5.0		23.0
Quergestreifte Muskulatur	31.6	79.5	3.4	16.5
Gehirn, Rückenmark	2.5	73.3	12.7	12.1
Leber	3.4	71.5	10.4	16.2
Herz	0.7	73.7	9.3	15.9
Lungen	4.2	83.7	1.5	13.4
Milz	0.2	78.7	1.2	17.8
Nieren	0.5	79.5	4.0	14.7
Pankreas	0.2	73.1	13.1	12.7
Darmtrakt	2.1	79.1	6.2	13.2
Fettgewebe	13.6	50.1	42.4	7.1
Übriges Gewebe	17.4	75.5	12.3	14.0
Darminhalt	0.8			
Galle	0.2			
Haare	0.03			

Tab. 1.2: Chemische Zusammensetzung des menschlichen Körpers gemäss der Analyse einer 70.55 kg schweren Leiche. Quelle: SCHMIDT (1969): S. 202

Element	Anteil am Gesamtkörpergewicht (in %)	Gesamtgewicht (in g)
Sauerstoff	65.0	45'500
Kohlenstoff	18.0	12'600
Wasserstoff	10.0	7'000
Stickstoff	3.0	2'100
Calcium	1.5	1'050
Phosphor	1.0	700
Schwefel	0.25	175
Kalium	0.2	140
Natrium	0.15	105
Chlor	0.15	105
Magnesium	0.05	35
Eisen	0.006	4
Kupfer	0.0002	0.1
Mangan	0.00003	0.02
Jod	0.00004	0.03
Total	99.3	69'514.2

Tab 1.3: Chemische Zusammensetzung des Körpers eines "Standardmenschen" (Gesamtkörpergewicht rund 70 kg). Quelle: SCHMIDT (1969): S. 203

Die quantitativ wichtigste Substanz im menschlichen Körper ist das Wasser, dessen Anteil sich mit den Angaben aus der Tabelle 1.2 auf 65 Prozent berechnen lässt. Das Trockengewicht der analysierten Leiche (70.55 kg Frischgewicht) beträgt demnach knapp 25 kg. Bei BERG wird demgegenüber ein Trockengewicht des menschlichen Körpers von 14 kg angenommen.<sup>3</sup> Auf ein Körpergewicht von ebenfalls 70.55 kg gerechnet, ergäbe dies einen Wasseranteil von 80 Prozent. Die Variationsbreite des Wassergehaltes muss demnach als gross angenommen werden. Als einen Grund hierfür kann die mit dem Alter und dem Ernährungszustand sich verändernde Verteilung von Muskulatur (ca. 80 Prozent Wasseranteil) und Fett (ca. 50 Prozent Wasseranteil) gesehen werden.<sup>4</sup> Ausserdem scheint der Wassergehalt der Knochen stark variieren zu können.<sup>5</sup>

Die Proteine stellen im Mittel die wichtigste organische Stoffklasse dar. Die Bedeutung der Proteine ist auf den relativ hohen durchschnittlichen Gehalt an Muskelmasse im menschlichen Körper von gut 40 Prozent zurückzuführen (vgl. Tab. 1.1). Der Fettgehalt dürfte allerdings oft nicht viel kleiner sein und bei beliebteren Körpern sogar die grösste organische Körperfraktion ausmachen. Proteine und Lipide nehmen zusammen aber klar den überwiegenden Anteil der organischen Substanz ein.

Bei den anorganischen Bestandteilen fällt zunächst der grosse Anteil an Calcium auf, das einen wichtigen Bestandteil des Knochenmaterials darstellt (vgl. Tab. 1.3). Im Skelett bleibt das Calcium aber über eine lange Zeitdauer gebunden. Bei Untersuchungen der Bodenlösung unterhalb von Leichen wies bei den Alkali- und Erdalkalimetallen deshalb das Kalium die grösste Konzentration auf, vor Natrium, Calcium und Magnesium.<sup>6</sup>

## 1.2. Autolyse

Mit dem Eintritt des Todes werden nicht sämtliche Vorgänge im Körper eingestellt. Viele der körpereigenen Enzyme bleiben über den Tod hinaus aktiv und katalysieren weiterhin verschiedene chemische Umsetzungen wie Glykolyse, Ringspaltung, Lactonbildung oder die Eiweisspaltung.<sup>7</sup> Der Proteinabbau endet dabei in der Regel mit der hydrolytischen Spaltung von Peptidketten (Proteolyse). Es tritt hingegen keine Aminosäurespaltung auf.<sup>8</sup> Die Umwandlungsprozesse durch die körpereigenen Enzyme werden als Autolyse oder Selbstauflösung bezeichnet.

Rasch nach dem Tode setzt im Gewebe, in den Organen und in den Körperflüssigkeiten eine Säuerung ein. Unter anderem durch die glykolytische Milchsäurebildung sinkt der pH von einem Ausgangswert von ungefähr 7.4 bis unterhalb 6.<sup>9</sup> Ebenfalls bereits in den ersten Stunden nach dem Tode vollzieht sich im Körper eine tiefgreifende Wandlung der supramolekularen Strukturen.<sup>10</sup> Durch die autolytischen Auflösungsprozesse beginnen die Zellmembranen durchlässig zu werden. Diffusionserscheinungen zwischen Zellinhaltsstoffen und interzellulären Substanzen treten auf.<sup>11</sup> Morphologisch ergibt sich eine allgemeine Verflüssigung des Weichgewebes. Auch werden die Wände der Hohlorgane und das Bindegewebe weicher und dünner.<sup>12</sup> Ziemlich intakt bleibt aber die Aussenhaut. Nur die Zellen der Epidermis (Oberhaut) werden in relativ kurzer Zeit zerstört.<sup>13</sup> Die Kollagenfasern der Dermis (Lederhaut) und das Speicherfettgewebe der Subcutis (Unterhaut) gehören hingegen zu den gegenüber der Autolyse stabilsten Körperstrukturen.<sup>14</sup>

Einen wichtigen Anteil an den autolytischen Veränderungen haben die lysosomatischen Enzyme. Die Lysosomen sind die Verdauungsorgane der Körperzellen.<sup>15</sup> Sie enthalten grosse Mengen an Enzymen, insbesondere eiweisspaltende Proteasen und fettspaltende Lipasen. Zu Lebzeiten reinigen die Lysosomen die Zellen von Fremdkörpern und überflüssig gewordenen Zellbestandteilen und bauen diese zu Aminosäuren, Fettsäuren und Glucose ab. Nach Eintritt des Todes werden die Lysosommembranen durchlässig, was zur Entleerung der Enzyme in die Zelle und zum Abbau der Zellinhaltsstoffe führt.<sup>16</sup>

Die Geschwindigkeit der autolytischen Prozesse hängt wesentlich von der Temperatur ab. Das Aktivitätsoptimum der meisten Enzyme liegt zwischen 34 und 40°C.<sup>17</sup> Durch Kühlung der Leiche lassen sich deshalb die Abbauprozesse des Körpers hinauszögern. Durch Balsamierung, das heisst durch die Behandlung der Leiche mit gerbenden Stoffen zur Ausfällung der autolytisch wirksamen Enzyme, lässt sich der Zersetzungsprozess des Körpers verzögern, nicht aber verhindern.<sup>18</sup> Dieselbe Wirkung können Enzymgifte wie beispielsweise Cyanide haben. Bei DALDRUP<sup>19</sup> ist ein Todesfall aufgeführt, der sich auf eine Cyanidvergiftung zurückführen liess. Obwohl der Leichenfund erst 230 Stunden nach dem Todeseintritt erfolgte, konnte in der Wohnung kein "Leichengeruch" wahrgenommen werden.

### 1.3. Fäulnis und Verwesung

Zu Lebzeiten beschränkt sich die Ansiedelung von Mikroorganismen weitgehend auf die mit der Aussenwelt in direktem Kontakt stehenden Körperpartien wie Haut, Mundhöhle, Atmungs-, Genital- und Darmtrakt. Insbesondere der Dickdarm weist dabei mit  $10^{11}$  Zellen pro Gramm Darminhalt eine aussergewöhnlich hohe Bakteriendichte auf.<sup>20</sup> Nicht zu finden sind Mikroorganismen in aller Regel in den Organen sowie im Blut- und Lymphsystem.<sup>21</sup> Das autolytisch-bedingte Durchlässigwerden von Wänden und Membranen begünstigt die post-mortale Ausbreitung der Mikroorganismen. Vor allem vom Bauchraum ausgehend verteilen sie sich im ganzen Körper und leiten die Fäulnisphase ein. Die Darmbakterien, die zu Lebzeiten dem Menschen bei der Nahrungsverdauung beistanden, verdauen nun den Körper selbst. Die Fäulnisflora besteht dabei hauptsächlich aus Kolibakterien, Hefe- und Schimmelpilzen, Staphylokokken, Streptokokken, Proteusstämmen, *Bacillus subtilis*, *Bacillus mesentericus*-Arten, *Micrococcus albus liquefaciens*, *Micrococcus pyogenes*, *Clostridium perfringens*, *Bacillus putrificus* und *Amylobacter*.<sup>22</sup>

Durch die Bakterientätigkeit verändert sich das physikalisch-chemische Milieu im Körper. Hiervon betroffen ist zunächst die Protonenkonzentration: Nach einer kurzdauernden autolytisch-bedingten Säuerung tritt in der Fäulnisphase eine über Wochen anhaltende Alkalisierung ein, wobei die pH-Werte im allgemeinen kleiner als zehn bleiben.<sup>23</sup> Weiter führt der Fäulnisprozess zu einem Wiederanstieg der Körpertemperatur und zur Gasbildung im Körper.<sup>24</sup> Durch die Veränderungen in der Leiche steigert sich die Aktivität der körpereigenen Enzyme. Wie gross der Beitrag am Leichenabbau ist, der auf die Stoffwechsellätigkeit der Bakterien zurückgeführt werden kann, und von welcher Bedeutung die körpereigenen Enzyme sind, ist noch unvollständig geklärt.<sup>25</sup>

In der Fäulnisphase läuft vorwiegend ein anaerober Zersetzungsprozess ab. Das Reaktionsspektrum ist dabei im Vergleich zur Autolyse wesentlich breiter. Dies hängt einerseits mit der Vielfalt an Enzymen zusammen, die nebst den körpereigenen nun auch diejenigen bakterieller Herkunft umfasst. Andererseits begünstigen die oben erwähnten Veränderungen bezüglich Leichtemperatur und Protonenkonzentration den Abbauprozess. Für den Proteinabbau bedeutet dies, dass nicht nur mehr eine Proteolyse stattfindet, sondern dass nun auch die freigesetzten Aminosäuren abgebaut werden. Mit der Desaminierung und der Decarboxylierung stehen hierzu hauptsächlich zwei Abbauprozesse zur Diskussion. Experimente von

DALDRUP haben ergeben, dass die Decarboxilierungsprodukte der Aminosäuren in der Regel nur gefunden wurden, wenn der pH-Wert deutlich zum Säuren hin verschoben war. Dagegen führten im alkalischen Bereich die desaminierenden Abbaureaktionen zu einem schnellen und vollständigen Abbau der freien Amine und Aminosäuren.<sup>26</sup>

In faulenden Organen wurden folgende Aminosäureabbauprodukte gefunden:<sup>27</sup>

*nur selten oder sporadisch aufgefundene Amine:*

**Agmatin** (aus Arginin),  **$\beta$ -Phenyläthylamin** (aus Phenylalanin), **Isoamylamin** (aus Leucin)

*regelmässig, meist aber erst nach fortgeschrittener Fäulnis und in saurem Milieu aufgefunden Amine:*

**Putrescin** (aus Ornithin), **Cadaverin** (aus Lysin), **Tyramin** (aus Tyrosin), **Äthanolamin** (aus Serin)

*Aminosäuren mit zersetzungsdauerabhängigen Konzentrationsänderungen:*

**Ornithin** (aus Arginin),  **$\alpha$ -Aminobuttersäure** (aus Glutaminsäure),  **$\nu$ -Aminobuttersäure** (aus Glutaminsäure),  **$\delta$ -Aminovaleriansäure** (aus Prolin oder Ornithin)

*regelmässig gefundene Aminosäuren:*

**$\beta$ -Alanin** (aus Asparaginsäure), **Taurin** (aus Cystein)

*vereinzelt nachgewiesene Aminosäure:*

**Urocaninsäure** (aus Histidin)

*weitere Aminosäureabbauprodukte:*

**Ammoniak** (steiler Konzentrationsanstieg, bereits wenige Stunden nach Eintritt des Todes), **Harnstoff**

Nach den Proteinen ist das Fett die zweitwichtigste Stoffklasse des menschlichen Weichgewebes. Die Fette werden durch die Enzyme Lipase, Esterase und Hydrolase gespalten,<sup>28</sup> wobei aus den Neutralfetten Glycerin und Fettsäuren, aus den Phosphatiden ausserdem Cholin, Colamin und Phosphorsäure freigesetzt werden.<sup>29</sup> Obwohl die Fettsäuren sehr energiereiche Verbindungen sind, stellt deren Abbau dennoch einen kritischen Punkt innerhalb der Leichenzersetzung dar. Durch  $\beta$ -Oxidation können diese zu kürzeren Fettsäuren abgebaut werden. Am Ende der Fäulnisphase lassen sich dann als Abbauprodukte oft Capron- und Buttersäure und vermutlich auch Essigsäure finden.<sup>30</sup> Unter ungünstigen Bedingungen bleiben die langkettigen Fettsäuren aber nicht nur erhalten, sie vermögen ausserdem den Fäulnisprozess zu unterbinden. Auf die möglichen Hintergründe dieses Phänomens wird im Kapitel 2 (Fettsäurekonservierung) ausführlich eingegangen. Eine Zusammenstellung der Leichenkatabolite ist im Anhang C aufgeführt.

Die autolytische Verflüssigung des Weichgewebes wird während des Fäulnisprozesses zunächst fortgeführt und sogar intensiviert. In einem zweiten Stadium geht die Fäulnis sodann mit einem weitgehenden Flüssigkeitsverlust des Körpers einher. Erst wenn dieser Schritt erfolgt ist, setzt mit dem oxidativen Zerfall der verbleibenden Gewebsreste der Endabbau der Leichenzersetzung ein. Die Entwässerung des Körpers erfolgt in zwei Etappen:

1. Zuerst sammeln sich an verschiedenen Orten im Körper Flüssigkeiten an:<sup>31</sup> In den Brusthöhlen können 500 und mehr Milliliter Fäulnisflüssigkeit angetroffen werden. In der Bauchhöhle wiederum sammelt sich nach der Erweichung der Magenwand der

Mageninhalt zusammen mit verflüssigtem Fett und wässrigen Ausschwitzungen an. Ferner kann sich auch in den Fäulnisblasen der Haut unter Umständen sehr viel Flüssigkeit ansammeln (je 100 ml und mehr). Diese Fäulnisflüssigkeiten enthalten unterschiedliche Mengen an Proteinen und deren Abbauprodukte, Fette und Fettsäuren sowie zahlreiche weitere Bestandteile des Körpers und der Leichenflora.<sup>32</sup>

2. In einem zweiten Schritt werden die angesammelten Fäulnisflüssigkeiten aus dem Körper hinausgetrieben. Dies erfolgt durch eine starke, fäulnisbedingte Gasentwicklung (vor allem Methan und andere Kohlenwasserstoffe, Ammoniak, Schwefelwasserstoff und Kohlendioxid), was zu einer Auftreibung der Leiche führt. In kurzer Zeit können hierdurch im Körper erhebliche Binnendrucksteigerungen erzeugt werden.<sup>33</sup> Dabei werden Darm, Magen und die Bauchhöhle zunehmend ausgepresst. Das Leichenblut gelangt durch Kompression der Blutgefäße zum Herzen und von dort in die Lungen. Durch den Ausfall der Membranfunktion an der Grenze von Lungenbläschen und Blutgefäßen wird das Blut zusammen mit meist vorhandener Lungenflüssigkeit teils aus den Atemöffnungen ausgetrieben, teils auch durch die Lungenoberfläche gepresst. Das meiste Blut aber tritt nach stärkerer Fäulnis auf diesem Wege aus Mund und Nase aus.<sup>34</sup> Ferner werden durch den Gasdruck auch Blase, Darm, Magen und bei bereits erweiterten Geburtswegen sogar die Gebärmutter ("Sarggeburt") entleert.<sup>35</sup>

Mit dem weitgehenden Flüssigkeitsverlust der Leiche nehmen die aeroben Abbauprozesse zu: Die Fäulnis wird allmählich von der Verwesung abgelöst. In dieser Phase der Leichenzersetzung soll sich oft eine Spätform der Leichenflora und -fauna ausbilden, worauf in der eingesehenen Literatur aber nicht detaillierter eingegangen wurde.<sup>36</sup> Es finden sich einzig Hinweise auf die Schimmelpilze, welche im Erdgrab regelmässig nach Erreichen des Verwesungsstadiums gefunden werden. Der Schimmelpilzbewuchs kann dabei ausserordentlich dicht und mehr als zentimeterdick werden.<sup>37</sup>

Nebst den Schimmelpilzen werden in der Verwesungsphase vermehrt auch aerobe Bakterien auftreten. Verschiedene Verbindungen, die unter anaeroben Bedingungen sehr stabil sind (z.B. gesättigte aliphatische und aromatische Kohlenwasserstoffe), sollten in dieser Spätphase der Leichenzersetzung aerob abbaubar sein. Mit der Verwesung wird die vollständige Skelettierung der Leiche erreicht. Im Boden verbleiben im wesentlichen Huminsäuren, Knorpel- und Bindegewebsresten sowie das Skelett, welches noch im Knochenmark eingelagerte organische Bestandteile aufweisen kann.<sup>38</sup>

## 1.4. Zeitbedarf

Unter "Normalbedingungen", d.h. in einem wasserdurchlässigen, durchlüfteten Boden, dauert die Leichenzersetzung in einem Erdgrab zwischen 5 und 7 Jahre.<sup>39</sup> Die Bandbreite der möglichen Zersetzungszeiten ist aber gross und geht von einigen Wochen (an der Erdoberfläche bei warmer Umgebungstemperatur) bis weit über 100 Jahre (z.B. bei Fettsäurekonservierung). Auf einige der Faktoren, die sich auf die Leichenzersetzungsrate auswirken, wird im folgenden eingegangen.

### 1.4.1. Insekten

Ein stark zersetzungsbeschleunigender Einfluss geht vom Tierfrass aus. Dabei ist vor allem die Bedeutung der Insektenlarven hervorzuheben.<sup>40</sup> Fliegenmaden sind imstande, bei entsprechenden Bedingungen (gute Zugänglichkeit zur Leiche und günstige Temperaturen) den Hauptanteil an der Weichteilzerstörung zu tragen. Bestimmte Fliegenarten (vor allem *Musca domestica*, *Musca corvina*, *Muscina stabulans* und *Muscina pabulorum*) legen bald nach Eintritt des Todes ihre Eier an der Leiche ab. Bevorzugte Körperpartien sind gut zugänglich und feucht, wozu namentlich die Lidspalten, Augwinkel, die Nasenlöcher und Mundwinkel, ferner etwaige Wunden gehören. Unter günstigen Bedingungen schlüpfen die ersten Larven nach 10 bis 24 Stunden aus und fressen sich durch die weichen Schleimhäute in die Tiefe des Körpers.

Die Insektenlarven können eine Leiche aber auch im Boden besiedeln. In einer Versuchsanordnung beobachteten RODRIGUEZ/BASS (1985) die Zersetzungs Vorgänge von sechs sarglos bestatteten Leichen auf einem Untersuchungsgelände in Tennessee (USA). Die Bestattungen erfolgten innerhalb 48 Stunden nach dem Todeseintritt. Während dieser Zeit wurden aasfressende Insekten von den sechs Leichen ferngehalten. Zu den Leichen 1 bis 6, deren Bestattungen in unterschiedlichen Jahreszeiten und Bodentiefen erfolgten, sind im Anhang A die wichtigsten Daten und Beobachtungen in einer Übersicht dargestellt.

Bei den Leichen 1 und 2, die in 1.2 respektive 0.6 Meter Tiefe bestattet wurden, konnten am Körper keine Insekten gefunden werden. Nur bei einer Grabsohlentiefe von 0.3 Meter (Leichen 3 bis 6) vermochten saprophage Insekten (Fliegenarten aus der Insektenordnung der Dipteren) die Leichen zu orten und diese zu besiedeln. In der Leiche 3, die im August bestattet wurde, konnte dabei eine grössere Insektenaktivität festgestellt werden als bei den im Winterhalbjahr bestatteten Leichen 4 bis 6. Aus dem Vergleich des Zustandes der Leichen 2 und 3 lässt sich die Bedeutung der Insektenaktivität ersehen. Während die Leiche 3 bereits nach drei Monaten stark zersetzt ist, zeigt die Leiche 2 nach sechs Monaten erst wenige Zersetzungsanzeichen. Dieser Vergleich veranschaulicht die Wirkung der Insektenaktivität insofern gut, da mit der Ausgangstemperatur der zweite wichtige Faktor bei beiden Leichen in etwa übereinstimmt.

Die Aktivität der Aasinsekten hängt im wesentlichen von der Bestattungstiefe und dem Bestattungsdatum ab. In Schweizer Friedhöfen wird meist in Tiefen von 1.5 bis 2 Meter bestattet. Für eine Besiedlung mit Insekten im Grab sind die Bedingungen demzufolge ungünstig, zumal auch der Sarg den Zugang zur Leiche erschwert. Allerdings wurden Collembolen (Springschwänze) in einem Gräberfeld auch schon in 2 Meter Tiefe vorgefunden, währenddem ihr normaler Lebensraum in den obersten 10 Zentimeter des Bodens liegt.<sup>41</sup> Zu Gesetzmässigkeiten der Grabfauna existieren gemäss BERG nur wenige Mitteilungen, deren Allgemeingültigkeit zudem umstritten ist.<sup>42</sup> Bei Erdbestattungen in grösseren Tiefen wird die Zersetzungstätigkeit der Insekten jedoch - wie vorgängig dargestellt - kaum von grosser Bedeutung sein. Die Zersetzungsdauer wird sich demnach mindestens über einige Jahre hinwegziehen.

### 1.4.2. Temperatur

Hohe Körpertemperaturen führen zu grösseren Leichenzersetzungsraten. Dieser Zusammenhang ist auf die Temperaturabhängigkeit der Bakterien- und Enzymaktivität zurückzuführen

(vgl. Abb 2.3). Bis zum Anbruch der intensiven Fäulnis wird die Körpertemperatur dabei massgeblich von der Bodentemperatur bestimmt. Nach Eintritt des Fäulnisprozesses steigt infolge der biochemischen Aktivität die Leichentemperatur über das Temperaturniveau des Bodens an. Der mittlere Temperaturanstieg kann dabei als Mass für die Stärke des Fäulnisprozesses betrachtet werden.

Welche Wirkung von der Bodentemperatur auf die Zersetzungsrates ausgeht, kann bei der Versuchsanordnung von RODRIGUEZ/BASS (1985) beim Vergleich der Leichen 1 und 2 ermessen werden (vgl. Daten im Anhang A). Der mittlere Temperaturanstieg ist bei der Leiche 2 um 1.6°C grösser als bei der Leiche 1. Die Zersetzung ist dementsprechend bei der Leiche 2 weiter fortgeschritten. Die Ursache dieses stärkeren Fäulnisprozesses dürfte dabei hauptsächlich auf die um 7°C höhere Ausgangstemperatur zurückzuführen sein. Nach dem Abklingen der intensiven Fäulnisphase wird die Körperwärme wieder massgeblich von der Bodentemperatur bestimmt.<sup>43</sup> Detailliertere Ausführungen zur Auswirkung der Temperatur auf einen bakteriellen oder enzymatischen Abbauprozess folgen im zweiten Kapitel (vgl. Kap. 2.5.2. Körpertemperatur).

### 1.4.3. Chemikalien und Medikamente

Verschiedene Chemikalien und Medikamente wirken sich negativ auf die Zersetzungsrates aus. Bereits weiter oben Erwähnung fanden die Cyanide, die als Enzymgift sowohl die Autolyse wie auch die Fäulnis beeinträchtigen. Weitere Enzymgifte und bakterizide Stoffe können hier als zersetzungshindernd angeführt werden wie Kohlenmonoxid, Flusssäure, Strychnin, Cicutoxin, Desinfizienzien und Antibiotika.<sup>44</sup> Die Antibiotika sollen hier aufgrund ihrer grossen Verbreitung und ihrer spezifisch bakteriziden Wirkung als Beispiel herausgegriffen und ihren Einfluss auf den Zersetzungsprozess näher betrachtet werden.

Nach Antibiotikabehandlungen wurden zum Teil erhebliche Verzögerungen der postmortalen Zersetzungsvorgänge festgestellt.<sup>45</sup> Aufgrund ihrer antibakteriellen Wirkung wäre es nahelegend anzunehmen, dass diese Verzögerungen auf eine Hemmung der Leichenflora zurückzuführen ist. Für einen solchen Verlauf scheint es allerdings keine hinreichenden Hinweise zu geben. Gemäss WAGNER (1960) waren die Antibiotika mit den damaligen Analysemethoden im allgemeinen bereits nach 6 bis 8 Tage postmortem nicht mehr nachweisbar.<sup>46</sup> Ein spezifisch antibakterieller Effekt kann er deshalb allenfalls für die ersten 8 Tage postmortem bejahen.<sup>47</sup> Andere Wirkungen der Antibiotika auf den Organismus müssen gefunden werden, die als Erklärung für die Verzögerungen im Zersetzungsprozess herhalten können. Nach WAGNER handelt es sich dabei um einen "unspezifischen" Einfluss auf die Stoffwechselfvorgänge des Gewebes.<sup>48</sup> Eine genauere Beschreibung dieses Einflusses liess sich in der eingesehenen Literatur jedoch nicht finden.

Nach BERG konnten in Tierversuchen zwar durch hohe Streptomycindosen, noch eindeutiger durch prämortale Tetracyclinbehandlung, eine gewisse Fäulnishemmung, aber keine Hemmung des Keimwachstums erzielt werden.<sup>49</sup> Für die Bestattungspraxis scheint für ihn die Antibiotikaverabreichung aber aus Dosierungsgründen, mehr noch wegen des raschen Wirkungsverlustes und Abbaus, keine grosse Bedeutung zu haben.<sup>50</sup> Den Wirkungsverlust im belebten Körper bestätigt ein Experiment mit Penicillin G, das gezeigt hat, dass 60 Prozent der Dosis bereits innerhalb von fünf Stunden über den Urin wieder ausgeschieden wird.<sup>51</sup>

Zur Gesamtwirkung der Antibiotika auf die Leichenzersetzung lässt sich mit den vorliegenden Informationen kein einheitliches Bild gewinnen. Der schnelle Wirkungsverlust der Antibiotika scheint zwar unbestritten zu sein, worauf sich die positive Prognose von BERG bezüglich der Leichenzersetzung abstützt (siehe oben). Fraglich bleiben aber die Auswirkungen der "unspezifischen" Einflüsse auf die Bestattungspraxis. Bei einer Frau, die vor ihrem Tode mit Antibiotika behandelt worden ist (während 15 Tage mit Supracillin und später während 7 Tage alle 6 Stunden eine Kapsel Achromycin), fand etwa 13 Monate post-mortem eine Exhumation und Obduktion statt. Dabei zeigten sich die inneren Organe in einem auffallend guten Erhaltungszustand, währenddem das Äussere der Leiche mit einem ausgedehnten weisslichen Schimmelpilzrasen bedeckt war.<sup>52</sup> Die gute Konservierung der inneren Organe weist auf eine geringe autolytische Auflösung des Gewebes hin. Dies liesse sich mit den "unspezifischen" Einflüssen auf die Stoffwechselfvorgänge in Übereinstimmung bringen, wie sie von Wagner postuliert worden sind (siehe oben). Der Nachweis eines kausalen Zusammenhanges mit der Antibiotikaverabreichung muss allerdings noch erbracht werden. In der neueren Literatur sollten hierzu weitere Informationen auffindbar sein. Zudem ist zu untersuchen, über welchen Zeithorizont sich eine solche allfällige Zersetzungshemmung hinziehen kann.

#### 1.4.4. Mumifikation

Durch die Austrocknung des Weichgewebes werden bei der Mumifikation die Fäulnisvorgänge und somit die Leichenzersetzung gestoppt. Das wesentlichste Moment für die frühzeitige Austrocknung ist das Vorhandensein bewegter Luft, welche rasch zur Ausdunstung der Feuchtigkeit führt.<sup>53</sup> Mumifikation bei bestatteten Leichen kann vor allem in Sandgräbern heisser Zonen oder in Gräften und trockenen Gewölben auftreten.<sup>54</sup> Die Mumifikation als Zersetzungsstörung ist in unseren Breitengraden aber höchst selten.

### Offene Fragen

- Welche Bedeutung kommt den Bakterien innerhalb der Zersetzungsprozesse zu, verglichen mit der Abbautätigkeit der körpereigenen Enzyme?
- Welche Bakterienstämme sind für die Leichenzersetzung von besonderer Bedeutung?
- Zeigen diese Arten gegenüber tiefen Temperaturen unterschiedliche Empfindlichkeiten auf? Können durch länger anhaltende tiefe Temperaturen wichtige Fäulnisbakterien vollständig verschwinden?
- Findet im Verlaufe der Leichenzersetzung eine Sukzession der Mikroorganismen statt?
- In welchem Temperaturbereich läuft die Leichenzersetzung optimal ab?

- <sup>1</sup>Begon (1991): S. 426  
<sup>2</sup>Schmidt (1969): S. 193. Vgl. hierzu die Diskussion im Kapitel Fettsäurekonservierung: Fettreichtum und Fettverteilung  
<sup>3</sup>Berg (1975): S. 88  
<sup>4</sup>vgl. Schmidt (1969): S. 201  
<sup>5</sup>a.a.O.  
<sup>6</sup>vgl. Vass (1992): S. 1244  
<sup>7</sup>Schmidt (1969): S. 190  
<sup>8</sup>vgl. Berg (1975): S. 63  
<sup>9</sup>vgl. Schmidt (1969): S. 191 und Daldrup (1978): S. 11  
<sup>10</sup>Schmidt (1969): S. 190  
<sup>11</sup>a.a.O.  
<sup>12</sup>a.a.O.  
<sup>13</sup>vgl. Berg (1975): S. 67  
<sup>14</sup>vgl. Schmidt (1969): S. 190  
<sup>15</sup>vgl. Schmidt (1983): S. 32 f.  
<sup>16</sup>Dorn/Hopkins (1985): S. 198 f. Vgl. auch Schmidt (1983): S. 33  
<sup>17</sup>Berg (1975): S. 63  
<sup>18</sup>Mann (1990): S. 108  
<sup>19</sup>Daldrup (1978): S. 39 (Nr. 15)  
<sup>20</sup>Schlegel (1992): S. 578  
<sup>21</sup>vgl. Brock (1991): S. 388  
<sup>22</sup>Daldrup (1978): S. 4  
<sup>23</sup>Schmidt 1969): S. 209  
<sup>24</sup>vgl. Berg (1975): S. 68 f.  
<sup>25</sup>vgl. Berg (1975): S. 67 f.  
<sup>26</sup>Daldrup (1978): S. 41  
<sup>27</sup>Daldrup (1978): S. 231 f.  
<sup>28</sup>Schmidt (1969): S. 193  
<sup>29</sup>Berg (1975): S. 71  
<sup>30</sup>a.a.O.  
<sup>31</sup>vgl. Schmidt (1969): S. 198  
<sup>32</sup>Schmidt (1969): S: 198  
<sup>33</sup>Berg (1975): S. 75  
<sup>34</sup>Schmidt (1969): S. 197  
<sup>35</sup>a.a.O., vgl. auch Berg (1975): S. 75  
<sup>36</sup>vgl. Berg (1975): S. 79  
<sup>37</sup>Schmidt (1969): S. 194  
<sup>38</sup>vgl. Schmidt (1969): S. 194  
<sup>39</sup>Berg (1975): S. 93  
<sup>40</sup>vgl. hierzu Berg (1975): S. 80 ff.  
<sup>41</sup>Janaway (1987): S. 131 f.  
<sup>42</sup>Berg (1975): S. 85  
<sup>43</sup>vgl. Rodriguez/Bass (1985): S. 841 f.  
<sup>44</sup>Schmidt (1969): S. 193  
<sup>45</sup>vgl. Wagner (1961): S. 573  
<sup>46</sup>Wagner (1960): S. 719  
<sup>47</sup>Wagner (1961): S. 573  
<sup>48</sup>vgl. Wagner (1961): S. 580  
<sup>49</sup>Berg (1975): S. 69  
<sup>50</sup>a.a.O.  
<sup>51</sup>Brock (1994): S. 427  
<sup>52</sup>Reh (1960): S. 720 f.  
<sup>53</sup>Berg (1975): S. 87  
<sup>54</sup>a.a.O.

## 2. FETTSÄUREKONSERVIERUNG

### Zusammenfassung

Der Vorgang der Fettsäurekonservierung (Adipocirebildung) wurde bis anhin nie systematisch untersucht und ist deshalb nicht vollständig verstanden. Aus Einzeluntersuchungen und aus einer Vielzahl von Beobachtungen lässt sich dennoch einiges über diesen Prozess aussagen. Die Adipocirebildung bezeichnet eine durch bakterielle Enzyme bewirkte Umwandlung des Fettgewebes, wobei es sich im wesentlichen um die Transformation von ungesättigten in gesättigte Fettsäuren handelt. Mit der fortgesetzten Sättigung verringert sich der Schmelzpunkt des Fettsäuregemisches, was kontinuierlich zu einer Ausfällung der langkettigen Fettsäuren und somit zu einer Fetthärtung führt.

Die Sättigung der Fettsäuren findet allerdings auch im Rahmen der "normalen" Leichenzersetzung statt. Die Weichen in Richtung Leichenzersetzung oder Fettsäurekonservierung werden während des Fäulnisprozesses gestellt. Ein intensiver Fäulnisprozess vermag die gesättigten Fettsäuren abzubauen und so der Fettsäurekonservierung das Substrat zu entziehen. Die Intensität des Fäulnisprozesses und somit die Störungsanfälligkeit der Leichenzersetzung steht im wesentlichen mit der Körpertemperatur in Zusammenhang. Aufgrund der grossen biochemischen Aktivität beginnt sich der Körper nach Eintritt der Fäulnis zu erwärmen, wodurch ein Temperaturgefälle gegenüber dem umgebenden Boden und somit ein von der Leiche wegführender Wärmefluss entsteht. Das Ausmass dieses Wärmetransportes dürfte für den weiteren Verlauf der Leichenzersetzung von entscheidender Bedeutung sein. Bei einer Ansammlung von Körperflüssigkeiten im Sarg - was in vernässten Böden oder in praktisch hermetisch geschlossenen Särgen auftreten kann - verstärkt das freie Wasservorkommen die Wärmewegführung. Als Folge findet die fäulnisbedingte Körpererwärmung nur in einem reduzierten Umfang statt, was die Kraft des Zersetzungsprozesses einschränkt. Insbesondere ist davon auszugehen, dass hierdurch die gesättigten Fettsäuren grossenteils nicht abgebaut werden können. Anstelle des Abbaus findet die oben erwähnte Ausfällung der Fettsäuren statt. Die entstehende feste Lipidmasse, die als Adipocire bezeichnet wird, sowie das darin eingeschlossene Weichgewebe erweisen sich als sehr persistent und können sich über viele Jahrzehnte dem Zersetzungsprozess entziehen.

In einem Hygienebuch von 1912 wird die "Leichenwachsbildung" als abnormer Zersetzungsvorgang bezeichnet, der sich dadurch auszeichnet, dass «mehr oder weniger ausgedehnte Partien der Weichteile, manchmal sogar diese insgesamt in eine weisse oder grauweisse, krümelige, geruchlose oder moderig riechende, sich fettig anfühlende Substanz umgewandelt sind, die ein sehr geringes Gewicht hat und so hart sein kann, dass sie beim Anklopfen klingt.»<sup>1</sup> Die Fettwachsbildung, besser Fettsäurekonservierung, aber auch Adipocire- und Leichenlipidbildung genannt, ist die wichtigste Zersetzungsstörung in unseren Friedhöfen. Ihr Auftreten geht mit einer starken Verringerung der Zersetzungsrate einher. Selbst nach Jahrzehnten Bestattungszeit wurden Fettwachsleichen exhumiert, die so gut erhalten waren, dass sie leicht zu identifizieren gewesen wären.<sup>2</sup> Der Abbau des Leichenlipides kann sich über mehr als 100 Jahre hinwegziehen.<sup>3</sup> Obwohl die Fettwachsbildung als störend empfunden wird und Anstoss zu kostspieligen Friedhofsanierungen gegeben hat, ist hierzu bei Entscheidungsträgern nur wenig an Informationen vorhanden. Es ist ein Ziel dieses Kapitels, genanntem Defizit beizukommen und Erkenntnisse, die in den gerichtsmedizinischen Wissenschaften gewonnen wurden, für die Bestattungsämter und weitere Interessierte zu erschliessen.

## 2.1. Mechanismus

Die Fettsäurekonservierung ist ein langsamer, während Jahren fortlaufender Transformationsprozess des Fettgewebes, der von der Körperhülle ausgehend nach innen fortschreitet.<sup>4</sup> Der Mechanismus ist dabei noch nicht restlos verstanden. Die folgende Zusammenstellung soll einen Einblick geben, wie es zur Adipocirebildung kommen könnte:

1. Während den ersten Tagen nach dem Todeseintritt zerlegen endogene Lipasen die Triglyceride in Fettsäuren und Glycerin.
2. Mit dem Fäulnisprozess breiten sich Darmbakterien im Körper aus.
3. Bakterienenzyme unterstützen die Hydrolyse der Körperfette und damit die Freisetzung von Fettsäuren.
4. Die flüssigen Fettsäuren diffundieren teilweise in das Muskelgewebe und in die inneren Organe.
5. Bakterielle Enzyme katalysieren eine Fettsäuretransformation. Die wichtigste Umsetzung betrifft die Ölsäure, welche mit einer  $\beta$ -oxidativen Kettenverkürzung und anschliessender Hydrierung zu Palmitinsäure umgebaut wird (vgl. Abb. 2.1). Als weniger massgebliche Reaktion kann eine Hydratisierung (eventuell mit zusätzlicher Dehydrierung) zu Hydroxy- (respektive Oxo-) Fettsäure auftreten (vgl. Abb. 2.2). Beide Reaktionswege führen zum Wegfall von Doppelbindungen. Einige der Fettsäuren können ausserdem zu Dimeren und Oligomeren polymerisieren.<sup>5</sup> Diese verschiedenen Vorgänge führen zu einer Fetthärtung.
6. Die Fetthärtung beginnt im subkutanen Fettgewebe von wo sie ins Körperinnere fortschreiten kann.
7. Der Fäulnisprozess, der vom Körperinnern ausgeht, kommt zum Erliegen.
8. Als Resultat bleibt ein Lipidpanzer zurück, der die äussere Form der Leiche mehr oder weniger weitgehend konserviert.<sup>6</sup> Muskelgewebe oder innere Organe können ebenfalls erhalten bleiben, sofern sie durch die flüssigen Fettsäuren durchdrungen und so in den Vorgang der Fettsäurekonservierung einbezogen werden.<sup>7</sup>

Die Punkte 1 bis 3 gehören dem normalen Zersetzungsprozess an. Ohne diese Zersetzungs Vorgänge des Körpers ist keine Fettsäurekonservierung vorstellbar. Mit der Freisetzung von Fettsäuren (Punkte 1 und 3) stellen sie für den Konservierungsprozess das Ausgangssubstrat bereit und mit den bakteriellen Enzyme die Katalysatoren, welche für die chemischen Umwandlungsprozesse notwendig sind. Die eigentliche Adipocirebildung besteht aus der Transformierung der ungesättigten in gesättigte Fettsäuren und somit aus der Hydrierung (u.U. der Hydratisierung) der Doppelbindung. Die Punkte 7 und 8 sind Auswirkungen der Fettsäurekonservierung.

Als wichtigstes beteiligtes Bakterium wird *Clostridium perfringens* vermutet,<sup>8</sup> dessen Enzyme besonders wirkungsvoll zur Fetthärtung beitragen sollen.<sup>9</sup> Ausserdem sind in der Literatur *Staphylococcus albus* und *Proteus vulgaris* als adipocirebildend aufgeführt.<sup>10</sup> Diese Aufzählung erhebt allerdings keinen Anspruch auf Vollständigkeit.

## 2.2. Fetthärtung

Die Ölsäure, anteilmässig die wichtigste Fettsäure im menschlichen Körper (vgl. Tab. 2.1, 2. Spalte), scheint für die Adipocirebildung von besonderer Bedeutung zu sein. Sie wird als die wichtigste Ausgangssubstanz betrachtet. Der wesentliche Prozess der Adipocirebildung dürfte eine durch bakterielle Enzyme katalysierte Fetthärtung sein, das heisst eine Erhöhung des Sättigungsgrades der Fettsäuren. Wie aus der Tabelle 2.1 zu ersehen ist, weisen gesättigte Fettsäuren höhere Schmelzpunkte als ihre ungesättigten Entsprechungen auf.

Die auffälligste Verschiebung in der Fettsäurezusammensetzung während der Adipocirebildung ist die Abnahme der Ölsäure (von 48 auf 22 Prozent), die offensichtlich zur Hauptsache in Palmitinsäure (von 26 auf 53 Prozent) umgewandelt wird. Die aufgeführten Prozentzahlen sind allerdings nur als Momentaufnahmen zu werten. Sie beziehen sich auf die entsprechenden Versuchsbedingungen und vor allem auch auf die verflossene Liegezeit. In

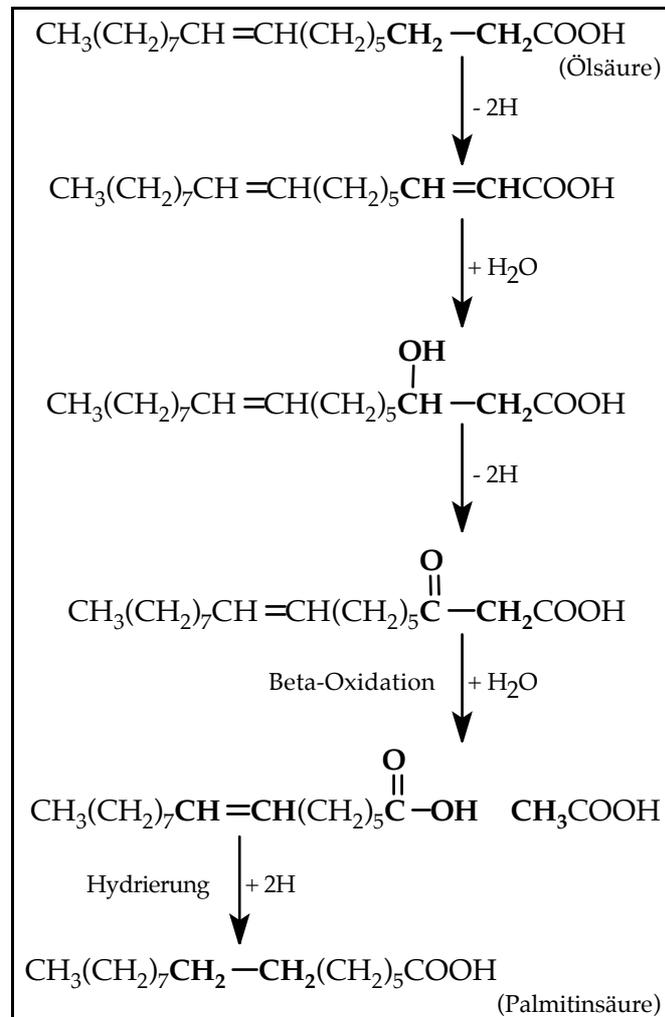


Abb. 2.1: vereinfachtes Reaktionsschema der Umwandlung von Ölsäure in Palmitinsäure. Quelle: BERG (1975): S. 91

der Tat strebt der Ölsäure/Palmitinsäure-Quotient mit zunehmendem Adipocirealter von knapp zwei immer mehr gegen null.<sup>11</sup> Ein plausibler Reaktionsmechanismus für die langsame Umwandlung der Ölsäure in die Palmitinsäure ist in Abbildung 2.1 wiedergegeben.

Der Einfluss dieser Transformation auf den Schmelzpunkt der Fettsäuren ist gross. Wenn nur die jeweiligen Hauptkomponenten betrachtet werden, übersteigt der Schmelzpunkt der neugebildeten Palmitinsäure denjenigen ihrer Vorgängersubstanz um knapp 50°C. Selbstverständlich liegen die Fettsäuren nicht rein vor, sondern sind ineinander gelöst. Der reale Schmelzpunkt ergibt sich somit aus der Zusammensetzung des Fettsäuregemisches.

Nebst der Hydrierung der cis-9-ungesättigten Fettsäuren (z.B. Ölsäure) kann an der Doppelbindung auch eine Hydratisierung mit eventuell anschliessender Dehydrierung auftreten. Eine schematische Darstellung dieser Vorgänge ist in Abbildung 2.2 wiedergegeben.

Aus der Ölsäure bilden sich bei diesem Prozess als Produkte die 10-Hydroxy- und 10-Oxo-Stearinsäure, aus Palmitoleinsäure gehen 10-Hydroxy- und 10-Oxo-Palmitinsäure hervor. In Laborversuchen hat TAKATORI (1987) experimentelle Umsetzungsdaten mit dem Bakterium *Micrococcus luteus* bestimmt. Wie aus der Tabelle 2.2 ersichtlich ist, betreffen die

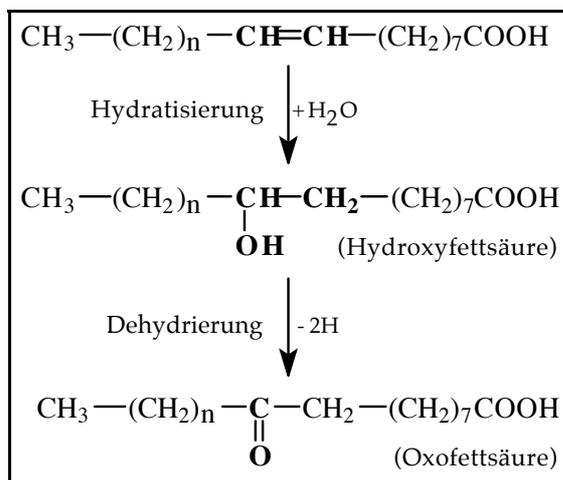


Abb. 2.2: Kurzdarstellung der Bildung von Hydroxy- und Oxo-Fettsäuren. Quelle: TAKATORI (1987): S. 280

wichtigsten Transformationen die Palmitoleinsäure, die zu 56.3 Prozent in der Oxo-Form auftrat und die Ölsäure mit demselben Prozentsatz in der Hydroxy-Form.<sup>12</sup> Die Bildung von 10-Hydroxy- und 10-Oxostearinsäure konnte im Labor ausserdem mit menschlichen Darmbakterien nachgewiesen werden.<sup>13</sup> Die Hydratisierung erfolgte ausschliesslich bei Fettsäuren, die eine cis-9-Doppelbindung aufwiesen. Wie das Beispiel der Linolsäure in Tabelle 2.2 zeigt, verhindert selbst das Vorhandensein einer zweiten Doppelbindung die Dehydrierung und somit die Bildung der Oxo-Form.<sup>14</sup> Die Hydratisierung und Dehydrierung führen ebenfalls zu einer Erhöhung des Schmelzpunktes.

Unter Laborbedingungen sind also zwei Transformationsprozesse der ungesättigten Fettsäuren beobachtet worden. Welcher Reaktionsweg in der Leiche zum Tragen kommt, hängt von den Reaktionsbedingungen und vor allem von den vorhandenen Enzymen ab. Aus verschiedenen chemischen Untersuchungen des Leichenlipides hat sich ergeben, dass die Hydrierung der cis-9-Doppelbindung (Abb. 2.1) gegenüber der Hydratisierung (Abb. 2.2) bedeutend stärker ins Gewicht fallen muss (vgl. nächster Abschnitt).

Fettsäure	Gehalt im subkutanen Fett (frisch) <sup>15</sup> %	experimentelle Adipocire <sup>16</sup> %	Schmelzpunkt <sup>17</sup> °C	Bemerkungen <sup>18</sup>
<i>1. gesättigte Fettsäuren</i>				
Laurinsäure (C <sub>12</sub> H <sub>24</sub> O <sub>2</sub> )	2.0	2.0	43.5	
Myristinsäure (C <sub>14</sub> H <sub>28</sub> O <sub>2</sub> )	6.0	7.0	54.4	Bestandteil fast aller Tierfette (1-5%)
Pentadecylsäure (C <sub>15</sub> H <sub>30</sub> O <sub>2</sub> )	0.5	0.5	52.1	
Palmitinsäure (C <sub>16</sub> H <sub>32</sub> O <sub>2</sub> )	26.0	53.0	62.85	Bestandteil fast aller Fette
Margarinsäure (C <sub>17</sub> H <sub>34</sub> O <sub>2</sub> )	1.0	1.0	62	
Stearinsäure (C <sub>18</sub> H <sub>36</sub> O <sub>2</sub> )	7.5	9.0	69.6	
Arachidinsäure (C <sub>20</sub> H <sub>40</sub> O <sub>2</sub> )	1.5	1.5	75.4	
<i>2. ungesättigte Fettsäuren</i>				
Palmitoleinsäure <sup>i</sup> (C <sub>16</sub> H <sub>30</sub> O <sub>2</sub> )	5.0	2.0	1	im Depot- und Milchlipp von Tieren
Ölsäure <sup>ii</sup> (C <sub>18</sub> H <sub>34</sub> O <sub>2</sub> )	48.0	22.0	13	die am weitesten verbreitete ungesättigte Fettsäure
C <sub>20</sub> , 1 Doppelbindung	2.0	2.0		
C <sub>20</sub> , mehrere Doppelbindungen	0.5			vermutlich Arachidonsäure

Tab. 2.1: Ausgangssubstanzen und Produkte der Adipocirebildung mit Angabe ihrer Schmelzpunkte. Die Angaben der Fettsäurezusammensetzung illustriert qualitativ die auftretenden Verschiebungen nach kürzerer Liegezeit. Das Leichenlipid entstand durch zweimonatige Lagerung von frischem Menschenfett in Wasser mit Zusatz von Nährsalzen und Bakterienkulturen.

Tab. 2.2: die relative Umsetzung in 10-Hydroxy- und 10-Oxo-Fettsäuren im Laborexperiment durch *M. luteus*. Nach TAKATORI (1987): S. 280

Substrat	relative Substratumsetzung in %	
	10-Hydroxy-Fettsäure	10-Oxo-Fettsäure
Myristoleinsäure	7.0	5.2
Palmitoleinsäure	8.1	56.3
Ölsäure	56.3	16.8
Linolsäure	57.7	0

<sup>i</sup> Δ<sup>9</sup>-Hexadecensäure

<sup>ii</sup> Cis-Δ<sup>9</sup>-Octadecensäure

## 2.3. Chemische Zusammensetzung und Morphologie der Adipocire

Die Leichenlipide wurden bereits verschiedentlich nach ihrer chemischen Zusammensetzung untersucht. Der Tabelle 2.1 (dritte Kolonne) kann die Zusammensetzung einer experimentellen Adipocire nach kurzer Entwicklungszeit entnommen werden. Die dort festgestellten Substratveränderungen stimmen - zumindest was die wichtigsten Umsetzungen betreffen - mit den Resultaten von Leichenlipiduntersuchungen überein. So wird die Palmitinsäure beispielsweise auch in anderen Quellen als die quantitativ bedeutendste Verbindung angesehen. Über die weitere Zusammensetzung sind die Angaben uneinheitlich.

Bei SCHMIDT (1969)<sup>19</sup> beträgt der Palmitinsäureanteil 70 Prozent, Stearin- und Ölsäure werden mit je 5 Prozent ausgewiesen. Diese Zahlen hängen aber mitunter von der Liegezeit der Leiche ab. Die fettsauren Salze werden mit 10 Prozent angegeben, wobei als Kationen Calcium, Magnesium, Kalium, Natrium und Ammonium genannt sind. (Unter der Annahme, dass es sich überwiegend um Ca-Hexadecanoat handelt, ergibt dies einen anorganischen Anteil von gut einem Gewichtsprozent.) Ohne Mengenangabe geführt wird Cholesterin.

Aufgrund einer Literaturrecherche nennt BERG (1975)<sup>20</sup> neben der Palmitinsäure die Stearinsäure als zweiten Hauptbestandteil. Die weiteren Komponenten sind lediglich in geringen Mengen vertreten: Aufgeführt werden die Ölsäure und anorganische Stoffe, bei denen das Calcium überwiegt. Diese Resultate traf BERG in verschiedenen Arbeiten an. Nur vereinzelt erwähnt fand er hingegen die Hydroxystearinsäure und Cholesterin.

Der Ausgangspunkt der Adipocirebildung ist im subkutanen Fettgewebe anzusiedeln. Hier beginnt nach der Verflüssigung der Körperfette die Umwandlung und Auskristallisierung der Fettsäuren.<sup>21</sup> Die anfänglich weiche Lipidmasse wandelt sich zu einem harten Lipidpanzer, was offensichtlich mit der fortschreitenden Transformierung der Ölsäure in gesättigte Fettsäuren zusammenhängt. Mit diesem Prozess einher geht eine mehr oder weniger weitgehende Konservierung der äusseren Körperformen.<sup>22</sup> Nebst der Härtung des Lipidpanzers entwickelt sich die Adipocire in die Tiefe des Körpers fort. Teile der Muskulatur und der inneren Organe, deren Gewebe mit verflüssigtem Fett durchdrungen ist, können in den Vorgang der Fettsäurekonservierung einbezogen werden.<sup>23</sup> Meist kann bei Fettwachsleichen beobachtet werden, dass lediglich die zuinnerst liegenden Muskelschichten aufgelöst sind, was auf die gleichzeitig von innen gegen aussen strebende Fäulnis zurückzuführen ist. Der Fäulnisprozess wird vermutlich durch das Vordringen des Leichenlipides abgestoppt. Morphologisch ergibt sich somit oft ein Knochenskelett, welches mit einem locker sitzenden Lipidpanzer umschlossen ist.<sup>24</sup>

Ein morphologisch interessantes aber offenbar noch ungeklärtes Phänomen ist die experimentell stets zu beobachtende Volumenvermehrung bei der Leichenlipidbildung, die bei Erdgrableichen oft dazu führen soll, dass die Körper kaum im Sarg Platz finden.<sup>25</sup>

## 2.4. Abbauresistenz der Adipocire

Das erstaunlichste Phänomen der Adipocire ist ihre Abbauresistenz. Sie dürfte hauptsächlich auf zwei Elemente zurückzuführen sein: die Inhibition des Abbaus (Fäulnisstopp) und die Erschwerung der Substratzugänglichkeit für Bakterien und Enzyme (Fetthärtung). Vieles blieb hierzu aber unklar. Noch schlechter scheint die Datenlage bezüglich des Adipocireabbaus zu sein. Gegenstand der folgenden Erläuterungen sind deshalb mehrheitlich Spekulationen über eine Inhibition des Fäulnisprozesses, über die Persistenz der Adipocire und Spekulationen über deren Abbauvorgang.

### 2.4.1. Inhibition des Fäulnisprozesses

Nach einer im Körper erfolgten Bakterienausbreitung ist die Fäulnis als Konkurrenzreaktion zur Adipocirebildung zu betrachten. Dies ist naheliegend, wirkt sich doch der eine Prozess abbauend aus, der andere konservierend. Die Eindämmung des Fäulnisprozesses ist deshalb ein entscheidender Vorgang der Fettsäurekonservierung. Diese Inhibition hat insbesondere zu verhindern, dass langkettige Fettsäuren in einem grösseren Ausmass abgebaut werden.

Über die Ursache des frühzeitigen Fäulnisabbruches existieren Vermutungen. COTTON macht die tiefen pH-Werte, welche von den Fettsäuren herrühren, für die Einstellung des Bakterienwachstums verantwortlich. Er führt diesbezüglich Laborexperimente an, welche sich als selbststerilisierende Prozesse erwiesen.<sup>26</sup> Ähnliches beschreibt MANT:<sup>27</sup> In allen Experimenten, in denen Fette in eine Lösung gebracht wurden, sank der pH schnell auf Werte zwischen 4.5 und 5.5 ab. Mit *Clostridium Welchii* (= *Cl. perfringens*) beimpfte Lösungen erwiesen sich nach rund 24 Stunden als steril. (Bei pH-Werten unter 5.0 kommt die Entwicklung dieser Bakterienart zum Stillstand.<sup>28</sup>) Die Frage ist allerdings, ob diese Beobachtung aus dem Labor auf die Situation in einer Leiche übertragen werden darf.

Die Fäulnisbakterien stammen hauptsächlich aus dem Darmtrakt und somit aus einem mehrheitlich neutralen bis alkalischen Milieu.<sup>29</sup> Der Gedanke ist nicht abwegig, dass sich eine Ansäuerung auf die "Leichenflora" negativ auswirken würde. Die Fäulnisphase wird aber von einer während Wochen anhaltenden Alkalisierung begleitet.<sup>30</sup> In Feldversuchen fanden RODRIGUEZ/BASS diesen Befund bestätigt: Sie stellten unterhalb begrabener Leichen (ohne Sarg) eine pH-Erhöhung des Bodens von 0.5 bis 2.1 Einheiten fest.<sup>31</sup> Bei Versuchen mit begrabenen Hunden hat sich erwartungsgemäss gezeigt, dass der pH-Anstieg aus dem Fäulnisstadium resultiert, der aerobe Verwesungsprozess anschliessend zu einer Stagnierung des pH-Wertes führt.<sup>32</sup>

Eine Inertisierung der Adipocire aufgrund ihrer Acidität scheint eher unwahrscheinlich zu sein. Acidophile Bakterien liessen sich kaum über Jahrzehnte von der Adipocire fernhalten. Zudem ist die Stärke der Säurewirkung langkettiger Fettsäuren zu hinterfragen (vgl. hierzu den Text im Anhang B "Säurewirkung langkettiger Fettsäuren").

**Hypothese 1**     *Die Leichenfäulnis wird durch die Fettsäuren inhibiert.*

Es muss davon ausgegangen werden, dass die Unterbindung des Fäulnisprozesses mit den Fettsäuren zusammenhängt. Ein Phänomen wurde beschrieben, das diesen Zusammenhang

stärkt: Im Lipidpanzer eingeschlossenes Muskelgewebe bleibt konserviert, währenddem es ausserhalb der Adipocire abgebaut wird (vgl. Kap. 2.1. Mechanismus: Punkt 8). Ein erster Versuch, diesen Fäulnisabbruch zu erklären, hängt eng mit dem Fetthärtungsprozess zusammen. Dabei wird die Annahme getroffen, dass alleine durch die Ausfällung der Fettsäuren deren Abbaubarkeit so stark eingeschränkt wird, dass kaum mehr ein Weiterabbau stattfinden kann.

Welchen Aggregatzustand die Fettsäuren einnehmen - flüssig oder fest - hängt vom Sättigungsgrad der Fettsäuren, deren Kettenlänge und von der Körpertemperatur in der Leiche ab. Diese drei Faktoren sind dynamische Grössen, die sich fortwährend verändern können. Die zunächst flüssig vorliegenden Fettsäuren entsprechen in Sachen Sättigungsgrad und Kettenlänge derjenigen des menschlichen Fettgewebes zu Lebzeiten. Nach der Freisetzung aus dem Fettgewebe steht die Umsetzung zu verschiedenen Abbauprodukten offen, wobei mit der Hydrierung und der  $\beta$ -Oxidation (vgl. Abb. 2.1) vorwiegend zwei Reaktionstypen auftreten. Auf den Schmelzpunkt des Fettsäuregemisches besitzen diese beiden Reaktionen unterschiedliche Auswirkungen. Während die Hydrierung zu gesättigten Fettsäuren mit relativ hohen Schmelzpunkten führt, bewirkt die  $\beta$ -Oxidation eine Verkürzung der Kohlenstoffkette und somit tendenziell eine Schmelzpunktsenkung des Fettsäuregemisches.

Die Umsetzungsraten dieser Reaktionen hängen auf unterschiedliche Weise von der Temperatur ab. Der Umbau der Ölsäure zur Palmitinsäure ( $\beta$ -Oxidation mit anschliessender Hydrierung) findet - sofern die entsprechenden Enzyme vorhanden sind - selbst weit unterhalb einer Temperatur von 20°C statt.<sup>33</sup> Die Temperaturabhängigkeit der  $\beta$ -Oxidation bei langkettigen gesättigten Fettsäuren ist leider nicht bekannt. Die grosse Abbauresistenz der Palmitinsäure könnte aber dahingehend interpretiert werden, dass für diesen Weiterabbau Temperaturen vonnöten sind, die in fettsäurekonservierten Leichen nicht oder zumindest nicht über einen langen Zeitraum erreicht worden sind. Die Zusammensetzung des Fettsäuregemisches verschiebt sich in diesen Fällen zunehmend auf die Seite der langkettigen gesättigten Fettsäuren. Die Fettsäuren kristallisieren aus, wodurch sich die Abbauhemmnis noch weiter erhöht. Mit diesem Erklärungsversuch wird die Leichtemperatur zu einem Schlüsselfaktor der Fettsäurekonservierung.

Zur Diskussion eines zweiten Erklärungsversuches für den Fäulnisabbruch in der Leiche ist eine präzisierte Fassung der Hypothese 1 anzubringen:

**Hypothese 1a** *Die Leichenfäulnis wird durch die undissoziierten Fettsäuren<sup>i</sup> inhibiert.*

Mit der Hydrolyse der Körperfette fallen undissoziierte Fettsäuren an. Diese Säuren werden anschliessend teilweise deprotoniert: Nach SCHMIDT (1969) beläuft sich in der Adipocire der Anteil an fettsauren Salzen auf etwa 10 Prozent (vgl. Kap. 2.3. Chemische Zusammensetzung und Morphologie der Adipocire). Gemäss dieser Untersuchung besteht der Lipidpanzer also aus rund 90 Prozent undissoziierten Fettsäuren.

Ein wichtiger inhibitorischer Mechanismus ist die toxische Wirkung von Verbindungen. In Laboruntersuchungen erwiesen sich die kürzerkettigen undissoziierten Fettsäuren als bakterozid.<sup>34</sup> Die Toxizität scheint dabei von der Löslichkeit in den Membranlipiden abhängen. Aufgrund ihrer Ladung bleibt den dissoziierten Fettsäuren aber der Zutritt zur Zellmembran versperrt. Diese Erkenntnisse ergaben toxikologische Untersuchungen mit was-

<sup>i</sup> Gemeint sind hiermit die ungeladenen Fettsäuren. Die deprotonierten Fettsäuren (Abspaltung des sauren Wasserstoffatoms) werden in der Folge als dissoziierte Fettsäuren bezeichnet.

serlöslichen Fettsäuren. Die Dekansäure war die längste der in dieser Versuchsserie geprüften Fettsäuren.

Die Toxizität als inhibitorischer Mechanismus bietet eine passable Erklärung, weshalb lediglich die undissoziierten Fettsäuren die Fäulnis zu hemmen vermögen. Noch nicht erklärt ist hingegen, unter welchen Bedingungen die Fettsäuren dissoziiert werden. Gemäss der Hypothese 1a wäre die Deprotonierung der Fettsäuren erforderlich, damit die Leichenzerstörung nicht gehemmt wird. Ein Gedankenexperiment soll aufzeigen, welcher Zusammenhang zwischen dem Fäulnisprozess und dem Dissoziationsgrad der Fettsäuren bestehen könnte. Im Zentrum dieser Betrachtungen stehen zwei sarglos erdbestattete Leichen (Leichen 1 und 3), deren Fäulnisstadien von RODRIGUEZ/BASS (1985) beobachtet und beschrieben worden sind (vgl. hierzu die Angaben im Anhang A). Der mittlere Temperaturanstieg während des Abbaus wird als Mass für die Stärke des Fäulnisprozesses betrachtet, die im Erdreich gemessene pH-Differenz soll einen Hinweis auf die Alkalität im Körper geben<sup>i</sup>.

Als erster Schritt werden im Fettgewebe beider Leichen Fettsäuren enzymatisch freigelegt, die im flüssigen Aggregatzustand vorzuliegen kommen. Die undissoziierten Fettsäuren führen dabei im Fettgewebe zu einer Minderung der Bakterienaktivität. Gewisse bakterielle Enzyme beginnen ihrerseits mit dem langsamen Umbau der Ölsäure in Palmitinsäure. Mit der Auflösung von strukturgebenden Elementen diffundieren die flüssigen Fettsäuren teilweise in die Muskulatur und in die Organe. Soweit der normale Ablauf, wie er für plausibel gehalten wird.<sup>35</sup> Im Gedankenexperiment trennen sich in diesem Stadium die Wege der Leichen 1 und 3.

In der Leiche 3 ist dank der grösseren Umgebungstemperatur und vor allem auch dank der auftretenden Insektenaktivität ein intensiver Fäulnisprozess eingetreten (mittlerer Körpertemperaturanstieg: ca. 10°C). Die damit verbundene Alkalität (pH-Differenz: + 2.1) wirkt sich auf die Fettsäuren aus: Protonen werden abgezogen und durch Kationen ersetzt, aus dem Proteinabbau freiwerdendes Ammoniak koppelt sich an die Säuregruppe an: Der Anteil der fettsauren Salze steigt. Einer Neubesiedlung durch Bakterien steht nichts mehr im Wege. Der Abbau der Fettsäuren erschliesst dem Fäulnisprozess eine neue Energiequelle, die eine schnelle Endzerstörung des Körpers fördert. Nach nur drei Monaten ist das Weichgewebe praktisch vollständig aufgelöst.

Die schlechteren Zersetzungsbedingungen in der Leiche 1 (keine Insektenaktivität, geringere Ausgangstemperatur) drosseln den Fäulnisprozess (mittlerer Körpertemperaturanstieg: 3.4°C). Dementsprechend fällt die Alkalität im Körper geringer aus (pH-Differenz: + 0.5). Nur vereinzelt verlieren die Fettsäuren ihre sauren Protonen und nur wenig Ammoniak lagert sich an ihnen an (vgl. Kap. 2.3. Chemische Zusammensetzung und Morphologie der Adipocire: 10 Prozent fettsaure Salze). Für eine Besiedlung der Fettsäuren bieten sich den Fäulnisbakterien ungünstige Bedingungen an. Stattdessen führen Enzyme die Umwandlung in gesättigte Fettsäuren fort. Einen weiteren Abbau vermögen sie nicht zu katalysieren. Der Aggregatzustand der Fettsäuren wechselt zunehmend von flüssig zu fest. Ein Lipidpanzer beginnt sich zu bilden und zu wachsen. Gleichzeitig geht im Körperinnern der Fäulnisprozess weiter und somit die Produktion alkalischer Verbindungen. Fettsäuren werden weiterhin dissoziiert. Für den weiteren Verlauf sind zwei Auswege möglich:

1. Die anwachsende Adipocire schränkt den Fäulnisbakterien zunehmend ihren Ausbreitungsraum ein und entzieht ihnen hierdurch das Substrat.

---

<sup>i</sup> Korrekterweise müsste der pH-Wert des Ausgangsboden sowie das lokale Pufferungsvermögen mitberücksichtigt werden. Für eine grobe qualitative Betrachtung der Dinge soll die gemachte Vereinfachung genügen.

2. Der Fäulnisprozess zeigt auf die Adipocire Wirkung. Zumindest an den Rändern steigt der Anteil der dissoziierten Fettsäuren, womit diese durch Fäulnisbakterien besiedelt und abgebaut werden können. Hierdurch werden weitere Protonen konsumiert und weitere Fettsäuren dissoziiert. Schritt für Schritt erweitern die Fäulnisbakterien ihren Wirkungsbereich und führen allmählich den vollständigen Abbau des Weichgewebes herbei.

Das soeben angeführte Gedankenexperiment zur Hypothese 1a ist vorwiegend spekulativen Ursprungs und kann nicht ohne Widerrede stehen gelassen werden. Die Gültigkeit der Hypothese 1a hängt wesentlich von der toxischen Wirkung langkettiger Fettsäuren ab. Diese ist aber zu hinterfragen. Zunächst ist unklar, ob sich langkettige Fettsäuren aus dem festen Lipidpanzer herauslösen lassen, um anschliessend in die Membran, die als flüssig zu denken ist,<sup>36</sup> eindringen zu können. Der Übergang einer Fettsäure von der Adipocire zur Membran kommt somit einem Wechsel des Aggregatzustandes von fest zu flüssig gleich, was die Aufwendung der Schmelzenthalpie bedingt. Diesem Verlust steht ein Gewinn bei der Entropie gegenüber. Ein Übergang der Fettsäuren in die Bakterienmembran ist aus thermodynamischer Sicht aber zweifelhaft.

Eine weitere Frage ist bezüglich der Toxizität zu stellen. Für die Fettsäurekonservierung muss die Inhibitorwirkung und hiermit die Toxizität der Fettsäuren gegenüber der ganzen "Leichenflora" Gültigkeit besitzen. Eine solche Pauschalisierung von toxikologischen Laborexperimenten ist gefährlich. Da die toxischen Effekte die Membran betreffen, ist insbesondere zu berücksichtigen, dass der Zellwandaufbau bei verschiedenen Bakterienarten unterschiedlich ist.<sup>37</sup>

#### 2.4.2. Persistenz der Adipocire

Eine wichtige Eigenschaft für die Bioverfügbarkeit und somit die biologische Abbaubarkeit einer Substanz ist ihre Wasserlöslichkeit. Dies wird bei der Leichenzersetzung nicht anders sein. Die in Wasser gelösten Verbindungen sind für Bakterien und Enzyme von allen Seiten frei zugänglich. Bei Verbindungen, die an Festkörper adsorbiert oder in einer hydrophoben Phase zusammengeschlossen sind, ist insbesondere für die Enzyme der Zugang erschwert, manchmal verunmöglicht.

Langkettige Fettsäuren sind in Wasser praktisch unlöslich.<sup>38</sup> Sie bilden eine eigene, apolare Phase. Bakterien vermögen sich demgegenüber nicht oder nur schlecht in lipoider Lösung zu entwickeln. Möglicherweise wird die Lipiddoppelschicht der Membran darin beeinträchtigt. Zudem dürfte ihnen im apolaren Milieu nur in unzureichendem Masse Wasser zur Verfügung stehen. Die meisten Bakterien benötigen Wasseraktivitäten von mehr als 0.98.<sup>39</sup> Falls keine Besiedlung im abzubauenden Substrat möglich ist, beschränkt sich der Zersetzungsprozess auf die gemeinsamen Grenzflächen mit wässrigen Lösungen.

Die Beständigkeit des Leichenlipides lässt darauf schliessen, dass innerhalb der Adipocire keine oder nur eine sehr geringe Bioaktivität vorhanden ist. Verschiedene Ursachen sind hierfür denkbar:

1. Die Bakterien vermögen den Lipidpanzer nicht zu besiedeln.  
Drei Gründe können angeführt werden:

- Bereits weiter oben in diesem Abschnitt wurde der Wassermangel besprochen. Es bleibt abzuklären, ob Wasser in die Adipocire eingelagert wird, das für ein Bakterienwachstum ausreichen würde.
- Es könnten toxische Effekte als Abbauehemmung der Adipocire wirken. Auf die Fettsäuretoxizität wurde im Zusammenhang mit der oben besprochenen Hypothese 1a kurz eingegangen.
- Durch die Ausfällung der Fettsäuren baut sich eine physische Zutrittschranke auf.

2. Der Abbau des festen Lipidpanzers erfolgt nur aerob.

Die Abbaurate der Adipocire würde in diesem Fall durch die Sauerstoffnachlieferung bestimmt. Nach der Aufweichung der Adipocire ist auch der anaerobe Abbau wieder in Betracht zu ziehen. Dies ist zu erwarten, da im ungestörten Zersetzungsprozess die flüssigen Fettsäuren durch  $\beta$ -Oxidation anaerob abgebaut werden.<sup>40</sup>

Auf welche Ursachen die geringe Bioaktivität im Lipidpanzer zurückzuführen ist, lässt sich aus dem vorliegenden Erkenntnisstand nicht abschätzen. Zur Klärung dieser Frage wären gezielte experimentelle Abklärungen zu tätigen. Es ist aber anzunehmen, dass beide Punkte zur Persistenz der Adipocire beitragen.

Ein möglicher Vorgang, der die Persistenz der Adipocire zusätzlich verstärken könnte, ist die Kalkausfällung an der fettsäurekonservierten Oberfläche. Voraussetzung ist allerdings, dass aus den umgebenden Bodenzonen kalkhaltiges Wasser zur Leiche zufließt. Das alkalische Milieu, das sich während des Fäulnisprozesses ausbildet, kann zu einer Ausfällung des Kalkes führen. An der Leichenoberfläche bildet sich eine Kalkkruste aus, die sowohl für die Sauerstoffnachlieferung negative Auswirkungen zeitigt (vgl. Ursache 2 von oben), wie auch eine physische Barriere für Bakterien darstellt (vgl. den dritten Grund bei Ursache 1). Bei Exhumationen konnten bereits Kalkeinlagerungen in der Adipocire beobachtet werden.<sup>41</sup>

### 2.4.3. Abbau der Adipocire

Falls sich die Bakterienbesiedlung auf die Oberfläche der Adipocire beschränken sollte, könnte sich deren Zersetzung nur oberflächlich vollziehen. Ein sich Lage für Lage langsam in die Tiefe vorarbeitender Abbau würde für die kleine Zersetzungsrate teilweise Erklärung bieten. Falls sich zudem herausstellen sollte, dass der Abbau des festen Lipidpanzers nur aerob erfolgt (vgl. Kap. 2.4.2., Punkt 2), wäre dies wohl ein grosser Schritt zur Deutung der Langsamkeit der Adipocireauflösung. Es muss jedoch darauf hingewiesen werden, dass sowohl der flächige Abbau wie auch der obligat aerobe Abbau rein spekulativ und ohne empirische Erhärtung sind. Es ist jedoch zu erwarten, dass der Leichenlipidabbau durch Sauerstoff zumindest beschleunigt wird.

In der eingesehenen Literatur fand sich lediglich in einem Artikel einen Anhaltspunkt zur Morphologie des Adipocireabbaus. EVANS (1963)<sup>42</sup> entdeckte in einer Serie von Exhumationen sieben Leichen, deren Adipocire einen Teilabbau zeigten. Über den ansonsten festen Lipidpanzer fand er weiche, gelegentlich sogar flüssige braune Stellen, die sich zufällig über Kopf, Rumpf und Glieder verteilt befanden. Die Leichentücher dieser sieben Toten waren allesamt feucht, währenddem bei den unversehrten Adipociren diese trocken waren. In zwei Särgen fand Evans zusätzlich wenig einer braunen, dickflüssigen Lösung.<sup>43</sup>

Der Verlust der Festigkeit, der mit dem Abbau einhergeht, weist darauf hin, dass es sich zumindest in einem späteren Abbaustadium um keinen langsamen, oberflächlich verlaufenden Abbauprozess mehr handeln dürfte. Offenbar findet an Stellen, wo eine Aufweichung der Adipocire auftritt, diese in relativ grosser Geschwindigkeit und mit Tiefenwirkung statt. Denkbar ist ferner, dass sich dieser Abbauvorgang seitlich ausdehnt, auf diese Weise den ganzen Lipidpanzer zu erfassen bekommt und in absehbarem Zeitrahmen - vielleicht innerhalb weniger Jahre - zum Endabbau geführt werden kann. Hierfür spricht, dass - wie es scheint - nur sehr selten im Zerfall befindliche Adipocire entdeckt und beschrieben wird. Evans war die einzige Quelle, wo derlei Erfahrungen zu entnehmen waren.

## 2.5. Einflussfaktoren der Adipocirebildung

Es reicht nicht aus zu wissen, wie die Adipocire chemisch zusammengesetzt ist und nach welchen Reaktionsschemen sie gebildet wird. Für die Bestattungspraxis von entscheidender Bedeutung sind die Bedingungen, die eine Fettsäurekonservierung ermöglichen. Es sind dies meist Bedingungen, die auf den Fäulnisprozess hemmend, nicht aber verhindernd wirken.

Als Grundvoraussetzung, damit eine Adipocirebildung auftreten kann, muss das gleichzeitige Vorhandensein von Speicherfettgewebe, Bakterien und Wasser angenommen werden:

- Die Fettsäuren stellen das Ausgangssubstrat dar. Besondere Bedeutung ist dem *subkutanen Speicherfettgewebe* zuzumessen, von wo die Fettsäurekonservierung auszugehen scheint.
- Die *Bakterien* sondern unterschiedliche Enzyme aus, welche zur Freisetzung und Umwandlung der Fettsäuren beitragen. Vor allem im Darmtrakt hat der Körper ein riesiges Depot an Mikroorganismen vorliegen. Für die Sättigung der Fettsäuren scheinen die Enzyme von *Clostridium perfringens* von besonderer Bedeutung zu sein.
- Das *Wasser* hat für jegliche bakterielle und enzymatische Aktivität essentiellen Charakter.<sup>44</sup> Für die Adipocirebildung sind hiervon im Fettgewebe normalerweise ausreichende Mengen gespeichert.<sup>45</sup> Dies steht im Gegensatz zu der über Jahrzehnte vorherrschenden Meinung, wonach grosse Mengen an zusätzlichem Wasser für Fettsäurekonservierung vonnöten seien. Dieses Fehltrium erwuchs aus den vielen Beobachtungen von Wasserleichen und Körpern aus vernässten Gräbern. Als erster erkannte MANT, dass Adipocirebildung nicht ausschliesslich in feuchter Umgebung auftritt. Bei verschiedenen Exhumationen stellte er fest, dass zur Adipocirebildung teilweise bereits die Körperflüssigkeit ausreicht: Die Körperfette ziehen von den inneren Geweben Wasser ab, welche ihrerseits mumifizieren können.<sup>46</sup>

Darüberhinaus bestehen verschiedene Einflussfaktoren, die der Adipocirebildung förderlich oder aber abträglich sind. In der Literatur liessen sich hierzu einige Anhaltspunkte finden. Unter Zuhilfenahme von Schilderungen konkreter Erfahrungen aus Exhumationen und aus eigenen Überlegungen setzte sich ein umfassendes Faktorenpuzzle zusammen, welches im folgenden wiedergegeben ist.

### 2.5.1. Sauerstoff

Bei der Ursachenforschung von Zersetzungsstörungen richtet sich das Augenmerk oft auf den Sauerstoff. Es ist bekannt, dass sein Fehlen zu einem stark gehemmten und unvollständigen Abbau von organischen Substanzen führen kann. In Laborversuchen konnte festgestellt werden, dass die Adipocirebildungsrate unter anaeroben Verhältnissen rund 20 Prozent höher liegt als unter aeroben Bedingungen.<sup>47</sup> Als Interpretation dieses Resultates ist zunächst festzustellen, dass unter aeroben Verhältnissen immer noch reichlich Leichenlipid gebildet wird. Sodann ist ein Einwand anzubringen: Während der ersten Zeit der Adipocirebildung läuft mit der Fäulnis ein *anaerober* Zersetzungsprozess ab. Auch wenn im Sargraum Sauerstoff vorliegen sollte, ist dennoch nicht damit zu rechnen, dass dies an der Anaerobie in der Leiche etwas zu ändern vermag. Bilder von während der Fäulnisphase aufgeblähten Körperteilen lassen erahnen, dass die Haut eine starke Gasaustauschbarriere darstellt. Der Sauerstoff und mit ihm der aerobe Abbau nimmt erst mit der Entwässerung des Körpers überhand, zu einem Zeitpunkt also, wo langkettige Fettsäuren zu kurzkettigen abgebaut sein sollten.<sup>48</sup> Die Position COTTONs, der vom Zutritt des Sauerstoffes zum bestatteten Körper keine Auswirkung auf die Adipocireproduktion erwartet,<sup>49</sup> ist deshalb nicht abwegig.

### 2.5.2. Körpertemperatur

In Bezug auf Zersetzungsprozesse gehört die Temperatur zu den ausserordentlich wichtigen abiotischen Ökofaktoren. Nicht umsonst gehören der Kühlschrank und die Gefriertruhe in der modernen Küche zu den wesentlichen Strategien der Nahrungskonservierung. In der Leiche entspricht die Reaktionstemperatur der biochemischen Vorgänge gerade der Körpertemperatur. Sie ist deshalb für den Abbauprozess von besonderer Bedeutung.

**Hypothese 2** *Nach einer in der Leiche erfolgten Ausbreitung der Bakterien wirken sich tiefe Körpertemperaturen als adipocirefördernd aus.*

Die Aktivität der Bakterien zeigen eine charakteristische Abhängigkeit von der Temperatur (vgl. Abb. 2.3). Es existiert ein maximaler und ein minimaler Temperaturwert, bei dessen Überschreitung respektive Unterschreitung das Bakterienwachstum abstoppt. Die grösste Wachstumsrate ist in der Nähe der maximalen Temperatur angesiedelt, bei der eine Populationsvermehrung gerade noch möglich ist. Unterhalb der optimalen Temperatur bis zur minimalen Temperatur folgt die Wachstumsrate der Arrheniusgleichung. Diese drückt im wesentlichen aus, dass der Logarithmus der Wachstumsrate  $k$  linear vom negativen Kehrwert der Temperatur abhängt:

$$\ln k = \ln A - \frac{E_A}{RT}$$

$A$  (Frequenzfaktor),  $E_A$  (Aktivierungsenergie) und  $R$  (universelle Gaskonstante) sind Werte, die bei dieser Betrachtung nicht von Belang sind.

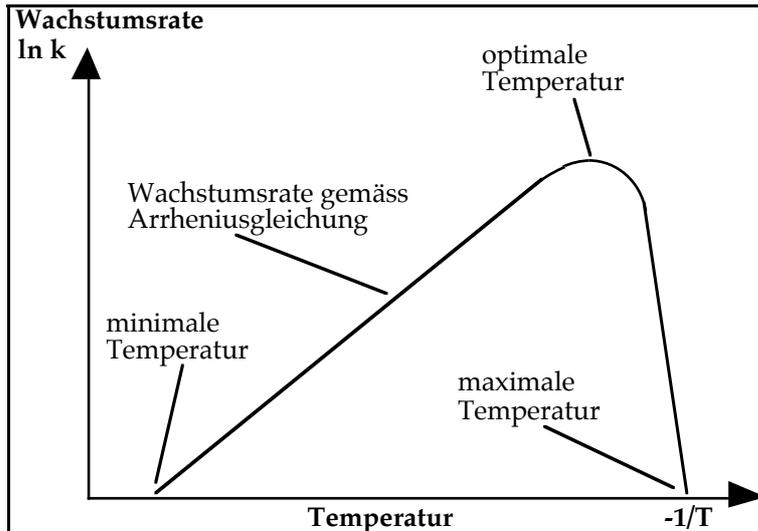


Abb. 2.3: Auswirkungen der Temperatur auf die Wachstumsrate von Mikroorganismen und ihrer Enzyme. Gemäss ZEYER (1994)

Bei der Fäulnis sind über weite Strecken mesophile Darmbakterien beteiligt, deren Wachstumsoptima in der Grössenordnung um 40°C liegen dürften (z.B. *Escherichia coli*: bei 39°C)<sup>50</sup>. Die minimale Körpertemperatur, wo die "Leichenflora" noch aktiv ist, reicht bis unter 5°C. Bei langen Aufbewahrungszeiten setzt der Fäulnisprozess deshalb trotz Kühlbox ein. Die aktiven Bakterienarten werden bei diesen Temperaturen allerdings eingeschränkt sein. Bei *Clostridium perfringens* kommt das Wachstum beispielsweise bereits im Temperaturbereich

von 15-20°C zum Stillstand.<sup>51</sup> Die Artenzusammensetzung wird sich zugunsten der an tiefe Temperaturen besser adaptierten Bakterien verschieben.

Da sowohl die Spaltung der Triglyceride wie auch die Fetthärtung langsame Prozesse sind, ist für die Fettsäurekonservierung der Zeitfaktor wichtig.<sup>52</sup> Ein abgeschwächter Fäulnisprozess bietet den fetttransformierenden Enzymen ausreichend Zeit, einen Lipidpanzer auszubilden. Freilich sind auch hier die Reaktionsraten gemäss der Arrheniusgleichung von der Temperatur abhängig. Im Gegensatz zu vielen Fäulnisbakterien bleiben die fetttransformierenden Enzyme aber selbst bei sehr tiefen Temperaturen aktiv.<sup>53</sup> Hieraus resultiert ein Vorteil für die Fettsäurekonservierung bei tieferen Temperaturen.

### 2.5.3. Wärmetransport

Der Fäulnisprozess setzt Wärme frei, wodurch die Fäulnis in einem gewissen Ausmass als selbstbeschleunigender Prozess funktionieren kann. Kein selbstbeschleunigender Prozess resultiert, wenn der Wärmefluss die Wärmeproduktion ausgleicht oder gar übersteigt. In diesem Falle bleibt die Fäulnis auf einem relativ geringen Aktivitätsniveau stehen.

Der Wärmetransport im Boden kennt drei Komponenten: die Wärmeleitung (Konduktion), die Wasserdampfdiffusion (latenter Wärmefluss) und die Infiltration von kaltem oder warmem Wasser. Letzteres scheint bei der betrachteten Themenstellung wenig relevant zu sein, weshalb diesbezüglich auf weitere Erläuterungen verzichtet wird.

#### 2.5.3.1. Wärmeleitung (Konduktion)

Die Wärmeleitung beschreibt eine diffusionsbedingte Übertragung kinetischer Energie von der warmen zur kalten Region. Die "treibende Kraft" der Wärmeleitung ist dabei der Tempera-

turgradient ( $dT/dz$ ). Weiter hängt die Wärmeflussdichte von der Wärmeleitfähigkeit ( $K$ ) des Materials ab. In einer Formel ausgedrückt ergibt dies folgende Wärmeflussdichte ( $G$ ).<sup>54</sup>

$$G = -K \cdot \frac{dT}{dz} \quad \text{Fourier-Gesetz}$$

Der Temperaturgradient hängt wesentlich von der Umgebungstemperatur ab. Im Boden zeigt der Temperaturverlauf einen mehr oder weniger sinusförmigen Jahresgang. Im Schweizer Mittellandklima dürfte dieser Jahresgang ungefähr um eine mittlere Temperatur von 7°C schwanken, wobei mit zunehmender Bodentiefe die Amplitude der Sinusschwingung abnimmt (vgl. Kap. 3.1. Bodentemperatur).

Die Wärmeleitfähigkeit des Bodens hängt stark vom Wassergehalt, der Bodenzusammensetzung und der Bodenstruktur ab. Da die Luft ein schlechter Wärmeleiter ist, erfolgt die Wärmeleitung praktisch allein über die feste und flüssige Bodenphase. Bei nahezu ausgetrockneten Böden beschränkt sich deshalb die Konduktion weitgehend auf die Kontaktstellen zwischen den Festteilchen der Bodenmatrix. In stark entwässerten Böden führen so bereits geringe Wassergehaltsveränderungen zu einer beträchtlichen Vergrößerung des wärmeleitenden Querschnittes.<sup>55</sup> Eine Auflistung von Wärmeleitfähigkeitskonstanten einiger wichtiger Bodenelemente ist in der Tabelle 2.4 aufgeführt.

	Wärmeleitfähigkeit ( $J\ m^{-1}\ K^{-1}\ s^{-1}$ )
Quarz	8.8
Tonminerale	3.0
org. Material	0.25
Wasser	0.6
Eis (bei 0°C)	2.2
Luft	0.03

Tab. 2.4: die Wärmeleitfähigkeit  $K$  verschiedener Bodenbestandteile bei 10°C. Leicht geändert nach GISI (1990): S. 79

Die Leiche im Innern eines intakten Sarges ist zu einem grossen Teil mit wärmeisolierender Luft umgeben. Im nicht durchnässten Zustand zeigt auch das Holz eine relativ gute wärmeisolierende Wirkung. Von der Leiche, die in einem Sarg und in relativ trockener Erde bestattet ist, wird deshalb nur ein geringer konduktiver Wärmefluss ausgehen. Grössere Bedeutung erlangt die Wärmeleitung, wenn sich der Sarg mit externem Wasser oder mit Leichenflüssigkeit anfüllt ("Badewanneneffekt") oder die Bestattung in einem feuchten Boden ohne Sarg erfolgt.

Beim "Badewanneneffekt" kann die Wärmeleitfähigkeit des Wassers als eine massgebende Komponente des Wärmetransportes angenommen werden. Dieser Fall ist entfernt mit Wasserleichen aus Seen vergleichbar, deren Auftauchen mechanisch verhindert wurde. Die Adipocirebildung bei solchen Leichen ist in forensischen Fachzeitschriften mehrfach beschrieben worden (z.B. Cotton, 1987). Nach BERG liefern Bestattungen in schlecht wasser-durchlässigen Lehm- und Tonböden aber oft noch vollständigere Konservierung, als dies von Wasserleichen bekannt ist.<sup>56</sup>

Bei sarglos erdbestatteten Leichen steht der Körper im Kontakt mit organischen und anorganischen Bodenpartikeln, Wasser und Luft. Für einen feuchten Boden ist eine Wärmeleitfähigkeit zu erwarten, welche diejenige des Wassers noch übertrifft. Eine erhöhte Wärmeflussdichte und eine geringere postmortale Körpertemperatur wäre die Folge. Zusammen mit der Hypothese 2 liesse sich dies in Einklang mit einer Beobachtung MANTs bringen, der bei Exhumationen in Grabfeldern aus dem Zweiten Weltkrieg die Leichenzersetzung durch Särge deutlich beschleunigt sah.<sup>57</sup> Zu den damals verwendeten Särgen ist allerdings anzumerken, dass sie einfach gefertigt und schlecht schliessend waren.

In feuchten Böden der gemässigten Klimazone mag die Beobachtung Mants in der Tendenz stimmig sein. Für allgemeine Aussagen erfordert die Faktorenviefalt der Leichenzersetzung (Körperbau, Klima, Bodentyp, Bodentemperatur, Bestattungstiefe, Insektenaktivität, Sargbeschaffenheit und Leichenbekleidung) differenziertere Betrachtungsweisen.

### 2.5.3.2. Wasserdampfdiffusion (latenter Wärmefluss)

Nebst der Konduktion kann bei der sarglosen Bestattung durch Wasserdampfdiffusion auch ein latenter Wärmefluss auftreten. Dabei wird Wasser auf der warmen Seite (z.B. Wasserfilm auf Körperoberfläche mit daran anschliessendem Luftraum) evaporiert, auf der kalten Seite kondensiert.<sup>58</sup> Die transportierte Wärmeenergie entspricht der Evaporationsenergie. Die mögliche Bedeutung des latenten Wärmeflusses ist im folgenden anhand der Beobachtungen von EVANS (1963) erläutert:<sup>59</sup>

Evans exhumierte 59 in Lechentücher gekleidete Körper, welche während 103 bis 127 Jahren in einem Dreifachsarg in relativ trockenen Gräften bestattet waren. Die Särge bestanden aussen und innen aus einem Holzgehäuse, in der Mitte aus einer Bleikapsel. In der Gruft wurden die Särge mit einer dünnen Erdschicht umschlossen. Die Umgebungstemperatur in den Gräften betrug um 4.4°C, ohne dass bedeutsame saisonale Schwankungen auftraten. Von den 59 Leichen waren 33 fettsäurekonserviert, was einem Anteil von 56 Prozent entspricht. Es ist dies einer der wenigen Berichte, wo Fettsäurekonservierung aus einer trockenen Umgebung geschildert wird. Die Frage stellt sich nach der Ursache. Auffällig sind zwei Gegebenheiten: der Sargaufbau und die konstant tiefe Umgebungstemperatur.

Die erwähnte Bauweise des Dreifachsarges, wohl aber auch eines schweren Eichensarges, vermindert den Gasaustausch mit der Umgebung in einem drastischen Ausmass. Zur Abschätzung der möglichen Auswirkung sei folgendes Gedankenexperiment angeführt:

Mit dem Fäulnisprozess, mit der Erwärmung des Körpers und mit der Freisetzung von Leichenflüssigkeit steigt die Luftfeuchtigkeit im Sargraum bis zur Sättigungsgrenze an. Die an die kalten Sargwände anstossenden Luftschichten kühlen sich ab, was zur Kondensierung des Wasserdampfes führt. Kondenswasser sammelt sich an und tropft in Richtung Sargboden. Durch das Kondenswasser (von der Decke oder vom Boden) oder direkt vom Körper wird das Lechentuch durchfeuchtet. Das Wasser aus den mit Flüssigkeit vollgesaugten Kleidungsstücken evaporiert, woraus ein vom Körper wegführender Energietransfer resultiert. An der kalten Sargwand wird die Evaporationsenergie abgegeben, von wo sie entsprechend dem Temperaturgefälle nach aussen wegdiffundiert. Hierdurch entsteht ein Nettoenergie-transfer vom Körper an die Umgebung.

**Hypothese 3** *Wird die Entwässerung und Eintrocknung der Leiche während des Fäulnisprozesses verhindert, erhöht sich die Gefahr der Fettsäurekonservierung in beträchtlichem Masse.*

Schwere Holz-, Metall- und Steinsärge, die für Wasser und Wasserdampf als praktisch hermetisch abgeschlossen gelten müssen, stehen schon seit längerem im Verruf, zur Fettsäurekonservierung beizutragen.<sup>60</sup> Dasselbe gilt auch für Sargbestattungen in tonreichem Substrat. Diese Böden weisen sich durch eine sehr gute Wasserbindungsfähigkeit aus, weshalb sie stark

zu Vernässungen neigen. Bei Bestattungen in vernässtem Erdreich staut sich deshalb die Fäulnisflüssigkeit in den Sargraum zurück.

Zu den wichtigsten Funktionen des Fäulnisprozesses zählt die Entwässerung der Leiche. Genau diesen Ablauf stören die erwähnten Sarg- und Bodentypen massiv. Drei Auswirkungen sind zu berücksichtigen:

- Der erste betrifft den erwähnten latenten Wärmefluss, wobei das Wasser als Medium des Energietransportes dient. Die kühlende Wirkung der Wasserdampfdiffusion kann jeder am eigenen Leib erleben, beispielsweise indem man sich nach einem Duschbad nicht so gleich abtrocknet. Für die Fettsäurekonservierung ist der latente Wärmefluss vermutlich als ein stark fördernder Faktor zu betrachten. Diese Einschätzung kann aus den vielen Beobachtungen gewonnen werden, wonach Kleidungsstücke zu einer massiv gesteigerten Adipocirebildung führen.<sup>61</sup> Der von den Kleidern ausgehende Effekt dürfte vor allem darauf zurückzuführen sein, dass sie durchnässt werden und aus diesem sich auf der Körperoberfläche bildende konstante Feuchtefilm eine kontinuierliche Evaporation und somit ein steter Wärmeentzug resultiert. MANT führt die Wirkung der Kleider allerdings nebst dem Zurückhalten von Feuchtigkeit auf den Schutz vor Insekten zurück,<sup>62</sup> BERG wiederum auf eine Verminderung des Luftzutrittes.<sup>63</sup>
- Nebst dem latenten Wärmefluss tritt bei einer Flüssigkeitsansammlung auf dem Sargboden auch die konduktive Wärmeleitung auf (siehe oben).
- Die Särge der beschriebenen Bauweise und vernässte Böden halten die Körperflüssigkeit im Sargraum zurück. Die freigesetzte Wärme verteilt sich somit unter anderem auf eine vergleichsweise grosse Menge Wasser - Wasser, das bekanntlich eine grosse Wärmekapazität aufweist. Ob dieser Effekt Auswirkungen zeigt, ist nicht bekannt. Es ist jedoch daran zu erinnern, dass rund 80 Prozent des Körpers aus Wasser besteht.<sup>64</sup> Dies entspricht durchschnittlich etwa 60 Liter Wasser, die durch den Fäulnisprozess zusätzlich erwärmt werden müssen.

Die genannten Punkte führen zu einer geringeren Körpertemperatur und somit zu einem abgeschwächten Fäulnisprozess, der durch die voranschreitende Adipocire leichter gestoppt werden kann. Auf diese Weise lässt sich das Auftreten fettsäurekonservierter Leichen erklären.

#### 2.5.4. Bakterienvielfalt

Im Verlaufe eines Abbauvorganges verändert sich naturgemäss die Zusammensetzung des Substrates. Aufgrund der unterschiedlichen Abbaukompetenzen der einzelnen Bakterienarten wäre mit der Veränderung des Nährbodens auch eine Sukzession der Bakterien zu erwarten. In der Praxis - das bedeutet an der Leiche - sind hierzu allerdings keine gründlichen Untersuchungen bekannt. Es scheint aber, dass zumindest im Verlauf der späteren Fäulnisstadien bei den dominierenden Mikroorganismen Änderungen auftreten.<sup>65</sup>

Für einen speditiven Abbau ist die Notwendigkeit einer gewissen Artenvielfalt in der Fäulnisbakteriologie zu erwarten. Es ist zu überlegen, ob sich eine geringe Fäulnisaktivität auf diese Artenvielfalt negativ auswirken kann. Ein Gedankenexperiment soll grob aufzeigen, welche Zusammenhänge diesbezüglich bestehen könnten: Die Wachstumsrate der Bakterien folgt innerhalb bestimmter Grenzen der Arrheniusgleichung (vgl. Kap. 2.5.2. Körpertemperatur). Am unteren Rand dieses Temperaturbereiches divergieren die Entwicklungsmöglich-

keiten der einzelnen Bakterienstämme, was möglicherweise zu einer Verdrängung einzelner Mikroorganismenarten führt. Falls sich auf diese Weise ein einseitiges Bakterienspektrum entwickeln sollte, könnte solcherweise ein Verlust an Abbaueffizienz resultieren. Im Zusammenhang mit den Fäulnisbakterien stehen noch viele Fragen zur Beantwortung an.

Gegenüber obigem Gedankenexperiment ist folgender Einwand zu machen: Wenn von den Umgebungstemperaturen tatsächlich eine Störung des Fäulnisvorganges gemäss der beschriebenen Art ausgehen sollte, müssten Friedhöfe in Berggebieten besonders stark "adipociregefährdet" sein, was in diesem Ausmass aber nicht zutrifft.<sup>66</sup> Die angedeuteten Zusammenhänge sind deshalb für wenig wahrscheinlich zu halten. Tiefe Umgebungstemperaturen sind für die Fettsäurekonservierung allerdings gleichwohl von Belang, da sie ein grosses Temperaturgefälle bewirken können, was sich auf den konduktiven Wärmefluss steigernd auswirkt (vgl. Kap. 2.5.3.1. Wärmeleitung).

### 2.5.5. Fettreichtum und Fettverteilung

Unter zersetzungsfreundlichen Umweltbedingungen fördert Fettleibigkeit den Fäulnisprozess im Körper. Die wärmeisolierende Wirkung des Fettgewebes und der chemische Energieinhalt der Fettsäuren lassen hohe postmortale Körpertemperaturen entstehen und beschleunigen hierdurch den Abbauprozess. Bei ungünstigen Zersetzungsbedingungen muss Fettreichtum hingegen als grosses Substratreservoir für die Adipocirebildung betrachtet werden und dementsprechend als der Fettsäurekonservierung förderlich gelten.<sup>67</sup> Über das Ausmass dieser begünstigenden Wirkung ist allerdings keine Studie bekannt.

Nähere Informationen lassen sich zum Einfluss der Körperfettverteilung ableiten. Gemäss zweier Studien, bei welchen die Leichenfunde nach Geschlechtern getrennt ausgewertet wurden, tritt die Adipocirebildung bei Frauen signifikant häufiger auf. In einem niederländischen Kommissionsbericht über die unvollständige Leichenzersetzung auf Friedhöfen wird bei Frauenleichen von einer dreifach höheren Zahl der Adipocirefälle berichtet als beim männlichen Geschlecht.<sup>68</sup> Eine Bestätigung dieser Tendenz liefert EVANS: Er fand bei einer Serie von Exhumationen bei gut 62 Prozent der Frauen Adipocirebildung, währenddem der Anteil der Männer lediglich bei gut 45 Prozent lag.<sup>69</sup> Es ist zu vermuten, dass diese geschlechtsspezifisch ungleiche Neigung zu Zersetzungsstörungen in der unterschiedlichen Verteilung des Speicherfettgewebes ihre Ursache hat.

Das Speicherfettgewebe ist vorwiegend im Unterhautfettgewebe, retroperitoneal (hinter dem Bauchfell liegend) und zwischen den Muskeln und deren Fasern abgelagert.<sup>70</sup> Betreffend der geschlechtsspezifischen Verteilung der Körperfette ist die Nomenklatur bei Korpulenz interessant: Bei Übergewichtigen unterscheidet man die androide und gynoide Fettverteilung. Der androide Typ lagert das Fett in erhöhtem Masse retroperitoneal an, eine Erscheinung, die häufiger bei Männern zu beobachten ist. Demgegenüber ähnelt der gynoide Typ der weiblichen Form: Das Fettgewebe ist besser über den Körper verteilt (subkutanes Fettgewebe), wobei die Hüfte charakteristisch betont ist.<sup>71</sup>

Zwischen der Menge an subkutan eingelagertem Fett und der Tendenz zur Adipocirebildung scheint also ein Zusammenhang zu bestehen. Dies ist nicht erstaunlich. Das Unterhautfettgewebe nimmt bereits bei der Entstehung des Leichenlipides eine besondere Position ein. Gemäss BERG schreitet der Fetthärtungsprozess im Körper von aussen nach innen voran.<sup>72</sup> Da die Adipocire Körperfett als Ausgangssubstrat benötigt, kann mit "ausser" lediglich das subkutane Fettgewebe gemeint sein.

### 2.5.6. Pflanzliches Material

Bei verschiedenen Gräbern, wo der Sargboden mit pflanzlichem Material ausgestattet worden ist, wurde eine geringere Neigung zu Fettsäurekonservierung festgestellt. Pflanzliches Material wird deshalb bei verschiedenen Autoren als dem Fäulnisprozess förderlich respektive der Adipocirebildung abträglich dargestellt.<sup>73</sup> Diese Wirkung spricht MANT besonders dem Stroh, in geringerem Ausmass auch den Holzspänen zu. Den beschleunigten Zerfall führt er auf die wärmeisolierende Wirkung und der beim Abbau des pflanzlichen Materials freierwerdenden Wärme zurück.<sup>74</sup>

## Offene Fragen

*Zur Unterbindung des Fäulnisprozesses*

- Was bringt bei der Fettsäurekonservierung den Fäulnisprozess zum Erliegen?

*Zur Temperaturentwicklung in einer Leiche*

- Mit welchen Temperaturen ist während der intensiven Fäulnisphase in einer erdbestatteten Leiche zu rechnen?
- Welche maximalen Körpertemperaturen werden in Leichen erreicht, die in der Folge der Fettsäurekonservierung unterliegen?

*Zu den langkettigen Fettsäuren*

- Unter welchen Bedingungen findet ein anaerober Abbau langkettiger Fettsäuren statt?
- Welche Bakterien vermögen den Abbau langkettiger Fettsäuren (insbesondere der Palmitinsäure) zu bewirken?
- In welchem Temperaturbereich liegt deren Aktivitätsoptimum?
- Unterhalb welcher Temperatur ist der Abbau langkettiger Fettsäuren praktisch vernachlässigbar?

*Zur Adipocire*

- Aufgrund welcher Faktoren besitzt die Adipocire ihre geringe Abbaubarkeit?
- Wirkt sich der Dissoziationsgrad der Fettsäuren auf die Abbaubarkeit der Adipocire aus?
- Wie erfolgt der Abbau der Adipocire? Wodurch wird dieser Abbau bewirkt?

---

<sup>1</sup>Rubner (1912): S. 186

<sup>2</sup>verschiedene mündliche Mitteilungen

<sup>3</sup>Berg (1975): S. 93

<sup>4</sup>Berg (1975): S. 89

<sup>5</sup>Cotton (1987): S. 1129

<sup>6</sup>Berg (1975): S. 88

<sup>7</sup>Berg (1975): S. 89 f.

<sup>8</sup>Cotton (1987): S. 1129

<sup>9</sup>vgl. Janaway (1987): S. 132

- <sup>10</sup>Berg (1975): S. 92
- <sup>11</sup>Berg (1975): S. 92
- <sup>12</sup>vgl. Takatori (1987)
- <sup>13</sup>Takatori (1986)
- <sup>14</sup>vgl. Takatori (1987)
- <sup>15</sup>a.a.O.
- <sup>16</sup>a.a.O.
- <sup>17</sup>Schmidt (1969): S. 219 ff.
- <sup>18</sup>a.a.O.
- <sup>19</sup>Schmidt (1969): S. 193
- <sup>20</sup>Berg (1975): S. 91
- <sup>21</sup>Berg (1975): S. 89
- <sup>22</sup>Berg (1975): S. 88
- <sup>23</sup>Berg (1975): S. 89
- <sup>24</sup>Berg (1975): S. 90
- <sup>25</sup>a.a.O.
- <sup>26</sup>Cotton (1987): S. 1129
- <sup>27</sup>Mant (1987): S. 77
- <sup>28</sup>Wallhäusser (1978): S. 441
- <sup>29</sup>vgl. Brock (1991): S. 392 ff.
- <sup>30</sup>Schmidt (1969): S. 209
- <sup>31</sup>Rodriguez/Bass (1985): S. 850
- <sup>32</sup>a.a.O.
- <sup>33</sup>Cotton (1987): S. 1129
- <sup>34</sup>Bajpai/Iannotti (1988): S. 213
- <sup>35</sup>vgl. z.B. Berg (1975)
- <sup>36</sup>vgl. Schlegel (1992): S. 44
- <sup>37</sup>vgl. Schlegel (1992): S. 53f. Es sei speziell auf den unterschiedlichen Membranaufbau bei gram-positiven und gram-negativen Bakterien hingewiesen.
- <sup>38</sup>vgl. The Merck Index, 11. ed., 1989
- <sup>39</sup>Schlegel (1992): S. 197
- <sup>40</sup>Die  $\beta$ -Oxidation kann gemäss mündlicher Mitteilung von Herr Angst (EAWAG, Dübendorf) sowohl aerob wie auch anaerob ablaufen.
- <sup>41</sup>Tony Linder (Begründer der Tony Linder & Partner AG, Altdorf; eine Firma, die auf Friedhofsanierungen spezialisiert ist) bestätigte, solche Beobachtungen gemacht zu haben.
- <sup>42</sup>auf die Bestattungs- und Umweltbedingungen wird weiter unten noch eingegangen.
- <sup>43</sup>Evans (1963): S. 147
- <sup>44</sup>Mant (1987): S. 76
- <sup>45</sup>Janaway (1987): S. 132
- <sup>46</sup>Mant (1987): S. 76. Mant veröffentlichte diese Erkenntnis bereits 1950.
- <sup>47</sup>Mant (1987): S. 77
- <sup>48</sup>vgl. Berg (1975): S. 71
- <sup>49</sup>Cotton (1987): S. 1129
- <sup>50</sup>Zeyer (1994): Beilageblätter S. 12
- <sup>51</sup>Wallhäusser (1978): S. 441
- <sup>52</sup>Berg (1975): S. 71 respektive 92
- <sup>53</sup>Mant (1987): S. 76
- <sup>54</sup>Flühler (1991): S. 5-15 f.
- <sup>55</sup>vgl. Flühler (1991): S. 5-21
- <sup>56</sup>Berg (1975): S. 89
- <sup>57</sup>Mant (1987): S. 68.
- <sup>58</sup>Flühler (1991): vgl. Kapitel 5
- <sup>59</sup>Evans (1963)
- <sup>60</sup>vgl. z.B. Rubner (1912): S. 185, aber auch mündliche Mitteilungen.
- <sup>61</sup>u.a. bei Cotton (1987): S. 1129, Mant (1987): S. 68, Berg (1975): S. 89, Mellen (1993)
- <sup>62</sup>Mant (1987): S. 69

<sup>63</sup>Berg (1975): S. 89

<sup>64</sup>Das Trockengewicht eines Menschen wird mit rund 14 kg angegeben (Berg, 1975: S. 88)

<sup>65</sup>Berg (1975): S. 68

<sup>66</sup>mündliche Rücksprache mit Hr. Äschlimann, Tony Linder & Partner AG, Altdorf

<sup>67</sup>Cotton (1987): S. 1129

<sup>68</sup>Berg (1975): S. 89

<sup>69</sup>Evans (1963): S. 148

<sup>70</sup>Gerlach (1989): S. 124

<sup>71</sup>Gerlach (1989): S. 125

<sup>72</sup>Berg (1987): S. 89

<sup>73</sup>Cotton (1987); Mant (1987); Henderson (1987)

<sup>74</sup>Mant (1987): S. 71

### **3. WECHSELWIRKUNGEN ZWISCHEN BODEN UND LEICHENZERSETZUNG**

#### **Zusammenfassung**

Im Erdgrab werden die Zersetzungsbedingungen der Leichen wesentlich durch den Boden bestimmt. Vor allem die Entwässerung des Körpers, dessen Bedeutung für den Zersetzungsprozess in den vorangegangenen Kapiteln dargestellt worden ist, kann durch das Vorhandensein von freiem Bodenwasser (Grund- oder Stauwasser) behindert werden. Eine von der Grabsohle bis zum Grundwasser ausreichend mächtige und wasserdurchlässige Bodenschicht bietet deshalb günstige Voraussetzungen für eine gute Zersetzungsleistung.

Die Tiefensickerung erfolgt im Boden hauptsächlich in den Grobporen, die nach starken Regenfällen innerhalb rund zweier Tage entwässert sind. Der Anteil an Grobporen steigt im Boden mit zunehmendem Gehalt an grobkörnigem Erdmaterial sowie mit abnehmender Lagerungsdichte. Stark tonhaltige Böden neigen demgegenüber zu Stauwasserbildung, weshalb sie für Friedhofszwecke als ungeeignet zu betrachten sind.

Die Bodendurchlüftung hängt ebenfalls massgeblich mit den Grobporen zusammen, beispielsweise indem nach deren Entwässerung frische Luft aus der Atmosphäre in den Boden nachfolgt. Der Sauerstoffbedarf während der Verwesungsphase dürfte aber bereits bei geringer Bodendurchlüftung gedeckt sein.

Ein Schwerpunkt der getroffenen Abklärungen betrafen die Auswirkungen der Bestattungstätigkeit auf den Boden. Mit der Bestattungstätigkeit werden vor allem zwei Eingriffe in den Boden getätigt, das Ausheben und Wiedereinflüllen des Grabes sowie das Einbringen von organischer Substanz in den mineralischen Unterboden. Die Auswirkungen auf den Boden, die sich hierdurch ergeben, interessierten vorab hinsichtlich der Frage, ob sich unterhalb der Grabsohle eine Verschlechterung der Wasserleitfähigkeit einstellen kann. Als stauschichtbildende Prozesse wurden mechanische Einwirkungen und verschiedene Einlagerungsprozesse in Betracht gezogen. Die Gültigkeit dieser Prozesse sind im betrachteten Zusammenhang allerdings in Frage zu stellen, zumal weder in der Literatur stichhaltige Hinweise auf diesbezügliche Bodenveränderungen gefunden werden konnten, noch die kontaktierten Archäologen (und Anthropologen) von derartigen Beobachtungen zu berichten wussten. Bei den eigenen Feldstudien im Friedhof Zürich-Affoltern, der auf gut durchlässigem Untergrund angelegt ist, liessen sich ebenfalls keine Anzeichen für Stauschichtbildung finden. Bei auftretenden Zersetzungsstörungen in Friedhöfen ist deshalb in der Regel davon auszugehen, dass der Boden bereits zu Beginn der Bestattungstätigkeit für die Leichenzersetzung untauglich war, wenngleich beim momentanen Informationsstand eine Verschlechterung der Zersetzungsqualität mit der Belegungszahl ebenfalls nicht ausgeschlossen werden kann.

Im allgemeinen wird erwartet, dass nach Ablauf der Grabesruhe die vollständige Skeletierung einer Leiche vollzogen ist. Ob sich diese Erwartung erfüllt, hängt massgeblich von den Bodenbedingungen ab. Aus den vorangegangenen Kapiteln sind drei Faktoren hervorzuheben, die sich auf den Zersetzungsprozess stark auszuwirken vermögen: die Leichentemperatur, der Wärmetransport (während der starken Fäulnisphase) und die Sauerstoffnachlieferung (während der aeroben Verwesung). Die Körperwärme steht dabei mit der Bodentemperatur in Zusammenhang, der Wärmetransport und die Sauerstoffnachlieferung hängen hingegen vom Bodenwasserhaushalt ab.

### 3.1. Bodentemperatur

Ausser während der starken Fäulnisphase wird die Körpertemperatur einer Leiche massgeblich durch die Bodentemperatur bestimmt (vgl. Kapitel 1). Von der Körpertemperatur wiederum hängt die bakterielle und enzymatische Zersetzungsaktivität ab (vgl. Abb. 2.3). Zwischen der Bodentemperatur und der Zersetzungsgeschwindigkeit kann deshalb ein direkter Zusammenhang angenommen werden. Im Jahresgang zeigt die Bodentemperatur einen mehr oder weniger sinusförmigen Zyklus, der in unserem Klima um eine mittlere Temperatur von ungefähr 7°C schwankt. Dies ergaben Messungen im Profil "Oberer Rickenzopf, Langenthal".<sup>1</sup> Mit zunehmender Bodentiefe nahm die Amplitude der Sinusschwingung ab und traten die Kulminationspunkte zu späteren Zeitpunkten auf. In grossen Bodentiefen pendeln sich die Bodentemperaturen somit auf konstant tiefem Niveau ein (vgl. Tab. 3.1).

Die Jahresdurchschnittstemperatur bleibt in den verschiedenen Bodentiefen ungefähr gleich. Der Rückschluss aber, dass sich deshalb die Bodentiefe nicht auf die Zersetzungsrate auswirkt, ist falsch. Dies wäre dann der Fall, wenn zwischen der Zersetzungsrate und der Körpertemperatur ein linearer Zusammenhang bestehen würde. Tatsächlich handelt es sich aber um eine exponentielle Beziehung (vgl. Abb. 2.3). Mit dem Temperaturanstieg steigt deshalb die Zersetzungsrate überproportional an. Aufgrund der kleineren Temperaturamplitude nimmt somit die Zersetzungsrate mit zunehmender Bodentiefe im allgemeinen ab. Weitere Auswirkungen der Bestattungstiefe auf den Zersetzungsprozess sind im Kapitel "Massnahmen" (Kap. 5.2. Bestattungstiefe) zusammengestellt.

### 3.2. Wasserhaushalt des Bodens

Gemäss Hypothese 3 (Kapitel 2) begünstigt ein Rückstau der Fäulnisflüssigkeit im Sargraum das Vorkommen fettsäurekonservierter Leichen. Dieser Rückstau kann durch eine wasserundurchlässige Bauweise des Sarges oder durch einen vernässten Boden her-

Bodentiefe	Temperatur	
	Minimum	Maximum
30 cm	0.5	14
100 cm	2	12
150 cm	3	11
250 cm	4	9.5

Tab. 3.1: mininale und maximale Temperatur in verschiedenen Bodentiefen. Quelle: FLÜHLER (1991)

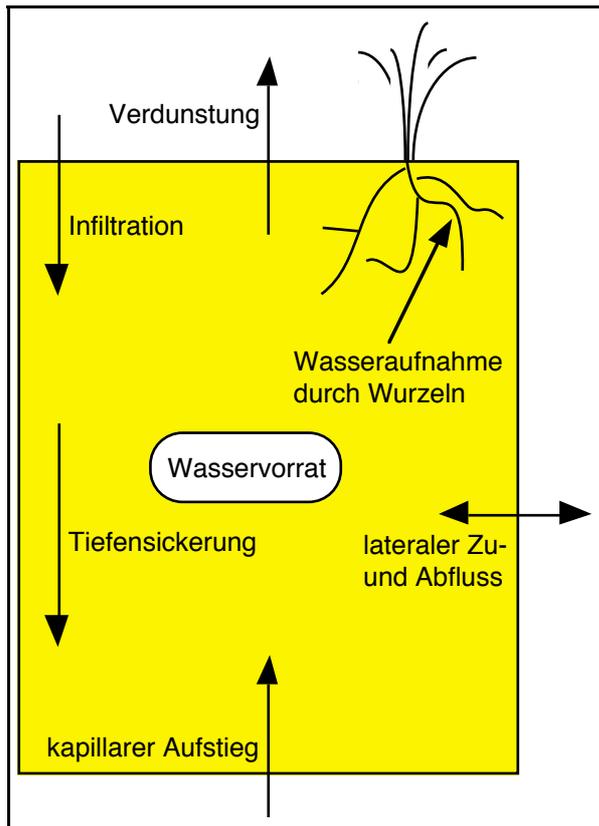


Abb. 3.1: Zusammenspiel von Wasserzufuhr und Wasserentzug: Die Komponenten für eine Wasserbilanz eines Bodenkompimentes in Anlehnung an FLÜHLER (1995b): S. 144

und durch die Tiefensickerung entwässert (vgl. Abb. 3.1). Die Infiltrationsrate ist bei einem gut durchlässigen Oberboden durch die Niederschlagsmenge gegeben. Stark vom Bodentyp abhängig ist demgegenüber die Versickerungsrate und mit ihr die Neigung zu Staunässe (vgl. Kap. 3.2.1. Der Porenraum).

### 3.2.1. Der Porenraum

Der abiotische Teil des Bodens setzt sich aus der Matrix und dem Porenraum zusammen. Die Porosität drückt aus, welcher Bodenanteil durch den Porenraum eingenommen wird. In Abbildung 3.2 sind die sich auf die Porosität auswirkenden Faktoren Kornform, Korngrößenabstufung und Lagerungsdichte veranschaulicht.

Auf den Porenraum verteilt sich der Wasser- und Luftgehalt des Bodens. Eine grosse Porosität bedeutet aber nicht, dass ein Boden gut wasserdurchlässig sein muss. Die Wasserleitfähigkeit des Bodens hängt massgeblich vom Anteil an Grobporen ( $> 50 \mu\text{m}$ )<sup>i</sup> ab (vgl. Tab 3.2). In diesen wird das Wasser weitaus am effizientesten transportiert. Nach starken Regenfällen sind die Grobporen durch die Gravitation innerhalb ein bis zwei Tagen entwässert - die Durchlässigkeit des Untergrundes vorausgesetzt. Mit zunehmender Verkleinerung

<sup>i</sup> Es handelt sich hierbei um den Durchmesser einer zylinderförmigen Kapillaren, deren Wasserbindungsfähigkeit äquivalent derjenigen der Bodenpore ist.

vorgerufen sein. Letzteres gehört in den Schweizer Mittellandfriedhöfen zur häufigsten Ursache von Zersetzungsstörungen, weshalb der Schwerpunkt dieses Kapitels in der Abhandlung vernässter Böden liegt.

Grund- und Stauwasserkörper bilden sich über Schichten mit geringer Wasserleitfähigkeit aus (siehe unten). Als Grundwasser wird bezeichnet, wenn ganzjährig ungebundenes Wasser vorhanden ist. Von Stauwasser wird demgegenüber gesprochen, wenn das Wasservorkommen nur während eines Teils des Jahres - meistens im Frühjahr - ungebunden vorliegt.<sup>2</sup> Ungebunden heisst dieses Wasser, weil es nicht durch chemische Adsorptions- oder physikalische Kapillarkräfte an die Bodenmatrix gebunden wird. Der Wasservorrat des Bodens übersteigt sein Wasserbindungsvermögen. Das ungebundene Bodenwasser kann in Hohlräume einsickern, so beispielsweise auch in einen Sarg, und hierdurch den Zersetzungsprozess zusätzlich beeinträchtigen.

Der Wasservorrat des Bodens wird unter humiden Verhältnissen hauptsächlich durch infiltrierendes Wasser gespiesen

der Durchmesser nimmt der Fließwiderstand in den Poren stark zu. Die Mittelporen (50 bis  $0.2 \mu\text{m}$ ) tragen hauptsächlich durch die Wasseraufnahme der Wurzeln und die Verdunstung zum Wassertransport bei. In den Feinporen sind die Adsorptions- und Kapillarkräfte sehr stark, weshalb ihnen das Wasser nicht mehr entzogen werden kann.

Der Gasaustausch und somit die Sauerstoffversorgung des Bodens erfolgt vor allem in den Grobporen. Dies hängt einerseits damit zusammen, dass die diffusive Leitfähigkeit für Gase in der Luft um mehrere Zehnerpotenzen grösser ist als in den wasserführenden Poren.<sup>3</sup>

Andererseits verdrängt bei intensiven Niederschlägen das einsickernde Wasser die Bodenluft, welche in die Atmosphäre austritt. Mit der Entwässerung dieser Poren folgt neue Luft aus der Atmosphäre nach, woraus eine allgemeine Auffrischung der Bodenatmosphäre resultiert. Durch die Verdrängung der Bodenluft sind bei zu oberflächlich bestatteten Leichen (vgl. Kap. 5.2. Bestattungstiefe) vorab nach starken Regenfällen Geruchsemissionen auf dem Friedhofsgelände möglich.

Als vorwiegend aerober Zersetzungsprozess ist insbesondere die Verwesung auf eine Sauerstoffnachlieferung aus der Atmosphäre angewiesen. Aufgrund der langen Grabesruhe von meist mehr als 20 Jahren sollten aber bereits geringe Gasaustauschraten zum aeroben Endabbau ausreichen.

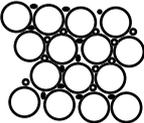
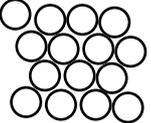
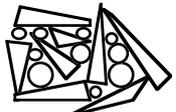
Eigenschaft	kleine Porosität	grosse Porosität
Kornform	 rundlich (Sand)	 sperrig (Tonplättchen)
Korngrößenabstufung	 abgestufte Körnung	 einseitige Körnung
Lagerung	 verdichtet, gerüttelt, ausgerichtet	 locker, frisch, geschüttelt

Abb. 3.2: Einflussfaktoren, welche die Porosität bestimmen. Aus FLÜHLER (1995a): S. 20

Charakterisierung der Durchlässigkeit	"Grobporenanteil" <sup>i</sup>
sehr schwach durchlässig	< 5.0 %
schwach durchlässig	5.0 - 9.9 %
mässig durchlässig	10.0 - 14.9 %
gut durchlässig	15.0 - 20.0 %
stark durchlässig	> 20 %

Tab. 3.2: Klassifizierung der Bodendurchlässigkeit in Abhängigkeit des "Grobporenanteils". Quelle: HALL (1977): S. 39

<sup>i</sup>Die Grobporen dieser Tabelle stimmen nicht genau mit denjenigen im Text überein. Im Text sind Poren mit einem Durchmesser von grösser als  $50 \mu\text{m}$  als Grobporen definiert, was einer Saugspannung von kleiner 6 kPa entspricht. Das Porenvolumen in der Tabelle ist demgegenüber bei einem Unterdruck von 5 kPa bestimmt worden, was als Durchmesser Werte von grösser  $60 \mu\text{m}$  ergibt.

### 3.2.2. Textur

Die Porengrößenverteilung wird wesentlich durch die Bodentextur mitbestimmt. Dies lässt sich am besten mit Beispielen veranschaulichen: Nasser Sand trocknet nach kurzer Zeit wieder aus, da er viele wasserleitende Grobporen enthält. Der Porenraum eines Tonklumpens hingegen besteht zu einem grossen Teil aus Feinporen, weshalb er dauerhaft feucht bleibt.

Mit zunehmender Feinkörnigkeit des Erdmaterials verringert sich tendenziell der Grobporenanteil zugunsten der Feinporen (vgl. Tab 3.3). Der Grund liegt in der erhöhten spezifischen Oberfläche: Pro Volumeneinheit ist eine grössere totale Partikeloberfläche vorhanden, weshalb die einzelnen Oberflächen näher zueinander zu liegen kommen. Kleinere Poren sind die Folge, in denen das Wasser durch Kapillarkräfte stark gebunden wird.

Quellfähige Tonminerale (z.B. Smectit, Montmorillonit, Vermiculit) weisen sich durch eine besonders grosse spezifische Oberfläche aus, weil selbst die Innenflächen des Kristalls wasser- und ionenzugänglich sind, worauf die Aufweitbarkeit dieser Tonminerale beruht.<sup>4</sup> Die Porosität bleibt hingegen bei variierender Körnigkeit mehr oder minder unverändert (vgl. Abb. 3.3).

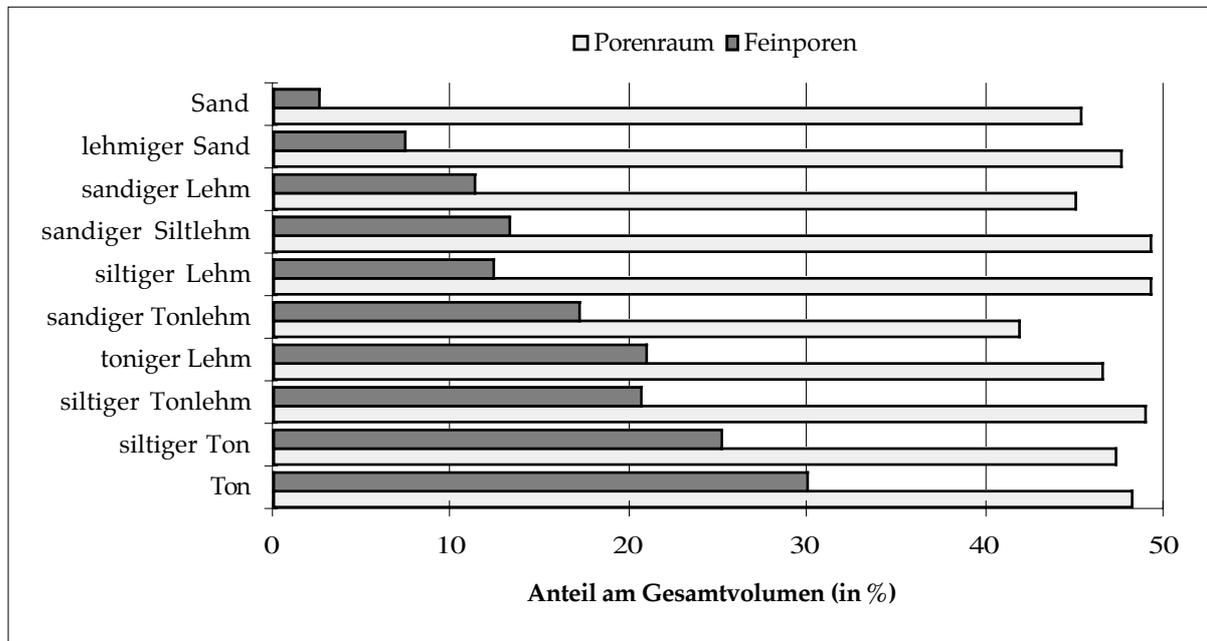


Abb. 3.3: Porenraum und Feinporenanteil in Unterböden (Horizonte E, B und C) mit unterschiedlicher Körnigkeit. Bei den dargestellten Daten handelt es sich um Mittelwerte aus einer Messerie. Quelle: HALL (1977): S. 35-37. In der Abb. 3.4 ist von den einzelnen Bodenarten die Zusammensetzung der Feinerde wiedergegeben.

	Porosität	Grobporen (%)	Mittelporen (%)	Feinporen (%)
Sandböden	0.46 ± 0.10	30 ± 10	7 ± 5	5 ± 3
Siltböden	0.47 ± 0.90	15 ± 10	15 ± 7	15 ± 5
Tonböden	0.50 ± 0.15	8 ± 5	10 ± 5	35 ± 10

Tab 3.3: Porosität und Anteil der Porengrößenbereiche am gesamten Bodenvolumen in Mineralböden (C-Gehalt < ca. 2 %) und organischen Böden. (Leicht geändert aus SCHEFFER/SCHACHTSCHABEL (1992): S. 149)

Im feinkörnigen Erdmaterial sind es aber nicht die physikalischen Kapillarkräfte allein, die zu einem verstärkten Wasserrückhalt führen. Zusätzlich sind auch chemische Adsorptionskräfte an der Wasserbindung beteiligt. Die Anlagerung von Wasser (aber auch von gelösten oder gasförmigen Verbindungen) erfolgt an Adsorptionsplätzen auf den Partikeloberflächen. Das Adsorptionsvermögen eines Bodens steigt mit der spezifischen Oberfläche und mit der Anzahl Adsorptionsplätze pro Flächeneinheit an. Letzteres hängt von der mineralischen Zusammensetzung ab. Unter den mineralischen Bodenpartikeln sind die Tonmineralien von spezieller Bedeutung. Sie zeichnen sich neben einer grossen spezifischen Oberfläche auch durch eine beträchtliche Adsorptionsplatzdichte aus, woraus sich ihre ausgeprägte Wasserbindungskapazität ergibt.

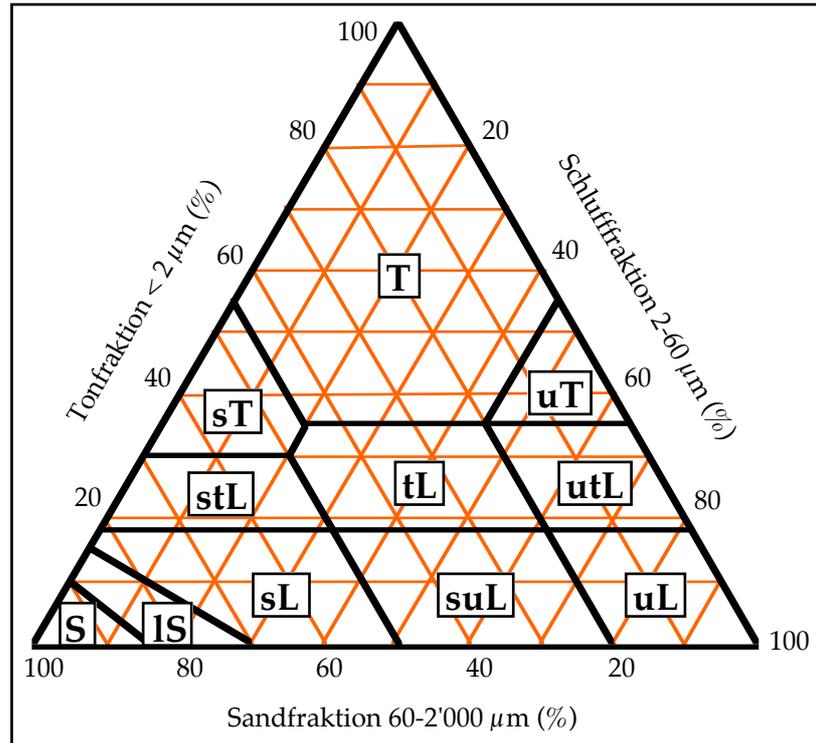


Abb 3.4: Körnungsdreieck der Feinerde zur Darstellung der Bodenart nach HALL (1977): S. 32.

Legende: T = Tonboden, uT = siltiger Ton, sT = sandiger Ton, tL = toniger Lehm, utL = siltiger Tonlehm, stL = sandiger Tonlehm, uL = siltiger Lehm, suL = sandiger Siltlehm, sL = sandiger Lehm, IS = lehmiger Sand, S = Sand

### 3.2.3. Strukturbildung

Für die Wasserleitfähigkeit ist nebst der Textur auch die Strukturbildung des Bodens von Bedeutung. Einzelpartikel können sich miteinander verbinden, wodurch Sekundärteilchen (Aggregate) entstehen. Aufgrund der Aggregatbildung ergeben sich im Boden Sekundärporen, die im Vergleich zu den Primärporen grössere und konstantere Durchmesser haben, weniger gewunden sind und meistens in vertikaler Richtung vorliegen.<sup>5</sup> Mit der Strukturierung wird den texturbedingten Primärporen ein sekundäres Porensystem überlagert, das die Wasserdurchlässigkeit des Bodens erhöht (Abb. 3.5).

Zu den Sekundärporen gehören Schrumpf- und Schwundrisse, Wurzelkanäle sowie Röhren, Gänge und Kammern von bodenbewohnenden Tieren. Nebst den biotischen Faktoren lässt sich die Entstehung der Bodenaggregate auf wechselnde Feuchtigkeit und wechselnde Temperaturen zurückführen. Die genannten strukturbildenden Prozesse schwächen sich allesamt mit der Bodentiefe ab. Das Tier- und Wurzelvorkommen ist im humosen Oberboden weitaus grösser als in den tieferen mineralischen Horizonten. Ebenso nehmen die

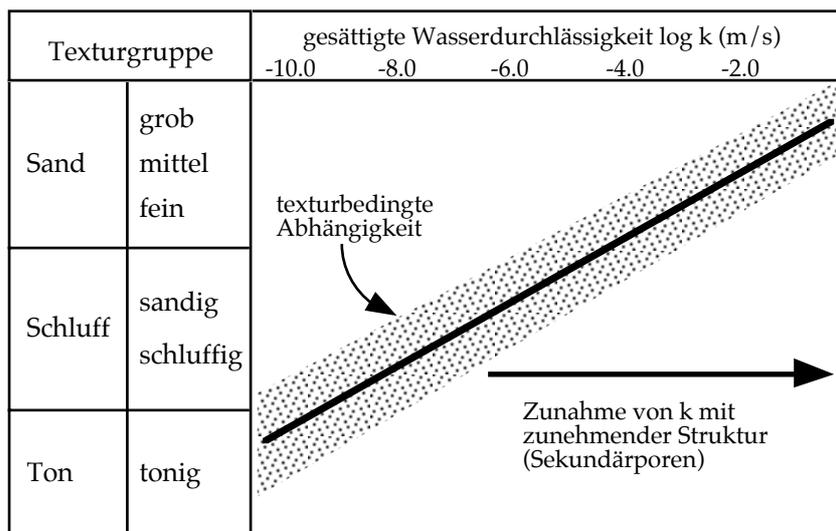


Abb. 3.5: Die Abhängigkeit der gesättigten Wasserleitfähigkeit von der Textur und vom Aggregatgefüge. Quelle: FLÜHLER (1995a): S. 55

Temperatur- und Feuchtigkeitsschwankungen mit der Bodentiefe ab: Im Unterboden kann insbesondere der Gefrierpunkt nicht mehr unterschritten werden und es treten auch kaum mehr Austrocknungszustände auf. Die Bedeutung der Sekundärporen nimmt aus diesen Gründen mit der Bodentiefe ab.

### 3.3. Zersetzungsbedingungen in verschiedenen Böden

Zur Verhinderung von Zersetzungsstörungen sind an Friedhofsböden Anforderungen bezüglich ihrer Entwässerung zu stellen. Der Boden hat soweit wasserleitfähig zu sein, dass im Grabraum nicht über eine längere Zeit wassergesättigte Verhältnisse herrschen können. Diese Forderung beinhaltet die Absenz von versickerungshemmenden respektive wasserstauenden Bodenhorizonten. Stauwasser bildet sich über einem Bodenhorizont mit geringer Wasserleitfähigkeit. Diese zeichnen sich in erster Linie durch eine hohe spezifische Oberfläche (insbesondere hoher Tongehalt), in zweiter Linie durch eine hohe Lagerungsdichte aus (vgl. Tab. 3.4).

Aufgrund des Bodeneigendruckes nimmt die natürliche Lagerungsdichte in der Regel kontinuierlich mit der Tiefe zu. In den Bestattungsfeldern ist aber mit einer Unstetigkeit an der Grabsohle zu rechnen, die sich auf eine geringere Lagerungsdichte nach der Wiedereinfüllung eines Grabes zurückführen lässt. Der Boden wird also bis zur Grabsohle aufgelockert. Darunter schliesst die natürlich gelagerte oder sogar verdichtete Bodenzone an. Die Möglichkeit einer Stauzone ist deshalb vorrangig unterhalb der Grabsohle zu erwarten.

Noch wesentlich stärker als von der Lagerungsdichte dürfte die Neigung zur Stauschicht aber vom Tongehalt der Bodenhorizonte abhängen. Die grosse spezifische Oberfläche und ihr erhebliches Wasserbindungsvermögen ermöglichen den Tonmineralien, die Tiefensickerung des Bodenwassers zu hemmen. Durch den hohen Feinporenanteil und die starken Adsorptionskräfte bleibt ein beträchtlicher Teil des Bodenhohlraumes mit immobilem Wasser besetzt. Nach Niederschlägen reicht der verbleibende Fliessquerschnitt nicht aus, um die infiltrierten Wassermengen versickern zu lassen. Böden mit stark tonhaltigen Horizonten im Unterboden müssen deshalb zu Friedhofszwecken als ungeeignet betrachtet werden.

Nebst den tonreichen sind in der Bodenliteratur auch siltreiche Stauwasserböden (Haftnässepseudogleye) bekannt.<sup>6</sup> In der Schweiz sind in diesem Zusammenhang hochverdichtete Siltböden zu erwähnen, die aus Grundmoränenmaterial entstanden sind.<sup>7</sup> Somit

müssen auch bei stark silthaltigen Böden, die als Substrate für Erdbestattungen genutzt werden sollen, Vorbehalte gemacht werden. Zur Gewährleistung der Tiefensickerung sollte der Boden daher einen gewissen Anteil an grobkörnigem Material (Sand oder Bodenskelett) enthalten. Dies ist besonders für die Bodenhorizonte um und unterhalb der Grabsohle zu fordern.

Über die Abhängigkeit der Leichenzerersetzung vom Bodentyp sind keine Untersuchungen bekannt. Datensätze aus einer Vielzahl unterschiedlicher Friedhöfe enthaltend Textur, Lagerungsdichte und Zersetzungsgüte liessen vermutlich genauere Rückschlüsse auf die Anforderungen zu, die an Friedhofsböden zu stellen sind. Die Textur und Lagerungsdichte wäre dabei in den verschiedenen Bodenhorizonten zu bestimmen. Die gesammelten Erfahrungen würden nicht nur bei der Evaluation neuer Friedhofsgelände von praktischem Nutzen sein, auch für Friedhofsanierungen könnten Erkenntnisse gewonnen werden.

Partikelgrössenklasse	Wasserdurchlässigkeit für unterschiedliche Lagerungsdichten		
	klein ( $< 1.40 \text{ g cm}^{-3}$ )	mittel ( $1.40 - 1.75 \text{ g cm}^{-3}$ )	hoch ( $> 1.75 \text{ g cm}^{-3}$ )
Ton	—	schwach	sehr schwach
sandiger Ton	—	(schwach)	schwach
siltiger Ton	—	mässig	sehr schwach
sandiger Tonlehm	—	schwach	schwach
toniger Lehm	stark	mässig	schwach
siltiger Tonlehm	gut	mässig	schwach
siltiger Lehm	—	(mässig)	— <sup>i</sup>
sandiger Siltlehm	stark	mässig	— <sup>i</sup>
sandiger Lehm	stark	gut	mässig
lehmiger Sand	stark	stark	(mässig)
Sand	(stark)	stark	(stark)

Tab. 3.4: Wasserdurchlässigkeit im Unterboden (Horizonte E, B, C) für einzelne Partikelgrössenklassen bei unterschiedlichen Lagerungsdichten. Die Durchlässigkeit ist gemäss der Tab. 3.2 definiert.

Legende: ( ) = beschränkte Datenlage, — = ungenügende Datenlage. Quelle: HALL (1977): S. 39

<sup>i</sup> Diese Kategorien entsprechen den Moränenböden, deren Wasserdurchlässigkeit als schwach zu bezeichnen sind. (Mündliche Mitteilung von Hj. Büchi)

### 3.4. Auswirkungen der Bestattungstätigkeit auf den Boden

Wie folgendes Beispiel aus dem letzten Jahrhundert zeigt, kann sich die Tendenz zur Adipocirebildung im Verlaufe der Zeit verändern: Im Friedhof Père la Chaise in Paris erfolgten die Bestattungen in 1.5 Meter Tiefe Sarg an Sarg gesetzt. Die Grabesruhe war ausserordentlich knapp bemessen: Bereits nach fünf Jahren fand eine Neubelegung der Gräber statt. Während die erstbestatteten Leichen noch vollständig skelettiert wurden, zeigte sich bereits bei der zweiten Belegung teilweise Adipocirebildung. Bei der Drittbestattung trat allgemein Fettsäurekonservierung auf.<sup>8</sup>

Unklar sind die Hintergründe dieser verstärkt in Erscheinung tretenden Fettsäurekonservierung. Die Zersetzungsstörungen könnten einerseits auf der ausserordentlich grossen Belegungsdichte und Belegungsfrequenz beruhen. Als Ursache wäre etwa an die Sargbretter zu denken, die möglicherweise einen versickerungshemmenden "Holzhorizont" gebildet haben. Beim geschilderten Friedhof würde es sich dann um einen Einzelfall handeln, der keine Rückschlüsse auf andere Grabfelder zuliesse. Andererseits könnten mit der Leichenzersetzung aber auch Bodenprozesse zusammenhängen, die zu ungünstigen Zersetzungsbedingungen führen. Zumindest für gewisse Bodentypen müsste sich in diesem Fall zwischen der Belegungsfrequenz eines Grabes und der Adipocirebildung einen statistischen Zusammenhang ergeben lassen.

Von Bestattungsbeamten wird teilweise die Meinung vertreten, dass die Leichenlipidbildung in den letzten Jahrzehnten zugenommen hat. Selbst wenn sich aber diese Beobachtung als richtig erweisen sollte, dürfte dies noch nicht als Beleg für die Existenz "verwesungsmüder Böden" genommen werden. Nebst den Bodenverhältnissen können sich über die Jahre auch weitere Faktoren verändern, die sich auf die Leichenzersetzung auswirken. Beispielsweise der Ernährungszustand der Bevölkerung und somit der Fettgehalt menschlicher Körper: Nach dem Hungerwinter von 1945 blieb bei den damals bestatteten Leichen die Fettsäurekonservierung aus.<sup>9</sup> Mit den veränderten Essgewohnheiten und dem zunehmenden Bewegungsmangel nahm seither die Fettleibigkeit zu. Auch dies könnte im Verlaufe der letzten Jahrzehnte - unabhängig von den Bodenverhältnissen - zu vermehrter Adipocirebildung geführt haben.

Der Nachweis, dass mit zunehmender Belegungszahl eine verschlechterte Leichenzersetzung einhergeht, ist nicht erbracht. Bei vielen Friedhöfen, die heute Zersetzungsstörungen (Fettsäurekonservierung) zeigen, ist vielmehr davon auszugehen, dass der Boden bereits zu Beginn der Bestattungstätigkeit für die Leichenzersetzung untauglich war. Jedoch ist auch die erwähnte Verschlechterung der Zersetzungsqualität zumindest denkbar. Zur Erhärtung dieser Möglichkeit wäre allerdings zu zeigen, wie durch die Bestattungspraxis eine Verringerung der Bodenwasserleitfähigkeit bewirkt werden kann. Als verursachende Faktoren einer solchen Veränderung kommen hauptsächlich zwei Eingriffe in Frage, die mit der Erdbestattung vorgenommen werden: die Aushebung des Grabes und die Einbringung von organischer Substanz in den Unterboden. Hieraus lassen sich verschiedene Vorgänge herleiten, die zu einer Stauzonenbildung beitragen könnten.

### 3.4.1. Mechanische Bodenverdichtung

Durch die Einwirkung äusserer Kräfte kann locker gelagertes Erdmaterial verdichtet und Sekundärporen zerstört werden (vgl. Abb. 3.2). Am häufigsten tritt dies durch Befahren des Bodens mit schweren Fahrzeugen auf, wodurch der Oberboden verdichtet wird. Fraglich ist nun, ob während der Grabaushebung Kräfte wirken, die zu einer Komprimierung der Bodenschicht *unterhalb* der Grabsohle führen können. Eine hieraus resultierende grössere Lagerungsdichte würde zu einer geringeren Wasserleitfähigkeit führen und eine Vernässung des Bodens begünstigen.

Die Grabsohle befindet sich in der Regel in einer Bodentiefe von 1.5 bis 2 Meter. Die Lagerungsdichte ist in diesen Tiefen bereits natürlicherweise recht gross. Pro Quadratdezimeter kommt in zwei Meter Tiefe 20 dm<sup>3</sup> Erdmaterial zu liegen. Bei einer durchschnittlichen Lagerungsdichte von 1.5 kg/dm<sup>3</sup> ergibt dies 30 kg Gewicht pro Quadratdezimeter oder 0.3 bar natürlicher Bodendruck an der Grabsohle. Eine weitere Verdichtung benötigt folglich dementsprechend stärkere Drücke. Beim maschinellen Aushub ist von der Grabschaufel eine eher geringe vertikale Druckausübung auf den Boden zu erwarten. Werden die Gräber von Hand ausgehoben, wirkt das Körpergewicht auf den Boden ein. Eine Überschlagsrechnung zeigt dessen Grössenordnung: Das Körpergewicht (75 kg) soll sich gleichmässig auf die beiden Schuhsohlen (5 dm<sup>2</sup>) verteilen. Hieraus ergibt sich ein Bodendruck von 0.15 bar. Beim Umhergehen auf der Grabsohle vergrössert sich allerdings dieser Druck in Abhängigkeit der Auflagefläche auf mehr als das doppelte. Eine gewisse Verdichtung des Untergrundes ist deshalb nicht auszuschliessen. Insbesondere bei tonigen und "relativ weichen" Böden ist eine Verdichtung durch eine Zerstörung der Struktur denkbar.<sup>10</sup>

### 3.4.2. Mechanische Schleifschicht

Die Ausbildung einer Schleifschicht ist im tonigen Substrat denkbar, wenn mit der Baggerschaufel der Grabsohle entlang gezogen wird. Die feinen Tonplättchen richten sich horizontal aus, was zu einer vertikalen Abnahme der Wasserleitfähigkeit führt. Zur Veranschaulichung kann dieser als Anisotropie<sup>i</sup> bezeichnete Effekt mit der Beregnung eines Strohdachs verglichen werden: Obwohl der hydraulische Gradient im Sinne der Gravitationskraft abwärts gerichtet ist, fliesst das Wasser zur Hauptsache in Schichtrichtung des Strohstrahls weg. Nur langsam dringt es auch quer zur Schichtung in das Dach vor, und erst bei einem Überstau tropft es von der Unterseite ab.<sup>11</sup>

Im Friedhof muss die Ausbildung einer Schleifschicht und ihre allfällige wasserstauende Wirkung allerdings erst noch geprüft werden. Bei der Feldstudie im Friedhof Zürich-Affoltern (siehe unten) erfolgte der Aushub mit einer zweihändigen Baggerschaufel. Nach dem Zufassen riss diese das Erdmaterial vom Boden empor. Die zurückbleibende Oberfläche hatte die Qualität einer Bruchstelle. Eine Schleifschichtbildung musste nicht befürchtet werden.

---

<sup>i</sup> Von Anisotropie wird bei Bodenstrukturen gesprochen, wenn die Durchlässigkeit je nach Fließrichtung unterschiedlich ist.

### 3.4.3. Podsolierung

#### 3.4.3.1. Allgemeine Einführung

Bei der Podsolierung handelt es sich um eine abwärts gerichtete Verlagerung gelöster organischer Stoffe (Polyphenole, Carbonsäuren, Polysaccharide, Fulvosäuren) und von komplex gebundenem Eisen und Aluminium. Diese Verlagerung erfolgt aus dem organischen Oberboden in den mineralischen Unterboden. Der Podsolierung förderlich sind sandige Böden, stark saure Bedingungen und kühlfeuchte Verhältnisse, wodurch der mikrobielle Abbau der organischen Verbindungen gehemmt wird. Podsole entwickeln sich dementsprechend an Orten mit viel Niederschlag, tiefen Jahresmitteltemperaturen und calcium- und magnesiumarmen Böden.<sup>12</sup> In einem Subhorizont werden die gelösten Stoffe wieder ausgefällt und allmählich angereichert. Diese Einlagerungen entsprechen einer Horizontverdichtung, wodurch die Wasserleitfähigkeit stark abnehmen kann. Bei starker Podsolierung tritt als Resultat ein Ortstein-Iluvialhorizont auf.

Die Metallfreisetzung im Eluvialhorizont erfolgt durch einen Verwitterungsprozess an der Mineraloberfläche. Dieser Prozess wird durch Säuren, Basen (im Boden in der Regel nicht von Belang), Chelatbildner und durch Reduktion des Metalls verursacht.<sup>13</sup>

- Die Auflösungsrate steigt mit sinkenden pH-Werten stark an.<sup>14</sup> In den meisten Fällen von Mineralverwitterung sind allerdings Säurekonzentrationen zwischen  $10^{-3}$  und  $10^{-4}$  N notwendig, um gegenüber der Hydrolyse eine signifikant höhere Reaktionsrate zu erreichen.<sup>15</sup> Als Reagens sind hauptsächlich die freien Protonen sowie niedermolekulare organische Säuren beteiligt.<sup>16</sup>
- Durch Chelatbildung wird vor allem die Freisetzung von Aluminium, Eisen und Mangan sowie von Schwermetallen gefördert. Neben einfachen Liganden (Salizylsäure, Weinsäure, Zitronensäure, Oxalsäure) können auch Huminstoffe (insbesondere Fulvosäuren) beteiligt sein. Chelatbildner vermindern ferner die Wiederausfällung der Metallionen. Bei Konzentrationen von  $10^{-4}$  bis  $10^{-5}$  N können ungewöhnlich grosse Aluminiummengen im Bodenwasser gehalten werden.<sup>17</sup>
- Schwefelwasserstoff oder Hydrogensulfid sind für Eisenoxide besonders effiziente Reduktionsmittel.<sup>18</sup> Unter Sauerstoffausschluss findet ausserdem eine bakteriell-induzierte Reduktion von Eisen- und Mangan-Oxiden statt. Hierfür sind anaerobe Bakterien verantwortlich, die meistens an der Partikeloberfläche festgehaftet sind.

Die Wiederausfällung der metallorganischen Komplexe kann auf vielerlei Gründe zurückzuführen sein:

- Zumindest im Initialstadium der Podsolierung scheint ein höherer pH-Wert und eine höhere Ca-Sättigung im Subhorizont ein wesentlicher Faktor zu sein. Dies könnte einerseits zum Zerfall der metallorganischen Komplexe führen, andererseits zu deren Flockung. Zudem könnte eine Polymerisation der niedermolekularen organischen Säuren begünstigt werden, wodurch deren Löslichkeit sinken würde.<sup>19</sup>
- Die Löslichkeit der metallorganischen Komplexe nimmt mit zunehmendem Metallanteil ab. Die Biodegradation der Liganden oder aber eine zusätzliche Anlagerung von Aluminium- und Eisen-Ionen führen zu einer Ausfällung dieser Komplexe.<sup>20</sup>

- Beim Vorhandensein von Fulvo- und Huminsäuren können sich unlösliche Komplexe ausbilden.<sup>21</sup>
- Die gelösten Eisen- und Manganvorkommen können durch Oxidation und Oxidbildung zur Ausfällung gebracht werden.<sup>22</sup>

Ein bereits gebildeter Anreicherungshorizont wirkt selbst als Filter, wo organische Metallkomplexe sorbiert werden. Dies fördert die Ausfällung in einem relativ schmalen Horizont.

#### 3.4.3.2. Podsolierung auf Bestattungstiefe

Im Friedhof bildet die Grabsohle nebst dem Oberboden einen zweiten Übergang von organischem zu mineralischem Material. Die Voraussetzungen für einen Podsolierungsprozess sind an der Grabsohle aber ungünstig. Im Gegensatz zum Oberboden kann auf Bestattungstiefe davon ausgegangen werden, dass der Boden kalkhaltig ist. In Gegenwart von Kalk herrschen in der Bodenlösung Calciumionen und Hydrogencarbonat vor.<sup>23</sup> Dies hat gewichtige Auswirkungen auf den Verwitterungsprozess:

- Das Carbonat puffert die Protonenkonzentration auf ein tiefes Niveau, wodurch die protonen-beeinflusste Verwitterung ihre Bedeutung einbüsst.
- Calcium trägt zu einer raschen Immobilisierung organischer Substanzen bei.<sup>24</sup> Dies tangiert die durch organische Säuren und Chelatbildnern beschleunigte Verwitterung.
- Bei pH-Werten zwischen 3 und 3.5 findet die Reduktion von  $\text{Fe}^{3+}$  zu  $\text{Fe}^{2+}$  bereits unterhalb eines Redoxpotentials von 500-400 mV statt, ein Potential, das selbst in durchlässigen Böden vorgefunden werden kann.<sup>25</sup> Für kleinere Protonenkonzentrationen sinkt das Redoxpotential aber schnell auf Werte ab, die im Grabraum kaum mehr zu erreichen sind. Eine Freisetzung reduzierter Metallionen kann deshalb aufgrund der pH-Pufferung des Kalkes in keinem bedeutenden Ausmass erfolgen.

Doch auch unter kalkfreien Bedingungen wäre kaum mit einer starken Auswirkung auf die Verwitterungsrate zu rechnen. Einerseits findet die Leichenzersetzung hauptsächlich anaerob statt, was zu einer Alkalisierung der Umgebung führt. Die protonen-bedingte Verwitterung wird somit lokal abgeschwächt. Andererseits ist es fraglich, ob die ins Erdreich dringenden gelösten organischen Verbindungen überhaupt in einem Mengenbereich liegen, die eine wahrnehmbare Beeinflussung der Verwitterungsrate denkbar erscheinen lässt. Es wäre hierzu abzuklären, in welchen Konzentrationen organische Säuren und Chelatbildner in der Bodenlösung unterhalb der Grabsohle auftreten und wie sich diese Konzentrationen im Fortlauf der Zeit verändern.

Nebst den zu hegenden Zweifel an einer zusätzlichen Freisetzung metallischer Ionen im Grabraum ist aber auch hinter dessen Verlagerungsfähigkeit ein grosses Fragezeichen zu setzen. Während des Leichenabbaus werden Sulfide und Schwefelwasserstoff freigesetzt, die zur Ausfällung des zweiwertigen Eisens führen. Diese Begebenheit wird durch Beobachtungen bei Fossilausgrabungen auch tatsächlich bestätigt: Skelettfunde aus Sedimentgesteinen sind oft mit Pyrit-Ausfällungen umgeben, die ihrerseits von Kalkablagerungen eingeschlossen sind. Die Kalkausfällungen dürften dabei von der pH-Wert-Erhöhung herrühren, die durch den anaeroben Abbau des Tierkörpers ausgelöst wird.<sup>26</sup>

Untersuchungen von Bethell und Carver (1987) an Friedhofsböden lassen dennoch auf eine gewisse Manganverlagerung schliessen.<sup>27</sup> Die Friedhofserde zeigte, zumal an den Stellen,

wo die Leichenreste gefunden wurden, eine dunklere Bodenfarbe. Diese Bodenzone wurde untersucht und zudem die Bodensilhouette, welche noch immer die Form des menschlichen Skelettes nachgezeichnet hatte. Eine chemische Analyse der Silhouette zeigte für Phosphor, Kupfer und Mangan gegenüber der Referenzerde erhöhte Werte an. Der Mangangehalt war dabei auch grösser als in einem frischen Skelett. Deshalb nahmen Bethell und Carver an, dass Mangan während des Zersetzungsprozesses aus den umgebenden Bodenzonen abgezogen und um die Leiche aufkonzentriert wurde. Die erhöhte Kupferwerte erklärten sie sich durch die Freisetzung und Aufkonzentrierung während des Knochenabbaus. Diese Befunde wurden in lehmigem Boden gemacht.

Durch freigesetzte organische Säuren können Verwitterungsprozesse kürzerfristig leicht beschleunigt werden. Es ist aber mit keiner bedeutend erhöhten Verlagerungsmenge metallischer Ionen oder organischer Verbindungen zu rechnen. Dies wäre aber vonnöten, wenn ein ansonsten langwieriger Prozess sich innerhalb einiger Jahrzehnte signifikant auf den Wasserhaushalt auswirken soll.

### **3.4.4. Organische Porenverstopfung**

#### **3.4.4.1. Durch Huminstoffe**

In der Natur fällt organisches Material hauptsächlich an der Bodenoberfläche an. Bei deren Abbau entstehen Huminstoffe, die für den Boden von grosser Wichtigkeit sind. Besonders hervorzuheben ist die Bedeutung für die Bodenstrukturierung. Die Huminstoffmoleküle verknüpfen sich in beliebiger Anordnung zu locker gebauten dreidimensionalen Netzwerken. Diese Konstruktionen sind für Wasser wie auch für Ionen von allen Seiten zugänglich. Es ergeben sich hieraus Eigenschaften wie hohe Wasserspeicherkapazität oder eine hohe Kationenaustauschkapazität (KAK). Durch die dreidimensionale Vernetzung gewinnt der Boden ausserdem an Elastizität, woraus sich ein gewisser Schutz vor Bodenverdichtung ergibt. Mit der Ausbildung von Ton-Humus-Aggregaten kann zudem die Bodendurchlüftung verbessert werden.

Die Strukturierung der Huminstoffe hängt stark mit dem Bodenleben zusammen. Insbesondere werden aber die Bodentiere in der Regel in Bestattungstiefen von annähernd zwei Metern ausbleiben. Der Humus bleibt deshalb auf der Grabsohle unstrukturiert liegen.<sup>28</sup> Die oben aufgeführten zersetzungsfreundlichen Auswirkungen auf die physikalischen Bodenparameter können somit nicht zum Tragen kommen. Gemäss dem Handbuch der Hygiene von 1912 verursacht eine Humusanreicherung im Gegenteil eine Zunahme von Zersetzungsstörungen: «Durch die Ansammlung von humösen Stoffen infolge der Leichenzerersetzung, womit auch eine Verkleinerung der Porenräume einhergeht, wird er 'verwesungsmüde', liefert erst verzögerte Verwesung und schliesslich die abnorme Umsetzung der Leichenwachsbildung.»<sup>29</sup>

Die sich unter dem Skelett bildende Humusschicht wird kaum selbst Ursache einer Wasserstauung sein. Hingegen könnten Huminstoffmoleküle in den Mineralhorizont verlagert werden und dort zu einer Verstopfung der wasserführenden Poren führen. Aufgrund des kalkhaltigen Bodens wird diese Verlagerung aber nicht über weite Strecken zu erwarten sein. Eine allfällige Porenverstopfung beschränkt sich auf die unterhalb der Humusschicht anschliessende Bodenzone. Zumindest im Zwischengrabraum müsste deshalb die normale

Tiefensickerung weitergehen können. Gemäss OTTMANN ist pro Grab mit einer Friedhofsfläche von 9 m<sup>2</sup> und einer Grabfläche von 3 m<sup>2</sup> zu rechnen.<sup>30</sup> Auf zwei Dritteln des Friedhofgeländes müsste demnach die Versickerung ihren normalen Lauf nehmen können.

#### 3.4.4.2. Durch Bakterien

Die während des Leichenabbaus im Körper sich in grosser Zahl bildenden Bakterien werden zum Teil mit der austretenden Leichenflüssigkeit aus dem Körper geschwemmt. Mit dem Sickerwasser gelangen diese in den mineralischen Horizont, wo sie dem Wasser durch Filtration oder Adhäsion entzogen werden können. Bei verschiedenen Sandböden erwies sich die Wirkung der Filtration als umgekehrt proportional zur Partikelgrösse. Ferner hat die Grösse und die Form der Bakterien Einfluss auf ihre Filtrierbarkeit.

Für die Adhäsion sind die Tonmineralien aufgrund ihrer flächigen Form und ihrer grossen spezifischen Oberfläche ein ideales Substrat.<sup>31</sup> Die Adhäsion gewinnt deshalb mit dem Tongehalt der Böden an Bedeutung. Förderlich sind ausserdem hohe Kationenkonzentrationen und tiefe pH-Werte.<sup>32</sup> Auch hängt die Adhäsion vom Bakterientyp ab.

In einem Laborexperiment<sup>33</sup> hat sich gezeigt, dass Bakterien bei einer guten Nährstoffversorgung nach der Adhäsion in Bodenporen zu einem Biofilm angewachsen sind. Die Porosität und die Wasserleitfähigkeit wurde hierdurch beträchtlich erniedrigt. Bei kleinen Porengrössen wurde dieser Effekt ferner durch die Filtration noch verstärkt.

In der Natur tritt dieses Phänomen in verschmutzten Grundwasserleitern auf, wo durch Bakterienwachstum die Wasserleitfähigkeit beeinträchtigt wird.<sup>34</sup> Von Böden liegen hingegen keine derartigen Beschreibungen vor. Im Oberboden ist die Biofilmbildung in die dynamischen Wechselwirkungen zwischen den biotischen und abiotischen Ökofaktoren eingebunden: Die Porenverstopfungen werden durch porenbildende Prozesse kompensiert und fallen deshalb nicht ins Gewicht. Im mineralischen Unterboden dürfte normalerweise die kontinuierliche Nährstoffnachlieferung nicht gewährleistet sein, die für ein Bakterienwachstum notwendig ist.

Zur genaueren Abschätzung der Tragweite einer allfälligen Porenverstopfung durch Biofilmbildung wäre eine Untersuchung des Ausbreitungsverhaltens der Fäulniskataboliten unterhalb der Grabsohle vonnöten. Vom Verbreitungsmuster der Nährstoffe hängt die räumliche Ausdehnung der bakteriellen Porenverstopfungen ab, die Nährstoffkonzentration bestimmt die maximal mögliche Biofilmdicke<sup>35</sup>. Doch damit überhaupt ein Bakterienwachstum erfolgen kann, muss die Nährstoffkonzentration einen Schwellenwert überschritten haben.<sup>36</sup> Ein Absinken der Nährstoffversorgung unterhalb des Schwellenwertes dürfte sodann zum Zerfall des Biofilms führen.<sup>37</sup> Doch wie bereits bei der Podsolierung ist auch hier anzumerken, dass aufgrund der Barrierewirkung des Sargbodens und des Kalkgehaltes des Bodens die Ausbreitung der organischen Verbindungen im Boden beeinträchtigt ist.

Nach einer eventuellen Biofilmbildung wird sich mit dem Abschluss der Leichenfäulnis die Nährstoffversickerung schnell abschwächen, was zum autolytischen Abbau des Bakterienfilmes führen müsste. Im Anschluss an eine Erdbestattung kann die Biofilmbildung deshalb höchstens als vorübergehende Erscheinung eintreten. Falls die Autolyse mit der Freisetzung von Sporen einhergehen sollte,<sup>38</sup> könnte sich dies nach einer Neubelegung des Grabes beschleunigend auf das Bakterienwachstum auswirken. Da es sich aber bei der Erdbestattung

um einen stark beschränkten Nährstoffeintrag handelt, ist selbst dann nicht mit einer ausgeprägten Biofilmbildung zu rechnen.

### 3.4.5. Tonverlagerung

Zu Beginn dieses Kapitels wurden die spezifische Oberfläche und die Lagerungsdichte als die beiden wichtigsten Einflussfaktoren für die Stauschichtbildung vorgestellt. In einem durch Verlagerung entstandenen Tonanreicherungshorizont werden gleich beide Faktoren erhöht. Die Auswirkung auf die spezifische Oberfläche ist dabei speziell herauszuheben. Stark quellfähige Tonminerale weisen sich nicht nur durch eine grosse spezifische Oberfläche aus, sie werden auch leichter dispergiert und verlagert. Ein Toneinlagerungshorizont müsste demnach durch einen grösseren Anteil an quellfähigen Tonmineralien erkennbar sein.

Die Tonverlagerung ist stark vom herrschenden pH-Wert abhängig. Für die Verlagerung günstig sind Werte zwischen 5 und 7. Bei höheren pH-Werten führen hohe Calcium-Sättigungen zur Ausfällung der Tonminerale, bei tieferen Werten verhindern Aluminium-Ionen deren Verlagerbarkeit. Ausserdem beeinflusst die Salzkonzentration des Bodenwassers den Verlagerungsprozess der Tonminerale. Durch eine geringe Ionenkonzentration bildet sich um ein Tonteilchen ein grösserer Wassermantel aus, wodurch sich die hydrophilen Eigenschaften erhöhen.<sup>39</sup>

Die Ausfällung der Tonminerale kann durch eine erhöhte Salzkonzentration oder Calcium-Sättigung in einem tieferen Bodenhorizont verursacht sein. Diese bewirken eine Ausflockung der Tonminerale, die sich als typische Wandbeläge (Ton-Cutane) in den Poren anlagern.<sup>40</sup> Der zweite wichtige Ablagerungsprozess im Unterboden dürfte die Abfiltration der Tonpartikel in feinkörnigen Horizonten sein.

Nebst der Einlagerung von Tonmineralien kann eine Anreicherung auch durch Tonneubildung erfolgen. Mit der Bestattungspraxis sind drei Faktoren in Betracht zu ziehen, die zu Tonbildung führen können:

- Tonminerale entstehen zu einem grossen Teil aus Silikatverwitterung, die vor allem durch Säurewirkung, aber auch durch Komplexbildung und Reduzierung beschleunigt werden kann. Sowohl Säuren wie auch Chelatbildner und Reduktionsmittel werden als Fäulnis-kataboliten aus der Leiche ausgestossen. Aufgrund des Kalkgehaltes ist in Bestattungstiefe aber dennoch nicht mit einer forcierten Silikatverwitterung zu rechnen (vgl. Kap. 3.4.3.2. Podsolierung auf Bestattungstiefe).
- Natrium ist nach Ammonium das zweithäufigste Kation, das in der Bodenlösung unterhalb einer Leiche wiedergefunden wird.<sup>41</sup> Ihm eigen ist eine starke Anziehungskraft auf Wasser. Mit Natriumionen besetzte Bodenpartikel quellen deshalb stark auf und können zu kleineren Teilchen zerfallen. Hierdurch entstehen staubartig feine Tonminerale, die mit dem Bodenwasser versickern und zu Porenverstopfungen führen können.<sup>42</sup> Die Bindung des Natriums an die Tonminerale wird durch Calcium und Magnesium konkurrenziert. Deren Konzentrationen müssen deshalb klein sein, damit der geschilderte Vorgang stattfinden kann.
- Der Aushub des Grabes führt zu einer teilweisen Zerstörung der Aggregate des Bodens. An den Bruchstellen können hierdurch Tonminerale freigelegt und bei entsprechenden Bedingungen mit dem Bodenwasser verlagert werden.

Die Tonbildung durch Silikatverwitterung oder durch den "Natrium-Effekt" scheitert im Schweizer Mittelland an der hohen Calcium-Sättigung in Bestattungstiefe. Die aus Bodenaggregaten herausgebrochenen Tonminerale lassen sich aus demselben Grund nicht bis an die Grabsohle verlagern und flocken noch in der durch die Grabaushebung aufgelockerten Bodenzone aus.

### 3.5. Feldabklärungen im Friedhof Zürich-Affoltern

Zu Beginn der Diplomarbeit stand die Mutmassung im Raume, dass bei einer wiederholten Belegung der Gräber die Zersetzungsstörungen bei erdbestatteten Leichen zunehmen könnte. Es liessen sich verschiedene Hinweise finden, die für die Existenz "verwesungsmüder Böden" sprachen. Eindeutige Belege blieben hingegen aus.

BS 1	Im alten Friedhofsteil gelegen. Hier fanden bis ungefähr 1930 Bestattungen statt.
BS 2	Referenzboden für BS 3 grundwasserflussabwärts
BS 3	Im Grabfeld 1 gelegen, wo bald zum zweiten Mal bestattet wird. Die Erstbelegung fand vor rund 25 Jahren statt.
BS 4	Referenzboden für BS 3 grundwasserflussaufwärts
BS 5	Das offene Grab im aktuellen Bestattungsfeld stand ebenfalls zur Verfügung.

Tab. 3.5: Kurzbezeichnung und Charakterisierung der Baggerschlitze (BS) auf dem Friedhof Zürich-Affoltern.

Feldabklärungen im Friedhof

Zürich-Affoltern sollten Fortschritte bei der Klärung dieser Frage bringen. Es standen fünf Baggerschlitze (BS) zu Beobachtungen und Probenahmen zur Verfügung (vgl. Tab. 3.5). Ein detaillierterer Beschrieb der Sondierung sowie das Datenmaterial sind im Anhang D aufgeführt.

#### *Bodeneigenschaften*

In den BS 2, BS 3 und BS 4 sind die meisten mineralischen Bodenhorizonte durch sandigen Kies geprägt. Dementsprechend gut ist die Versickerungsleistung: Obwohl in den drei vorangegangenen Tagen mässige bis sehr starke Niederschläge auftraten, erwiesen sich die betrachteten Bodenprofile als bereits gut entwässert.

#### *Zersetzungsbefund der Leichen im BS 3*

Von der einen Leiche wurde der Schädelbereich freigelegt. Dieser war vollständig skelettiert. Auch im Schädelinnenraum blieben keine organischen Rückstände zurück. Von dem auf der Kopfseite anschliessenden Grab war die Fusspartie zu sehen, welche ebenfalls vollständig zersetzt war. Einzig blieben die Kunstfasersocken unzersetzt zurück. Geruchsemissionen konnten in diesem Baggerschlitz keine wahrgenommen werden. Von den Särgen verblieben stark verwitterte Holzreste, hingegen wurden keine Bretter mehr angetroffen.

### *Zersetzungsbefund zweier Leichen im BS 1*

Die angetroffenen Überreste zeigten vollständige Skelettierung. Die Knochen waren zum Teil schwammig und leicht zu zerbröckeln. Das Sargholz war vollständig zersetzt und der Sargumriss einzig durch eine stärkere Braunfärbung des Bodensubstrates erkennbar.

### *Beobachtungen*

- Bei der Profilbesichtigung konnten weder im BS 1 noch im BS 3 Anzeichen für Stauschichtbildung gefunden werden. Namentlich waren keine Anzeichen für reduzierende Bedingungen ersichtlich. Aufgrund der guten Entwässerungseigenschaften des Bodens konnte dies auch nicht erwartet werden. Doch auch bei Ausgrabungen mittelalterlicher Friedhöfe in Zürich (Münsterhof)<sup>43</sup> und in Aesch LU<sup>44</sup> wurden offenbar keine redoximorphen Merkmale beobachtet.
- Unterhalb der Grabsohle liessen sich keine organischen Einlagerungshorizonte ausmachen. Im BS 3 waren die stark verwitterten Holzreste noch klar zum darunter liegenden Sand abgegrenzt. Im BS 1, wo das Sargholz zersetzt vorlag, waren die Grenzen zum umgebenden Boden leicht verwischt. Aus der organischen Fraktion waren aber keine weiteren Verlagerungserscheinungen ersichtlich.
- Besonderes Interesse galt den Unterschieden zwischen dem BS 3 und seinen Referenzprofilen BS 2 und BS 4. Augenfälligster Unterschied war die gestörte Lagerung im BS 3. Im Gegensatz zu den Referenzprofilen bröckelte im BS 3 Erdmaterial aus der einen Seiten- und aus der Profilwand.
- Durch den Umschichtungsprozess während der Grabbelegungen verteilte sich der Kalk im BS 3 über das ganze Bodenprofil. Nur die obersten rund 40 cm (Ahy), die nach der Gräberräumung 1985 aufhumusiert wurde, war kalkfrei. Im BS 2 befand sich die Kalkgrenze auf 74 cm, beim BS 4 auf 160 cm Tiefe.

## **Offene Fragen**

- Lassen sich die maximal erreichten Körpertemperaturwerte in einer erdbestatteten Leiche mit Bodeneigenschaften wie durchschnittlicher Wassergehalt oder Wasserleitfähigkeit in einen Zusammenhang bringen?
- Lässt sich ein minimaler Anteil an grobkörnigem Erdmaterial nennen, bei dem in der Regel kein für den Zersetzungsprozess einer Leiche hinderliches Stauwasser auftreten kann?
- Können sich im Rahmen der normalen Bestattungstätigkeit die Bodeneigenschaften auf eine Weise verändern, dass sich hierdurch die Bedingungen für die Leichenzerersetzung verschlechtern?
- Lassen sich unterhalb der Grabsohle Bodenverdichtungen nachweisen (mechanischen Ursprungs oder durch Einlagerungen), die auf die Bestattungstätigkeit zurückzuführen sind?

- <sup>1</sup>Flühler (1991): S. 5-24 f.  
<sup>2</sup>Scheffer/Schachtschabel (1992): S. 171  
<sup>3</sup>vgl. Gisi (1990): S. 103  
<sup>4</sup>vgl. Gisi (1990): S. 30 f.  
<sup>5</sup>Gisi (1990): S. 28  
<sup>6</sup>Scheffer/Schachtschabel (1992): S. 423  
<sup>7</sup>mündliche Mitteilung Hj. Büchi  
<sup>8</sup>Rubner (1912): S. 187  
<sup>9</sup>Berg (1975): S. 91  
<sup>10</sup>mündliche Mitteilung Peter Weidler  
<sup>11</sup>Gisi (1990): S. 92  
<sup>12</sup>Scheffer/Schachtschabel (1992): S. 419  
<sup>13</sup>vgl. Sigg/Stumm (1994): S. 386 ff.  
<sup>14</sup>vgl. Sigg/Stumm (1994): S. 390 f.  
<sup>15</sup>Robert (1986): S. 481  
<sup>16</sup>vgl. Robert (1986): S. 476  
<sup>17</sup>a.a.O.  
<sup>18</sup>Sigg/Stumm (1994): S. 386  
<sup>19</sup>Scheffer/Schachtschabel (1992): S. 378  
<sup>20</sup>Robert (1986): S. 469  
<sup>21</sup>a.a.O.  
<sup>22</sup>a.a.O.  
<sup>23</sup>Gisi (1990): S. 29  
<sup>24</sup>vgl. Scheffer/Schachtschabel (1992): S. 378  
<sup>25</sup>Scheffer/Schachtschabel (1992): S. 378  
<sup>26</sup>mündliche Mitteilung von Thomas Bolliger, Oberassistent am Institut für Paläontologie der Universität Zürich.  
<sup>27</sup>aus Killam (1990): S. 63 f.  
<sup>28</sup>vgl. Rubner (1912): S. 197  
<sup>29</sup>Rubner (1912): S. 185  
<sup>30</sup>Ottmann (1987): S. 41  
<sup>31</sup>Gerba/Bitton (1984): S. 68  
<sup>32</sup>Gerba/Bitton (1984): S. 69 f.  
<sup>33</sup>vgl. Cunningham (1991)  
<sup>34</sup>vgl. McCarty (1984): S. 90 ff; Danielopol (1983): S. 17 ff.  
<sup>35</sup>McCarty (1984): S. 96 ff.  
<sup>36</sup>vgl. McCarty (1984): S. 95  
<sup>37</sup>vgl. McCarty (1984): S. 96  
<sup>38</sup>vgl. Schlegel (1992): S. 82  
<sup>39</sup>Scheffer/Schachtschabel (1992): S. 376  
<sup>40</sup>Gisi (1990): S. 91  
<sup>41</sup>vgl. Vass (1992): S. 1244  
<sup>42</sup>Fellenberg (1994): S. 83 f.  
<sup>43</sup>Gespräch mit Hr. Etter, Anthropologe, Privatdozent an der Universität Basel  
<sup>44</sup>Gespräch mit Hr. Bühl, Geologe und Bodenkundler bei der Oekogeo AG, Schaffhausen

## 4. HYGIENISCHE ASPEKTE IN FRIEDHÖFEN

### Zusammenfassung

Mit dem Eintritt des Todes verringert sich die Übertragungsgefahr von Infektionskrankheiten, da eine Leiche weder Speicheltröpfchen ausstossen (husten, niesen) noch Exkremente ausscheiden kann. Durch die Bestattung wird zudem der direkte Zugang zur Leiche unterbunden. Krankheitskeime sind nunmehr auf ein Transportmedium angewiesen, das sie wieder in Kontakt mit den Menschen bringt. Ein denkbarer Übertragungsweg ist die Verschleppung mit dem Sickerwasser ins Grundwasser, von wo die Krankheitserreger über die Trinkwasserfassung von neuem Menschen befallen könnten.

Verschiedene Widerstände stehen diesem Ausbreitungsweg der Infektionskeime entgegen. Im Boden treffen die Bakterien im Vergleich zum Körperinnern auf vollends andere Lebensumstände. Ein Krankheitserreger muss seine Existenzfähigkeit unter beiden Umweltbedingungen beweisen, um eine Gefahr darstellen zu können. In mineralischen Bodenhorizonten fehlt es den Mikroben ausserdem an Nährstoffen, die eine Populationsvermehrung zulassen würde. Bei den meisten Bakterien wird der Milieuwechsel und die im mineralischen Unterboden fehlenden Entwicklungsmöglichkeiten zu einer starken Dezimierung der Populationen führen. Des weitern wirkt dem Bakterientransport die Filterwirkung des Erdmaterials entgegen. Die Filterwirkung nimmt mit der Feinkörnigkeit und insbesondere mit dem Tongehalt des Bodens zu. Um eine ernsthafte Kontamination des Grundwassers herbeiführen zu können, müssten somit die Krankheitskeime in grosser Zahl aus der Leiche freigesetzt werden und zwischen Grabsohle und Grundwasser dürfte sich lediglich eine schlecht filtrierende Bodenschicht geringer Mächtigkeit befinden. Eigens zu betrachten sind Krankheitskeime mit Dauerformen (z.B. Sporen des Milzbranderreger), die im Boden möglicherweise über Jahrzehnte zu überleben vermögen. Die Krankheitsausbreitung aus einer ordentlich bestatteten Leiche ist aber äusserst unwahrscheinlich.

Eine stoffliche Beeinträchtigung des Bodens oder des Grundwassers durch organische Abbauprodukte ist unwahrscheinlich. Hierfür ist die eingebrachte Menge an organischem Material zu gering. Eine Freisetzung von gelöstem Quecksilber aus den Zahnfüllungen ist ebenfalls nicht zu befürchten, da sich das in der Zahntechnik verwendete Amalgam im Boden als persistent erwiesen hat.

## 4.1. Geschichtlicher Rückblick

Noch in der Reformationszeit bestimmten in erster Linie Theologen die Bestattungsrituale und führten leidenschaftliche Dispute darüber.<sup>1</sup> Mit dem Einzug der Wissenschaft in den menschlichen Alltag - der "Entzauberung der Welt" (Max Weber) - emanzipierte sich das Bestattungswesen zunehmend vom Diktat der Kirchen. Dafür griff im 18. Jahrhundert die medizinische "Polizey" in die Diskussion um die Totenbestattung ein. Zwei Gründe lassen sich für diese Entwicklung anführen:<sup>2</sup> Durch den Miteinbezug des Sterbens in die kritische Naturbeobachtung entdeckte man das Phänomen des Scheintodes. Eine breite Phobie vor dem Lebendig-begraben-Werden griff um sich. Um Sicherheit über den erfolgten Tod zu erlangen, wurde die behördliche Leichenschau eingeführt.<sup>3</sup> Zum andern weckte die "Miasmenlehre", deren Vertreter eine Krankheitsübertragung durch schlechte Gerüche und Ausdünstungen verfochten hatten, die Angst vor der Ansteckung durch Leichen. Welche ausserordentliche Gefährlichkeit den Leichengasen zugemessen wurde, zeigt folgender Bericht aus dem Krimkrieg (1853-1856):<sup>4</sup>

«Diejenigen, welche erst neulich unsere tapferen Soldaten in der Krim waren, sind unwillkürlich so verderbliche Feinde für ihre Waffen-Nachfolger geworden, als die Russen selbst. Dünn, oder bisweilen gar nicht bedeckt vom Boden, hauchen ihre Leiber ein pestilenziarisches Miasma aus, welches so sicher wie Pulver und Blei tödtet und die Zuverlässigkeit des Gewehrs übertrifft. Zwar ist ein Bischof abgeschickt worden, die Gruben einzusegnen, in denen die Leichen aufgethürmt werden, aber die Ansteckung trotz der Einsegnung ebenso sehr, wie dem Weihwasser. (...) Treu bis zum Tode, wie es unsere Verbündeten sind, können sie doch nicht treu nach dem Tode sein, wenn sie auch wollten. Dieselben Franzosen, welche uns mit ihren Säbeln retteten, vergiften uns durch ihre Fäulnis.»

Das 19. Jahrhundert brachte mit der Hygienischen Bewegung tiefgreifende Änderungen im Bestattungswesen. In den 30er Jahren des letzten Jahrhunderts gab die Cholera den Anstoss zu neuen Diskussionen um die Verlegung der Grabstätten aus den Stadt- und Dorfkernen.<sup>5</sup> Im Kanton Tessin legte der grosse Rat per Gesetz fest, dass die Gottesäcker vom bewohnten Gebiet zu entfernen seien. Im gleichen Gesetz wurde die Verwendung eines Sarges vorgeschrieben, um «die Ausdünstung von Krankheitserregern zu vermeiden».<sup>6</sup> Es waren die sogenannten "Hygieniker", die Vorgänger der heutigen Präventivmediziner, sowie die Städtebauer und Technokraten, welche im 19. Jahrhundert die wichtigsten Entscheidungen im Bestattungswesen nachhaltig beeinflussten. Der Friedhof wurde nun in erster Linie als "sanitäre Anlage" betrachtet.<sup>7</sup>

Im letzten Jahrhundert entbrannte um die Bestattungsart zudem ein leidenschaftlicher Streit. Kremationsbefürworter verbreiteten schwerste hygienische Bedenken gegenüber dem Erdgrab. Sie hegten die Befürchtung, dass durch Friedhöfe «Boden, Wasser und Luft in bedenklicher Weise verunreinigt werden und dass besonders zu Zeiten von Epidemien die Friedhöfe Gelegenheit zur Weiterverbreitung der Krankheit geben dürften.»<sup>8</sup> Der Mediziner Küchenmeister führte diese Argumente noch weiter aus. Er bekämpfte das Erdgrab, weil es:<sup>9</sup>

- a. durch die in ihm erzeugten Fäulnisgase die Bodenluft verdirbt und diejenige dem Boden nächste Luftschicht der Erde, in der wir leben, direkt verunreinigt; auch wohl mechanisch ihr aus Leichen, die an ansteckenden Krankheiten sterben und in der Erde verwesen, moleculare Infectionsstoffe (Giftstaub) zuführt;
- b. weil dieselben gasigen Produkte, insofern sie von Wasser resorbierbar sind, oder die als Leichenlauge abfliessenden Salze oder Laugen in das Grundwasser und mit ihm ins Trink-

wasser dringen, welches sie theils ... verunreinigen, ... theils aber geradezu durch jene mit fortgerissenen ... Infectionsgiftkeime die Brunnen und dadurch die Menschen vergiften und die Verbreitung von Infectionskrankheiten begünstigen und herbeiführen ...;»

Am Ende des 19. und zu Beginn des 20. Jahrhunderts konnte die Unschädlichkeit der "Leichengase" nachgewiesen werden. Die Miasmenlehre verlor sich in der Bedeutungslosigkeit. In Friedhöfen galt die Aufmerksamkeit stattdessen vermehrt der Beeinträchtigung des Grundwassers. Bei mehreren Untersuchungen konnten aber keine Verschmutzungen festgestellt werden: «Im Gegenteil hat sich sogar nicht selten gezeigt, dass das Grundwasser der Friedhöfe besser war als das von Flachbrunnen in der zugehörigen Ortslage. Das ist verständlich, wenn man berücksichtigt, dass mit den Leichen einer Ortschaft jährlich nur etwa 1/70 der Menge fäulnisfähiger Substanzen in den Boden gelangt, die von den Lebenden an Abgängen (ohne Wirtschaftsabwässer) geliefert werden und die mindestens in nicht kanalisierten Orten doch ganz überwiegend dem Boden in der Ortschaft und in ihrer Umgebung zugeführt werden.»<sup>10</sup>

Die Sichtweise der Leiche als Krankheitsherd und Schadstoffquelle hielt sich indes hartnäckig. Im Frühjahr 1996 konnte man sich dessen in Zürich bei Diskussionen um einen geplanten Muslimfriedhof wieder gewahr werden (vgl. Kap. 5.4.1. Exkurs zum Muslimfriedhof in Zürich).

## 4.2. Bakterien und Viren

Mit dem Eintritt des Todes verringert sich die Gefahr einer Krankheitsübertragung auf die Mitmenschen. Hermann Mooser, emeritierter Professor für Hygiene und Bakteriologie an der Universität Zürich, pflegte diesen Sachverhalt mit markigen Worten an die Studierenden weiterzugeben: «Leichen stellen keine Übertragungsgefahr für Infektionskrankheiten dar, denn sie niesen, husten und scheissen nicht!»<sup>11</sup> Durch die Inhumation eines Toten wird das Risiko einer Krankheitsübertragung zusätzlich verringert, da der direkte Kontakt zur Leiche unterbunden wird. Von einer ordentlich bestatteten Leiche ist kein Fall bekannt, wo eine Krankheitsübertragung aufgetreten wäre.

Krankheitskeime in bestatteten Leichen sind auf ein Transportmedium angewiesen, das sie zu ihrem Wirt zurückbringt. Pasteur vermutete, dass Milzbrandsporen durch Regenwürmer an die Erdoberfläche verschleppt werden könnten, was aber bereits von Koch durch Versuche als unberechtigt erwiesen und nie durch praktische Erfahrung bestätigt worden ist.<sup>12</sup> Ein zweiter Infektionsweg führt durch den Boden ins Grundwasser, von wo Krankheitskeime über eine Wasserfassung in die Anthroposphäre zurückkehren könnten. Allerdings handelt es sich dabei im allgemeinen um einen Kurzschluss von Wasserversorgung und Abwasserentsorgung.

Auf dem Weg zum Grundwasser wirken zwei dezimierende Faktoren auf die Krankheitserreger ein: Zum einen sterben die Keime ab, zum andern werden sie an Bodenpartikel gebunden und somit am Weitertransport gehindert. Gleichzeitig findet aufgrund des unterhalb der Grabsohle fehlenden Nährstoffangebotes kaum mehr eine Reproduktion der Bakte-

rien statt. Mit zunehmender Bodentiefe ist deshalb mit einer kontinuierlichen Abnahme der Keimzahl zu rechnen.<sup>13</sup> Damit im Grundwasser die Keimzahlen auf bedenkliche Werte ansteigen können, müssten Krankheitserreger somit in grosser Zahl freigesetzt werden. Das Ausbreitungsrisiko von Krankheitserregern hängt also vom Umfang an ausgebrachten Keimen ab, von der Überlebenschancen auf dem Weg zum Grundwasser sowie von ihrer Transportierbarkeit.

#### 4.2.1. Austrag an Krankheitskeimen aus Leichen

Im toten Körper vermögen sich die meisten Krankheitserreger nicht lange zu halten. Im Verlaufe des Fäulnisprozesses werden sie durch anaerobe Bakterien beeinträchtigt.<sup>14</sup> Eine umfassende Untersuchung der Überlebensfähigkeit von pathogenen Bakterien und Viren in Leichen konnte allerdings nicht gefunden werden. Zu einzelnen Krankheitskeimen sind in der Literatur aber genauere Angaben zu ihren Überlebenschancen zu finden:

- Einem neueren Artikel von HEALING (1995) zufolge ist die Wahrscheinlichkeit klein, dass die Erreger der Pest, von Cholera, Typhus und der Tuberkulose in einer bestatteten Leiche während längerer Zeit überlebensfähig sind. Die alten Massengräber aus den Seuchenjahren stellen somit keine Gefahr dar.<sup>15</sup>
- In einer medizinischen Dissertation zur "Schädlichkeit" von Friedhöfen aus dem Jahre 1932 setzt Hedwig Schaub einen zeitlichen Rahmen fest: Demnach ist der Verbreitung von spezifischen Krankheitskeimen (z.B. Typhus oder Pest) eine zeitliche Schranke von drei bis vier Monaten gesetzt.<sup>16</sup>
- Tuberkelbazillen, obwohl mikroskopisch noch nachweisbar, liessen sich bereits nach vier Wochen nicht mehr züchten.<sup>17</sup>
- Ein verwandter Erreger der Creutzfeld-Jakob-Krankheit vermochte eine dreijährige Bestattungszeit zu überleben, seine infektiöse Wirkung nahm aber um einen Faktor 100 ab.<sup>18</sup>
- Unter Laborbedingungen konnten HIV-Viren in konserviertem Gewebe während vieler Tage überleben.<sup>19</sup> In einer bestatteten Leiche ist hingegen nicht mit einer langen Überlebenszeit zu rechnen.

Todesursachen wie Herz-Kreislauf-Erkrankungen und Krebs sind heute bedeutend wichtiger geworden als infektiöse Krankheiten. In vielen Leichen werden deshalb die stark infektiösen Keime fehlen. Im Körper ist hingegen eine Vielzahl von Darmbakterien anzutreffen, die während der Leichenzersetzung freigesetzt werden und ebenfalls ein hygienisches Problem darstellen können.

#### 4.2.2. Überlebensfähigkeit von Krankheitserregern im Boden

Mit dem Übertritt aus der Leiche in den Boden treffen Bakterien auf völlig andere Umweltbedingungen. Ein Krankheitserreger, der sich aus einer Leiche im Boden ausbreiten möchte, muss seine Überlebensfähigkeit in beiden Milieus unter Beweis stellen. Viele Mikroorganismen sind aber auf bestimmte Lebensbedingungen spezialisiert. Das Zusammentreffen zweier so unterschiedlicher Milieus dürfte deshalb für die Ausbreitung vieler Bakterien ein unüberwind-

bares Hindernis sein. Eine Ausnahme können die Arten darstellen, die sich in eine Dauerform umzuwandeln vermögen (z.B. Sporenbildung des Milzbranderreger, vgl. unten).

Bei den verschiedenen Bakterienarten variiert die Überlebensdauer im Boden stark. Bei den meisten pathogenen Darmbakterien genügen zwei bis drei Monate, um eine Reduktion der Keimzahl auf ein vernachlässigbares Mass zu erreichen.<sup>20</sup> Dies ergaben verschiedene Untersuchungen, die zur Abschätzung der Ansteckungsgefahr beim rohen Verzehr organisch gedüngter Nahrungsmittel gemacht wurden. Sie beziehen sich demnach auf den Oberboden. Im Bestattungshorizont können sich diese Werte etwas verschieben. Die verschiedenen Faktoren, die auf die Überlebensdauer von Darmbakterien im Boden Einfluss nehmen, sind:<sup>21</sup>

Feuchtigkeitsgehalt	In feuchten Böden und während Perioden starken Niederschlages sind die Überlebenszeiten länger. Dementsprechend verkürzt sich die Überlebenszeit in sandigen Böden mit geringer Wasserrückhaltekapazität.
Temperatur	Bei tiefen Temperaturen verlängert sich die Überlebenszeit (Selbstdesinfektion des Bodens ist verlangsamt oder ganz ausgesetzt): längere Überlebenszeit im Winter als im Sommer (90 %-Reduktion von Koliformen: im Sommer 3.3 Tage, im Winter 13.4 Tage). Ein häufiger Wechsel von Gefrieren und Auftauen führt andererseits zu zellulären Schädigungen.
pH	In sauren Böden (pH 3-5) ist die Überlebenszeit kürzer als in alkalinen Böden (Einfluss auf die Lebensfähigkeit, Nahrungsverfügbarkeit und Aktivität von Hemmstoffen).
Sonnenlicht	An der Erdoberfläche verkürzt sich die Überlebenszeit (UV-Strahlung wirkt bakterizid).
organische Substanz	Ausreichende Mengen an organischem Material verlängert die Überlebenszeit und erhöht die Möglichkeit zum Wachstum.
Konkurrenz durch Bodenbakterien (Antagonisten)	In sterilen Böden zeigen sich erhöhte Überlebenszeiten. Beispiel für aktive Hemmung: Actinomyceten sind imstande, das Wachstum von Salmonella und dysentery bacilli zu unterdrücken.

Auf Grabsohlentiefe treffen Darmbakterien vergleichsweise günstige Bedingungen an. Aufgrund der grossen Bodentiefe wird der Boden oft feucht und beständig kalt sein, der pH-Wert im neutralen oder leicht alkalischen Bereich (oft kalkhaltig!), zudem ist kein Sonnenlicht vorhanden, dafür zumindest im Bereich des Sarges über längere Zeit organisches Material. Die Konkurrenz durch Bodenbakterien hängt davon ab, in welcher Bodentiefe bestattet wurde. Mit zunehmender Tiefe nimmt im allgemeinen die mikrobielle Aktivität ab.<sup>22</sup>

Auf Grabsohlentiefe scheinen alle genannten Faktoren für die pathogenen Darmbakterien im allgemeinen günstig zu sein. Ihre Überlebensfähigkeit müsste sich somit im Vergleich zur Erdoberfläche (Überlebenszeit von 2 bis 3 Monate) vergrössern. Dennoch: Ein ganz wichtiges Kriterium für die Lebensdauer bleibt die Angepasstheit an eine Umwelt. Bei den Krankheitserregern wird es sich um mesophile Bakterien handeln (maximale Wachstumsrate liegt zwischen 20°C und 42°C), für welche die Temperaturen im Boden zu kalt sind. Mesophile

Bakterien dürften in der Aussenwelt in etwa eine maximale Lebensdauer von einem Jahr besitzen.<sup>23</sup>

Eine Sonderstellung betreffend der Überlebensfähigkeit von Krankheitskeimen nimmt der Milzbrand ein, dessen Erreger hochresistente Sporen zu bilden vermag. Die Sporenbildung tritt allerdings nur unter aeroben Bedingungen auf. Ein ausgeprägtes Sporenvorkommen setzt deshalb voraus, dass zum Todeszeitpunkt Blut aus dem Körper ausgetreten ist, in welchem entsprechende Bakterien enthalten waren.<sup>24</sup>

Eine Milzbrandinfektion aus nächster Nähe miterlebt hat Professor Hess, emeritierter Bakteriologe des Tierspitals Zürich. Hiervon betroffen war die Kuhherde eines benachbarten Bauernhofes. Die Krankheit brach nach starken Niederschlägen aus, die eine längere Trockenperiode abgelöst hatte. Für diesen Hof stellte es den zweiten Ausbruch von Milzbrand dar. Bereits 40 Jahre zuvor musste dieser Krankheit wegen eine ganze Kuhherde getötet werden. Die Kadaver vergrub man dannzumal an Ort und Stelle. Beim zweiten Auftreten wurden möglicherweise Milzbrandsporen mit dem Sickerwasser zur Wasserfassung transportiert, von wo sie in die Tiertränke gelangt sein könnten.<sup>25</sup> Sofern dieser Infektionsweg tatsächlich zutreffen sollte, wäre dies ein Beleg dafür, dass Milzbrandsporen auch nach 40 Jahren noch immer infektiös sein können. Eine Milzbrandinfektion des Menschen wäre aber dennoch unwahrscheinlich, da eine moderate Resistenz gegenüber dieser Krankheit besteht.<sup>26</sup>

#### 4.2.3. Transport von Krankheitserregern zum Grundwasser

Der Bakterientransport mit dem Sickerwasser durch den Boden wird von der Filtration und der Adsorption behindert. Die Filtrationswirkung des Bodens dürfte zu einem grossen Teil mit seiner Körnigkeit in Zusammenhang stehen. Dies belegen Studien mit Sandböden, wonach die Beseitigung von Bakterien aus einem Sickerwasser umgekehrt proportional zur Partikelgrösse erfolgt ist. Ferner nimmt auch die Grösse und Form der Mikroorganismen Einfluss auf die Filtration.<sup>27</sup>

Aufgrund ihrer geringen Grösse, ihrer oft flächigen Form und ihrer grossen spezifischen Oberfläche ist die Tonfraktion eine ideale Adsorptionssubstanz. Mit zunehmendem Tongehalt des Bodens gewinnt die Adsorption deshalb an Bedeutung.<sup>28</sup> Des weitern sind Faktoren der Adsorption förderlich, welche die abstossenden Kräfte zwischen zweier Oberflächen verringern. Diese Faktoren sind hohe Kationenkonzentrationen (z.B. die metallischen Kationen  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Cu}^{2+}$  und  $\text{Zn}^{2+}$  oder auch  $\text{NH}_4^+$ ) und tiefe pH-Werte. Gelöste organische Verbindungen können hingegen als Konkurrenz um die Adsorptionsplätze auftreten und somit die Adsorption der Bakterien an den Bodenpartikeln vermindern.<sup>29</sup>

In Laborexperimenten konnte gezeigt werden, dass die Verringerung der Ionenkonzentration im Bodenwasser zu einer verstärkten Auswaschung von Bakterien führt.<sup>30</sup> Die Adsorption erweist sich somit als reversiblen Prozess. In der Natur kann dieser Effekt beobachtet werden, wenn sich aufgrund starker Niederschläge die Ionenkonzentration im Bodenwasser verringert. Hierdurch werden die adsorbierten Bakterien und Viren mobilisiert und ihr Transport zum Grundwasser stark begünstigt. Verschiedene Studien zeigen denn auch tatsächlich, dass die grössten Trinkwasserverschmutzungen (die sich wohlgemerkt nicht in Friedhöfen zutragen) nach starken Niederschlägen aufgetreten sind.<sup>31</sup> Untersuchungen der

Trinkwasserqualität müssen deshalb Proben nach Perioden starken Niederschlags miteinschliessen.

In den Jahren 1976 und 1977 wurden in allen grösseren Friedhöfen Zürichs Proben aus Sickerleitungen genommen und nach den üblichen bakteriologischen Parametern untersucht.<sup>32</sup> Als Referenz wurden jeweils auch Proben aus Sickerleitungen genommen, die ausserhalb des Einzugsgebietes der Gräber lagen. Beim Friedhof Fluntern ergaben sich bei den Referenzproben durchwegs wesentlich schlechtere Werte. Die Werte aus dem Friedhof Albisrieden lassen ebenfalls darauf schliessen, dass andere Faktoren zu stärkeren Grundwasserverunreinigungen führen als die Bestattungstätigkeit: Hier waren vor allem die Fäkalbakterien (*E. coli*, *Enterokokken*) sehr zahlreich vertreten, obwohl der Friedhof nur noch selten mit neuen Gräbern belegt wurde. Die Stadtentwässerung Zürichs zog folgende Schlussfolgerungen aus den Messresultaten:

«Generell betrachtet kann die Verunreinigung der öffentlichen Gewässer durch Sickerwässer aus Friedhöfen vernachlässigt werden und zwar aus folgenden Gründen:

- Viele Sickerleitungen sind bereits ans Schmutzwassernetz angeschlossen.
- In keinem der Sickerwässer, die direkt in ein öffentliches Gewässer geleitet werden, wurden höhere Werte gefunden als die Kant. Verordnung über Allgemeine- und Wohnhygiene für Badewässer vorschreibt (in 100 ml max. 10'000 Coliforme und 100 Enterokokken). Man könnte also ohne weiteres in den Sickerwässern baden (sofern genug Wasser vorhanden) ohne gesundheitliche Risiken einzugehen.
- Da die Sickerwässer nach Einleitung in ein Gewässer noch stark verdünnt werden, sind keinerlei nachteilige Folgen zu erwarten.»

Bei dieser Untersuchung wurde leider davon ausgegangen, dass starke Regenfälle am Probenahmetag zu einer unerwünschten Verdünnung der Bakterienzahl führen würden, weshalb bei solchen Wetterbedingungen auf Probenahmen verzichtet wurde. Tatsächlich scheinen aber gerade hohe Niederschlagszahlen zu einer verstärkten Mobilisierung von Bakterien beizutragen (siehe oben). Bei weiteren Untersuchungen sollte dies mitberücksichtigung finden.

Eine vertiefte Auseinandersetzung mit den Krankheitserregern lag aufgrund der beschränkten Zeitressource nicht im Bereich des möglichen. Durch das Studium der Übertragungswege der einzelnen Krankheitserreger liesse sich genauer abschätzen, bei welchen Krankheiten eine potentielle Ansteckungsgefahr vorhanden ist. Das von der US-amerikanischen Public Health Association herausgegebene Buch "Control of Communicable Diseases in Man" könnte für diese Arbeit von grossem Nutzen sein. Für jede übertragbare Krankheit wird darin die Übertragungsart umschrieben. (Alle zwei Jahre erscheint eine Neuauflage.)

### 4.3. Beeinträchtigung durch organische Abbauprodukte

Zur Abschätzung der Schadwirkung einer stofflichen Verunreinigung sind jeweils die Qualität (z.B. Toxizität, Abbaubarkeit) und die Quantität des Eintrages gegeneinanderzustellen. Bei

der Leichenzersetzung ist als Stoffeintrag in den Boden vor allem die Fäulnisflüssigkeit anzusprechen (vgl. Kap. 1.3. Fäulnis und Verwesung), wobei in der "Leichenflüssigkeit" aufgrund des Ausgangssubstrates hauptsächlich mit Eiweisskataboliten und wasserlöslichen Fettsäuren zu rechnen ist. In der Literatur sind an verschiedenen Orten Abbauprodukte aufgeführt,<sup>33</sup> in aller Regel aber ohne Mengenangaben. Eine genaue stoffliche Zusammensetzung der "Leichenflüssigkeit" liegt indes nicht vor. Eine Zusammenstellung der in der Literatur gefundenen Abbauprodukte ist im Anhang C wiedergegeben.

#### 4.3.1. Toxizität der Leichenkatabolite

Um Aussagen zur Ökotoxizität der Abbauprodukte machen zu können, wären Mengenangaben zu den freigesetzten Kataboliten vonnöten. Diese sind grösstenteils nicht vorhanden. Da es sich um den Abbau eines organisch gewachsenen Körpers handelt - ein Prozess, der in der Natur fortwährend abläuft - muss nicht mit einer toxikologischen Beeinträchtigung des Ökosystems Boden gerechnet werden. Etwas anders sieht es bei einer Auswaschung der Katabolite ins Grundwasser aus. Als Nährstoff- und Energiequelle können organische Verbindungen zu einer gesteigerten mikrobiellen Aktivität im Grundwasserleiter führen. Diese zusätzliche Sauerstoffzehrung kann sich auf die biologische Integrität der dortigen Lebensgemeinschaft zerstörend auswirken.<sup>34</sup> Einer Beeinträchtigung des Grundwasserleiters wirkt allerdings der Boden als Filter entgegen, zudem sind die organischen Stoffeinträge im Friedhof als sehr gering zu betrachten (vgl. Kap. 4.3.3. Quantitative Vergleiche). Bei einer sorgfältigen Überprüfung der Toxizität wäre das Augenmerk vorab auf die alkaloidähnlichen Verbindungen zu richten, die beim Proteinabbau anfallen.<sup>35</sup>

#### 4.3.2. Transport der Leichenkatabolite

Die Transportierbarkeit einer organischen Verbindung im Boden hängt weitgehend von ihrer Verteilung zwischen der Festphase (Bodenpartikel) und dem Wasser ab.<sup>36</sup> Gut wasserlösliche Verbindungen werden deshalb in der Regel besser und schneller verlagert als lipophile Substanzen. Allerdings erweisen sich wasserlösliche Substanzen oft als gut abbaubar, was mit der freien Zugänglichkeit für Mikroorganismen zusammenhängt. Empirische Daten zur Verlagerung von Leichenkataboliten liegen jedoch keine vor.

#### 4.3.3. Quantitative Vergleiche

Im Kapitel "Zersetzung des Menschen" ist in Tabelle 1.2 die chemische Zusammensetzung einer Leiche wiedergegeben. Aus diesen Angaben lässt sich für den betreffenden Körper ein Trockengewicht von knapp 25 kg errechnen. (An anderer Stelle wird das Trockengewicht des menschlichen Körpers mit nur 14 kg angenommen.<sup>37</sup>) Um das Trockengewicht des Weichgewebes zu erhalten, ist von diesen 25 kg das Trockengewicht des Skelettes abzuziehen, woraus sich einen Wert von gut 14 kg ergibt. Bei einer angenommenen Grabfläche von 2 Quadratmeter und einer Belegungsfrequenz von 20 Jahren ergibt dies für die betrachtete Leiche rund 350 Gramm organische Trockensubstanz pro m<sup>2</sup> und Jahr. Wenn der Gesamtflächenbe-

darf eines Friedhofes einberechnet wird, der durchschnittlich rund 10 Quadratmeter pro Grab beträgt,<sup>38</sup> resultieren rund 70 Gramm organische Trockenmasse pro m<sup>2</sup> und Jahr. Als Vergleich kann die Nettoprimärproduktivität eines sommergrünen Laubwaldes (Klimaxvegetation des Schweizer Mittellandes) herangezogen werden. Diese beträgt im Durchschnitt in etwa 1'000 Gramm Trockensubstanz pro m<sup>2</sup> und Jahr.<sup>39</sup>

Im Jahre 1983 wurden in den städtischen Friedhöfen Zürichs 1'350 Erdbestattungen vorgenommen.<sup>40</sup> Dies entspricht abgeschätzten 18'900 kg Trockengewicht organisches Gewebe. Die Division dieser Zahl durch die gesamte Friedhofsfläche der Stadt (125.25 Hektare)<sup>41</sup> ergibt für 1983 rund 15 Gramm organische Trockensubstanz pro m<sup>2</sup>. Andererseits stösst ein Mensch pro Jahr rund 45 kg Faeces aus.<sup>42</sup> Abzüglich des Wassergehaltes entspricht dies einem Trockengewicht von rund 8.5 kg.<sup>i</sup> Die Multiplikation dieser Zahl mit der Wohnbevölkerung Zürichs (diese betrug 1980 ungefähr 369'500 EinwohnerInnen)<sup>43</sup> ergibt ein Gesamtgewicht von 3'140'750 kg Trockengewicht an ausgestossenen Faeces. Dessen Verteilung auf alle Grünflächen des Stadtgebietes (4'224 Hektaren; exklusiv Hausgärten, die zur Siedlungsfläche gezählt werden)<sup>44</sup> ergibt 74 Gramm Trockengewicht Faeces pro m<sup>2</sup> und Jahr. Mit der gesamten Stadtfläche (8'772 Hektare)<sup>45</sup> gerechnet, werden knapp 36 Gramm Trockengewicht Faeces pro m<sup>2</sup> und Jahr erhalten.

Diese Zahlen müssen als grobe Abschätzung der Grössenordnungen betrachtet werden. Die obigen Zahlen sind auch nicht direkt miteinander zu vergleichen, da das organische Material je anders zusammengesetzt ist und an unterschiedlichen Orten anfällt. Ein Vergleich der 15 Gramm trockenes Weichgewebe mit den 1'000 Gramm Trockensubstanz in einem sommergrünen Laubwald zeigt aber auf, dass es sich mit den Massstäben der Natur gemessen bei Leichen um keine wesentlichen Einträge handelt.

#### 4.4. Eintrag von Quecksilber

Das Quecksilber im menschlichen Körper stammt vorwiegend aus den Zahnfüllungen. Der Anteil im restlichen Körper ist vernachlässigbar. Neben dem Quecksilber enthält das Zahnamalgam weitere Metalle wie Natrium, Blei, Zink, Gold, Silber.<sup>46</sup> Ab 200°C beginnt sich das Amalgam zu zersetzen und ab 700°C findet diese Zersetzung vollständig statt. Die Temperaturen im Kremationsofen liegen im Vergleich hierzu zwischen 800 und 1'200°C. Bei der Kremierung verdampft somit der grösste Teil des Quecksilbers und wird über die Kamine in die Umwelt ausgestossen. In der Umgebung von Krematorien führt dies zu einer kleinräumigen, messbaren Belastung und zu einer grossräumigen, nicht messbaren Grundbelastung des Bodens mit Quecksilber.<sup>47</sup>

Die Quecksilberfreisetzung bei der Kremierung wirft die Frage nach deren Verbleib bei der Erdbestattung auf. Immerhin handelt es sich dabei pro Verstorbenen um eine durchschnittliche Quecksilbermenge von  $2.49 \pm 0.37$  Gramm.<sup>48</sup> Im Artikel von VAN WYK (1990) sind Amalgamfüllungen von exhumierten Leichen beschrieben, die zum Teil vor mehr als 100 Jahre

<sup>i</sup> Durchschnittlich wird pro Tag 100 ml Wasser über Faeces ausgestossen (vgl. Schmidt, 1969: S. 203). Dies ergibt auf das Jahr gerechnet 36.5 kg Wasser. Das Trockengewicht ergibt sich sodann durch die Subtraktion des Wassers vom Frischgewicht der Fäkalien.

bestattet wurden. Das Amalgam erwies sich dabei noch immer als glänzend und hart. Nur die beiden ältesten gefundenen Amalgamfüllungen waren spröde und schwarz.<sup>49</sup> Dieses Phänomen hängt mit dem verwendeten Amalgam zusammen. Vor 1850 wurde noch ein Amalgam minderer Qualität eingesetzt, währenddem die Produkte seit 1855 in ihren Zusammensetzungen mit den heute verwendeten vergleichbar sind.<sup>50</sup> Aus diesen Befunden kann deshalb angenommen werden, dass die Amalgamzahnfüllungen gegenüber einer Auflösung im Boden sehr persistent sind. Eine Kontamination mit gelöstem Quecksilber muss somit nicht befürchtet werden.

## Offene Fragen

- Existieren Mikroorganismen, die sowohl im Milieu eines toten Körpers wie auch im Boden überlebensfähig sind?
- In welcher Grössenordnung ist die Ausbreitungsstrecke verschiedener Krankheitserreger im mineralischen Unterboden zu erwarten, die sich aus der mittleren Überlebensdauer und der durchschnittlichen Transportgeschwindigkeit ergibt?
- Über welche Bodenschicht lässt sich unterhalb der Grabsohle eine Beeinträchtigung des Bodenwassers mit gelösten organischen Verbindungen feststellen?
- Bis in welche Bodentiefe unterhalb der Grabsohle verändert sich die anorganische Zusammensetzung des Bodenwassers?
- Über welche Zeiträume nach der Bestattung erstrecken sich die genannten Beeinträchtigungen?

---

<sup>1</sup>Illi (1992): S. 137

<sup>2</sup>a.a.O.

<sup>3</sup>vgl. Rubner (1912): S. 169

<sup>4</sup>Thalmann (1978), S. 23

<sup>5</sup>Hauser (1994): S. 128

<sup>6</sup>a.a.O.

<sup>7</sup>Illi (1992): S. 137 f.

<sup>8</sup>aus einer medizinischen Enzyklopädie von 1881. Quelle: Thalmann (1978): S. 20

<sup>9</sup>Thalmann (1978): S. 19

<sup>10</sup>Rubner (1912): 192

<sup>11</sup>Aus einem Zeitungsartikel von Charles Inwyler, der vom Bestattungsamt Zürich zur Verfügung gestellt wurde. Leider ist kein Erscheinungsdatum ersichtlich. Diese Aussage wurde dem Journalisten von Meinrad Schär zugetragen, dem Nachfolger von Professor Mooser.

<sup>12</sup>Rubner (1912): S. 194

<sup>13</sup>vgl. Borneff/Borneff (1991): S. 131 f.

<sup>14</sup>Zeitungsartikel von Charles Inwyler (vgl. Fussnote von oben)

<sup>15</sup>Healing (1995): S. R63

<sup>16</sup>Hedwig Schaub: Zur Geschichte des Bestattungswesens in Basel, Diss. Basel, Liestal 1933. Zitiert aus Illi (1992): S. 178 (Fussnote 3)

<sup>17</sup>Berg (1975): S. 68

<sup>18</sup>Healing (1995): S. R65

- <sup>19</sup> a.a.O.
- <sup>20</sup> Gerba/Bitton (1984): S. 71
- <sup>21</sup> vgl. Gerba, Bitton (1984): S. 71, ergänzt mit Angaben von S. 72 f.
- <sup>22</sup> vgl. Brock (1994): S. 641; Borneff/Borneff (1991): S. 132
- <sup>23</sup> vgl. Borneff/Borneff (1991): S. 131
- <sup>24</sup> Healing (1995): S. R64
- <sup>25</sup> nach mündlicher Mitteilung von Hr. Etter, Anthropologe an der Universität Basel
- <sup>26</sup> Healing (1995): S. R64
- <sup>27</sup> vgl Gerba/Bitton: S. 68
- <sup>28</sup> Gerba/Bitton: S. 68 f.
- <sup>29</sup> Gerba/Bitton: S. 69
- <sup>30</sup> Gerba/Bitton: S. 70
- <sup>31</sup> Gerba/Bitton: S. 67
- <sup>32</sup> Die Resultate wurden mir verdankenswerterweise von der Stadtentwässerung Zürichs zur Verfügung gestellt.
- <sup>33</sup> z.B. Schmidt (1969): S. 193, 217 f, 226 f; Berg (1975): S. 69-71; Daldrup (1978); Coe (1974)
- <sup>34</sup> vgl. Danielopol (1983): S. 21
- <sup>35</sup> vgl. Schmidt (1969): S. 226
- <sup>36</sup> vgl. Schwarzenbach (1993): S. 255 ff.
- <sup>37</sup> vgl. Berg (1975): S. 88
- <sup>38</sup> vgl. Ottmann (1987): S. 45
- <sup>39</sup> Kuttler (1995): S. 363
- <sup>40</sup> aus Seminarunterlagen zu den Zürcher Friedhöfen von Prof. Dr. Paul Hugger
- <sup>41</sup> a.a.O.
- <sup>42</sup> Baccini (1992): S. 58
- <sup>43</sup> Statistisches Jahrbuch
- <sup>44</sup> a.a.O.
- <sup>45</sup> a.a.O.
- <sup>46</sup> vgl. Sonderdruck aus Umweltpraxis, Nr. 4/1995: S. 2
- <sup>47</sup> a.a.O.
- <sup>48</sup> Sonderdruck aus Umweltpraxis, Nr. 4/1995: S. 1
- <sup>49</sup> van Wyk (1990): S. 22
- <sup>50</sup> van Wyk (1990): S. 27

## 5. MASSNAHMEN

### Zusammenfassung

In der Regel wird heute die Bestattungstiefe zu gross gewählt, was sich auf den Zersetzungsprozess negativ auswirken kann. Mit einer geringeren Bestattungstiefe liesse sich vielerorts die Bedingungen für die Leichenzersetzung verbessern, ohne dass hierdurch Geruchsemissionen oder Grabschändungen durch Tiere befürchtet werden müssen.

Weitere Massnahmen betreffen die Friedhofsbepflanzung sowie die Wahl des Sarges und der Leichenbekleidung. Sowohl das Sargholz wie auch die Kleidungsmaterialien haben gut abbaubar zu sein, damit der Zersetzungsprozess nicht beeinträchtigt wird. Für den Sargbau empfehlenswert ist zum Beispiel Tannenholz, das idealerweise unbehandelt zu belassen ist. Für die Leichenbekleidung gut geeignet sind weite, leichte Baumwollhemden. Auf synthetische Fasern ist zu verzichten. Bei der Friedhofsgestaltung sind tiefwurzelnende Pflanzen zu berücksichtigen, die zur Entwässerung des Grabraumes einen Beitrag zu leisten vermögen.

Die wichtigste Massnahme ist aber eine sorgfältige Standortwahl, die auch den Boden als Kriterium miteinbezieht. In der Bodenschicht unterhalb der geplanten Grabsohle sollten keine Vernässungserscheinungen auftreten oder durch kleinere Einlagerungsprozesse und Bodenverdichtungen bewirkt werden können. Zudem ist ein Sicherheitsabstand zum höchsten über das Jahr zu erreichenden Grundwasserspiegel einzuhalten.

## 5.1. Grundstückwahl

Lange Zeit war es üblich, dass ein Friedhof um die Kirche angelegt war. Im 18. und 19. Jahrhundert wurde demgegenüber verschiedentlich aus hygienischen Gründen eine Verlegung der Friedhöfe aus den Ortskernen angestrebt (vgl. Kap. 4.1. Geschichtlicher Rückblick). An andern Orten fand die Ausgrenzung der Friedhöfe wiederum aus Platzknappheit statt. Mit den anwachsenden Bevölkerungszahlen von Dörfern und Städten bedurfte es auch einer Ausweitung der Friedhofsflächen.<sup>i</sup> Doch des öfters war hierfür in den Ortschaftszentren kein Platz mehr vorhanden.

Die Ausgliederung eines Friedhofes bringt Vor- und Nachteile mit sich. Gerade für ältere Menschen ist ein Nachteil, dass die Lage des Friedhofes weniger zentral zu liegen kommt. Dafür können der Standortwahl objektive Kriterien zugrunde gelegt werden. Ein Friedhof soll - zumal für ältere Menschen - gut erreichbar sein. Bei grösseren Distanzen zum Ortskern muss deshalb die Erschliessung mit öffentlichen Verkehrsmitteln gewährleistet sein. Als Ort der Stille sollte der Friedhof ferner in einem Gelände erstellt werden, das möglichst frei von Lärmemitteln wie beispielsweise stark befahrenen Verkehrswegen ist. Um eine gute Zersetzung der Leichen zu ermöglichen, muss als drittes Kriterium die Eignung des Bodens und des geologischen Untergrundes berücksichtigt werden. Besondere Aufmerksamkeit ist in diesem Zusammenhang der Erdschicht zu schenken, die unterhalb der geplanten Grabsohle anschliesst. In dieser Bodenzone sollten keine Vernässungserscheinungen auftreten oder durch kleinere Einlagerungsprozesse und Bodenverdichtungen bewirkt werden können. Für das Erdmaterial ist deshalb ein gewisser Anteil an grobkörnigem Material zu fordern. Quantitative Angaben können aber aufgrund des fehlenden Datenmaterials keine angeführt werden.

Dieselbe zersetzungshindernde Wirkung wie vom Stauwasser geht auch vom Grundwasser aus. Zusätzlich sind hier hygienische Bedenken anzubringen, besonders wenn an den Friedhof grundwasserflussabwärts eine oberflächliche Wasserfassung angrenzen sollte. Es ist deshalb anzuraten, bei der Grundstückwahl auf einen Sicherheitsabstand zwischen der Grabsohle und dem höchsten Grundwasserstand zu achten. Zweck dieses Sicherheitsabstandes ist die Adsorption der Keime und der organischen Verbindungen, die mit der Leichenflüssigkeit in den Boden einsickern. Die Mächtigkeit dieser Bodenschicht hängt von der Sickergeschwindigkeit und der Adsorptionsfähigkeit ab und ist je nach Beschaffenheit des Bodens verschieden.

Ausser in einem Hygienebuch aus dem Jahre 1912 konnten keine Vorschläge für die Grösse des Sicherheitsabstandes zwischen der Grabsohle und dem höchsten Grundwasserstand gefunden werden. Im genannten Hygienebuch ist zu lesen: «Diese Schicht ist bei gut filtrierendem Boden in Rücksicht darauf, dass schon in den ersten 10 cm unter der Grabsohle die Bakterien zurückgehalten werden, mit 50 cm hinreichend bemessen.»<sup>1</sup> Die veranschlagten 50 cm scheinen als Sicherheitsabstand allerdings etwas knapp zu sein. Dabei ist vor allem in Frage zu stellen, ob ein gut filtrierender Boden die Bakterien innerhalb der ersten zehn Zentimeter zurückhalten kann. Allgemeine Aussagen betreffend der Adsorption von Bakterien an Bodenpartikel sind äusserst heikel, da sich die einzelnen Bakterientypen diesbezüglich stark unterscheiden können.<sup>2</sup> Zudem ist nebst den Bakterien auch die Verlagerung der organischen Verbindungen mitzubedenken.

Als Vergleichsgrösse können die 2.5 Meter Sicherheitsabstand zum Grundwasserspiegel herangezogen werden, die bei jeglichen Materialentnahmen aus dem Boden vorgeschrieben

<sup>i</sup> Nach Prof. Paul Hugger ist pro Einwohner im Durchschnitt mit 1.8 bis 2.2 Quadratmeter zu rechnen. Nach Ottmann (1987, S. 46) beträgt derselbe Wert 5 bis 7 Quadratmeter.

sind.<sup>3</sup> Dieser Abstand soll gewährleisten, dass die Kontamination des Grundwassers durch ausgetretenes Benzin oder Öl verhindert werden kann. In den Friedhöfen handelt es sich allerdings um ein weit geringeres Grundwassergefährdungspotential. Ein sinnvoller Sicherheitsabstand wird deshalb zwischen den diskutierten Werten von 0.5 und 2.5 Meter liegen.

Eine Kontaminierung des Grundwassers mit Mikroorganismen oder organischen Verbindungen stellt noch keine Infektionsgefahr dar. Erst bei einer gleichzeitig vorhandenen nahen Wasserquelle sind allenfalls gesundheitliche Risiken zu befürchten. Um diese Gefahr weitgehend ausschliessen zu können, sollten Friedhöfe die Schutzzone 1 von Wasserfassungen nicht tangieren.<sup>4</sup>

Zur Frage der Grundstückwahl wird in einer Diplomarbeit am Geologischen Institut der Universität Bern (Prof. Ch. Schlüchter) näher eingegangen. Vorgesehener Abschluss dieser Arbeit: Frühling 1998.

## 5.2. Bestattungstiefe

Während der Ort des Friedhofgeländes im allgemeinen bereits vorgegeben ist, lässt sich die Bestattungstiefe in einem gewissen Bereich variieren. Die den Sarg bedeckende Erdschicht muss dabei die Unterdrückung von Geruchsemissionen auf dem Friedhofsgelände und einen Schutz vor Grabschändungen durch aasfressende Wirbeltiere gewährleisten können. Die adsorbierende Wirkung des Bodens ist aber gemäss Hygienebuch von 1912 so gross, dass «erfahrungsgemäss schon eine geringe Überdeckung der Särge mit Erde jede Geruchsbelästigung (...) ausschliesst.»<sup>5</sup>

Als Indikatoren für eine unzureichende Bestattungstiefe können verschiedene aasfressende Insekten herhalten, die für Fäulnisgase ein hochentwickeltes Geruchssystem besitzen (z.B. Fliegen aus den Familien der Sarcophagiden und Calliphoridae). Bei sarglos bestatteten Leichen konnte die Beobachtung gemacht werden, dass bei einer Grabsohlentiefe von 0.3 Meter ein erhöhtes Vorkommen aasfressender Insekten an der Erdoberfläche auftrat. Nach starken Niederschlägen stellte man zudem fest, dass einige Fliegen durch kleine Spalten und Ritzen sich im Boden einen Weg zur Leiche zu bahnen versuchten, und Fliegenweibchen ihre Eier an diesen Grabstätten in der feuchten Erde ablegten. Bei einer Bestattungstiefe von 0.6 Meter wurde hingegen von keinen Auffälligkeiten betreffend der Insektenaktivität berichtet.<sup>6</sup> Diese Einzelbeobachtung gibt einen Anhaltspunkt, welche minimale Mächtigkeit eine Bodenschicht oberhalb des Sargdeckels in etwa haben muss. Es ist jedoch darauf hinzuweisen, dass die Adsorptionswirkung gegenüber den Fäulnisgasen in den verschiedenen Böden variiert. Die Effektivität der Eliminierung von Geruchsemissionen hängt dabei massgeblich von der Zusammensetzung des Erdmaterials ab. Die adsorbierende Wirkung der Erde dürfte sich mit der Feinkörnigkeit der Erde und vor allem auch mit zunehmendem Humusgehalt erhöhen.

Die Bestattung hat in einer Tiefe zu erfolgen, die an der Graboberfläche sowohl für den Menschen wie auch für aasfressende Tiere keine wahrnehmbaren Konzentrationen der Fäulnisgase zulässt. Eine allzu grosse Bestattungstiefe ist hingegen zu vermeiden, da sich diese im

allgemeinen auf die Leichenzersetzung verlangsamend auswirkt.<sup>7</sup> Verschiedene Gründe sind hierfür anzuführen:

- Die saisonalen Bodentemperaturschwankungen nehmen mit anwachsender Bestattungstiefe ab, wobei sich die Bodentemperatur auf einem tiefen Niveau einpendelt<sup>8</sup> (vgl. Kap. 3.1. Bodentemperatur).
- Die Gasaustauschrate nimmt mit der Bodentiefe ab, wodurch der Sauerstoff nur mehr in geringerem Masse nachgeführt wird.
- Mit grösserer Bestattungstiefe vergrössert sich die Lagerungsdichte, was tendenziell zu kleineren Wasserleitfähigkeiten führt. Falls die zur Grabsohle angrenzende Bodenschicht eine geringe Wasserdurchlässigkeit aufweist, ist eine erhöhte Gefahr von Stauzonenbildung durch Bodenverdichtung in Betracht zu ziehen (vgl. Kap. 3.3. Zersetzungsbedingungen in verschiedenen Böden).
- Pflanzenwurzeln führen Wasser aus dem Boden ab und wirken sich hierdurch positiv auf die Entwässerung einer Bodenzone aus. Es ist deshalb als vorteilhaft zu erachten, wenn der Sarg im durchwurzelbaren Bodenbereich zu liegen kommt. Dies bedingt einen tiefgründigen Boden sowie eine angepasste Pflanzenwahl auf dem Friedhofsgelände (vgl. Kap. 5.3. Friedhofsbepflanzung).
- Das Vorkommen von Insekten nimmt ebenfalls mit der Bodentiefe ab, deren Larven die Leichenzersetzung stark beschleunigen können (vgl. Kap. 1.4.1. Insekten).
- Wenn sich strukturbildende Bodenprozesse bis unterhalb der Grabsohle erstrecken, können hierdurch allfällige Verdichtungserscheinungen in der Grabsohle teilweise rückgängig gemacht werden. Dieser Punkt wäre dann von Interesse, wenn sich die Stauzonenbildung für bestimmte Bodentypen tatsächlich bestätigen lassen sollte (vgl. Kap. 3.4. Auswirkungen der Friedhofstätigkeit auf den Boden). Eine Verringerung der Bestattungstiefe wäre dann auch aus Gründen der teilweisen Reversibilität der Bodenverdichtung und somit einer Verlängerung der Nutzungsdauer eines Friedhofes zu begrüssen.

Die Bestattungstiefe machte im Verlaufe der Zeit eine erhebliche Entwicklung durch. Im Zürcher Münsterhof<sup>9</sup> fanden die Bestattungen ab der zweiten Hälfte des 9. Jahrhunderts während etwa vier Generationen in ungefähr 50 cm tiefen Erdgruben statt. Gegen das Jahr 1000 hin wurden die Leichen oft in einfachen Holzkisten eingesargt. Die Bestattungstiefe vergrösserte sich dabei bis gegen einen Meter. Nach dem Jahr 1000 trugen sich die Beisetzungen wieder in einfachen, weniger als 50 cm mächtigen Erdgruben zu. Im ebenfalls frühmittelalterlichen Gräberfeld vom "Runden Büchel" in Balzers lag die Bestattungstiefe bei etwa 50 cm, bei einfachen Erdgräbern oft auch nur bei 30-40 cm.<sup>10</sup>

Die erste Totengräberordnung in den Zürcher Stadtbüchern von 1316 verlangte einen Mindestabstand vom Sargdeckel zur Erdoberfläche von einer Elle<sup>i</sup>. Ähnlich lautende Bestimmungen erliessen der Berner, Basler und Solothurner Rat. In der Stiftungsurkunde von Esslingen sind demgegenüber Mindesttiefen bis zur Grabsohle von etwa 2 Meter enthalten. Dieselben strengen Mindestmasse galten 1450 auch in Nürnberg.<sup>11</sup> Spätmittelalterliche Gräber waren ansonsten in der Regel nur hüfttief.<sup>12</sup>

Die vermehrte Mitsprache der medizinischen "Polizey" im Bestattungswesen (18. Jahrhundert), vor allem aber die hygienische Bewegung des 19. Jahrhunderts wirkten sich auch auf die Bestattungstiefe aus (vgl. Kap. 4.1. Geschichtlicher Rückblick). Die damalige medizinische Lehrmeinung sah in der Bekämpfung von Gerüchen eine wirksame seuchenpolizeiliche Massnahme.<sup>13</sup> Aus Sorge vor den "Miasmen" setzte sich eine behördliche

<sup>i</sup> Eine Elle betrug im Mittelalter zwischen 40 und 75 cm.

Regelung der Bestattungstiefe durch, die für gewöhnlich auf 1.5 bis 2 Meter angesetzt wurde.<sup>14</sup>

Seit der Jahrhundertwende hat sich das Wissen um eine Krankheitsübertragung durch Mikroorganismen und somit der Infektionsweg über das Wasser durchgesetzt. Seither ist bekannt, dass von entweichenden Fäulnisgasen keine potentielle Gesundheitsgefahr droht, dafür hygienische Missstände im Grundwasserbereich zumindest denkbar sind. Auf die Bestattungstiefe hat sich dieses Wissen indes nicht ausgewirkt. Noch heute werden also vielerorts Bestattungstiefen eingehalten, die zu Zeiten der "Miasmenlehre" festgeschrieben worden sind. Dies dürfte mitunter mit dem Desinteresse am Bestattungswesen seitens der Naturwissenschaften zusammenhängen. Aber nicht nur dies: Max Josef von Pettenkofer (1818-1901), einer der angesehensten und vehementesten Vertreter der "Miasmenlehre", hielt bereits eine Bestattungstiefe von 1.2 Meter im allgemeinen für ausreichend.<sup>15</sup> In der Überzeugung, dass Fäulnisgase krankheits- und todbringend sein können, forderte Pettenkofer somit eine geringere Bestattungstiefe, als sie heute oft praktiziert wird!

Eine Grabsohlentiefe von 0.9 bis 1.2 Meter dürfte zu verantworten sein, ohne dass negative Auswirkungen wie Geruchsemissionen auf dem Friedhofsgelände oder Grabschädigungen durch Tiere befürchtet werden müssen. Bei den von der Firma Tony Linder + Partner AG sanierten Friedhöfen ist eine Grabsohlentiefe von 1.2 Meter die Regel (vgl. unten). Von Hamburg wird bei RUBNER (1912) berichtet, dass sie bei Reihengräbern sogar eine Bestattungstiefe von nur einem Meter praktizierten.<sup>16</sup> Bei auftretenden Zersetzungsstörungen kann deshalb auch eine weitere Verringerung der Bestattungstiefe geprüft werden.

Mit der Anhebung der Bestattungstiefe bietet sich also die Möglichkeit, bei kleinerem Arbeitsaufwand eine Verbesserung der Zersetzungsbedingungen zu erreichen. Dies ist insbesondere bei auftretenden Zersetzungsstörungen von Leichen (Fettsäurekonservierung) zu empfehlen. Als zweite Auswirkung wird hierdurch der Abstand zum Grundwasserspiegel vergrössert. Die Verringerung der Bestattungstiefe ist dabei aber nicht als Schutzmassnahme für das Grundwasser zu sehen oder zu fordern. Einen Sicherheitsabstand zum Grundwasser im oben erwähnten Bereich lässt sich vielerorts auch bei einer Grabsohlentiefe von zwei Metern einhalten.

Nicht zu empfehlen ist die "Etagenbelegung". Dabei werden die Sargrückstände und die Reste der zuerst bestatteten Leiche mit einer geringen Erdschicht überdeckt im Grabfeld belassen. Darauf wird von neuem bestattet.<sup>17</sup> Dies bedingt für die Erstbestattungen unnötig grosse Bestattungstiefen. Die hierdurch verschlechterten Verwesungsleistungen können sich durch ein verstärktes Auftreten von fettsäurekonservierten Leichen zeigen. Zudem ist die Anzahl Grabbelegungen von vornherein stark beschränkt.

### 5.3. Friedhofsbepflanzung

Damit die Vegetation einen Beitrag zur Entwässerung des Grabraumes leisten kann, sind in der Friedhofsgestaltung tiefwurzelnde Pflanzen mit zu berücksichtigen. Die Gesundheitsdirektion des Kantons Uri empfiehlt, auf den einzelnen Gräbern die Anpflanzung von Föhren-

büschen oder anderen kleinen Nadelhölzer zu bewilligen. Für die Randbepflanzung von Grabfeldern sind gemäss gleicher Quelle Nadelgehölze wie Föhren und Tannen gut geeignet, um die Verwesung der Leichen fördern zu können.<sup>18</sup>

Die Gestaltung eines Friedhofes ist aber idealerweise nicht nur zweckmässig und ästhetisch ansprechend. Aufgrund der meist ruhigen Lage sind Friedhöfe zudem zu ökologischen Ausgleichsflächen prädestiniert. Durch die Verwendung von gut angepassten, einheimischen Pflanzen kann der Tierwelt dringend benötigter Lebensraum geboten werden. Der Gottesacker als beschaulicher Naturerlebnispark ist in vielen Zürcher Friedhöfen bereits reizvoll umgesetzt. Es ist zu hoffen, dass dieser Weg in der Stadt Zürich weiter beschritten wird und andernorts Nachahmung findet.

## 5.4. Sarg

Nach MANT wird die Leichenzersetzung durch die Verwendung eines Sarges klar beschleunigt.<sup>19</sup> Diese Beobachtungen machte Mant bei Exhumationen, die er nach dem Zweiten Weltkrieg in Deutschland und somit in eher feuchten Böden durchführte. Die Wirkung des Sarges ist auf die Abschottung des Bodenwassers und auf die Existenz eines Luftraumes um die Leiche zurückzuführen. Für eher trockene Böden muss diese Beobachtung allerdings keine Richtigkeit besitzen.

Der Sargraum ist vor allem während der Fäulnisphase des Leichenabbaus nützlich. Nach erfolgter Entwässerung des Körpers und mit zunehmender Bedeutung der aeroben Abbauprozesse (Verwesungsphase) wirkt der dichte Abschluss des Sarges gegen den Boden hin als eher zersetzungshindernd. Beim verwendeten Sargmaterial ist deshalb auf seine Abbaubarkeit zu achten. Tannenholz etwa zerfällt relativ leicht und ist deshalb gut geeignet. Eichenholz andererseits sollte gemieden werden. Es zeigt sich im Boden als ausserordentlich abbauresistent. In einem immerzu nassen Boden soll sich Eichenholz durchschnittlich während 700 Jahren halten, im sehr trockenen Boden sogar 1800 Jahre. Bei Wechselfeuchtigkeit soll die durchschnittliche Dauerhaftigkeit des Eichenholzes 120 Jahre betragen.<sup>20</sup>

Um eine gute Zersetzung und eine möglichst geringe Zusatzbelastung des Bodens durch den Sarg zu erreichen, ist das Holz unbehandelt zu belassen. Insbesondere ist die Verwendung von Holzschutzmitteln zu unterlassen. Falls dennoch Holzfarben verwendet werden, sollen diese gut und ohne Rückstände abbaubar sein. Dies gilt auch für die Hilfsmittel bei der Sargherstellung (z.B. Leime) und für die Sarginnenauskleidung.

Es empfiehlt sich, die Verwendung von gut verrotzbaren Särgen in den Friedhofsverordnungen vorzuschreiben.<sup>21</sup>

### 5.4.1. Exkurs zum Muslimfriedhof in Zürich

Im Zusammenhang mit einem geplanten Muslimfriedhof brach im Frühjahr 1996 im betroffenen Quartier der Stadt Zürich eine emotional geführte Diskussion über die Hygiene von Tuchbestattungen aus, wie sie nach den Bestattungsregeln des Islam vorgesehen sind. Tuch-

bestattungen wirken offensichtlich auf viele Europäer befremdlich. Die sarglose Einbettung der Leiche in die Erde weckt Befürchtungen von Boden- und Wasserkontaminationen. Doch Sargbestattungen waren auch in unserer Kultur während langer Zeit die Ausnahme. Erst im 17. und 18. Jahrhundert kam es zu einer deutlichen Verlagerung zugunsten des "Totenbaumes".<sup>22</sup> Als Urheber dieser Entwicklung ist die medizinische "Polizey" zu sehen, die durch die allgemeine Verwendung des Sarges eine Ausbreitung der "Miasmen" zu verhindern suchten.

Ein toter Körper wird in unserer Kultur oft mit "Leichengift" und gefährlichen Krankheitserregern assoziiert. Diese Ängste teilen die Präventivmediziner nicht. Leichen gelten im Gegenteil als eher harmlos.<sup>23</sup> Dies gilt noch im verstärkten Masse für bestattete Leichen (vgl. Hygienekapitel). Sofern nicht äusserst ungünstige Umstände gegeben sind (hoher Grundwasserspiegel, grosse Wasserleitfähigkeit des Bodens und eine nahe Wasserfassung grundwasserflussabwärts) stammen Gesundheitsrisiken wohl mehr aus der menschlichen Phantasie denn aus der Leiche.

In feuchten Böden kann dem Sarg eine zersetzungsfördernde Wirkung zugeschrieben werden. Bei Tuchbestattungen ist hingegen mit einer stärkeren Tendenz zu Fettsäurekonservierung zu rechnen. Mit der Wahl eines geeigneten Grundstückes und einer sinnvollen Bestattungstiefe, sowie eventuell mit der Hinzuführung von pflanzlichem Material auf die Grabsohle (siehe unten) lässt sich die Wahrscheinlichkeit von Zersetzungsstörungen verringern. Ferner ist darauf hinzuweisen, dass von fettsäurekonservierten Leichen keine erhöhte hygienische Gefahr ausgeht. In einem gut unterhaltenen Friedhof sind Sicherheitsbedenken auch bei Tuchbestattungen nicht angebracht.

## 5.5. Leichenbekleidung

Die Bekleidung von Leichen soll leicht und gut abbaubar sein. Besonders zu empfehlen ist die Beschränkung auf ein spezielles Totenhemd aus leicht verweslichem Material.<sup>24</sup> Gut geeignet sind leichte Baumwollkleider. Ungeeignet sind enganliegende Kleidungsstücke wie Unterwäsche und Socken, die sich bezüglich Adipocirebildung begünstigend auswirken. Gänzlich untauglich sind ferner Nylon- und weitere Kunstfasern, die den Zersetzungsprozess stark behindern können. Ebenfalls sollten ganze Anzüge vermieden werden.<sup>25</sup>

In den Friedhofsverordnungen empfiehlt es sich, die Verwendung von schnell abbaubaren Kleidungsstoffen vorzuschreiben.<sup>26</sup>

## 5.6. Beschleunigte Zersetzung durch pflanzliches Füllmaterial

Pflanzliches Material in der Umgebung des Körpers soll gemäss Feldbeobachtungen die Leichenzersetzung beschleunigen (vgl. Kap. 2.5.6. Pflanzliches Material). Als Gründe werden

die Wirkung als Wärmeisolator und die Wärmefreisetzung beim eigenen Abbau aufgeführt. Diese Eigenschaften werden vor allem dem Stroh zugeschrieben, ferner auch Nadelbaumzweigen und Holzspänen. Letztere wurden häufig auf dem Sargboden ausgebracht, damit sie aus dem Körper austretende Körperflüssigkeiten zurückhielten. Das Sargholz trägt aufgrund seiner geringen spezifischen Oberfläche hingegen nur in beschränktem Ausmass zu genanntem Effekt bei.

Die zersetzungsfördernde Eigenschaft von pflanzlichem Material sollte experimentell nachgeprüft werden. Falls sich die Wirkung bestätigen lassen sollte, kann bei auftretenden Zersetzungsstörungen das Einbringen von organischem Material in den Sarg in Betracht gezogen werden.

## 5.7. Friedhofsanierungen

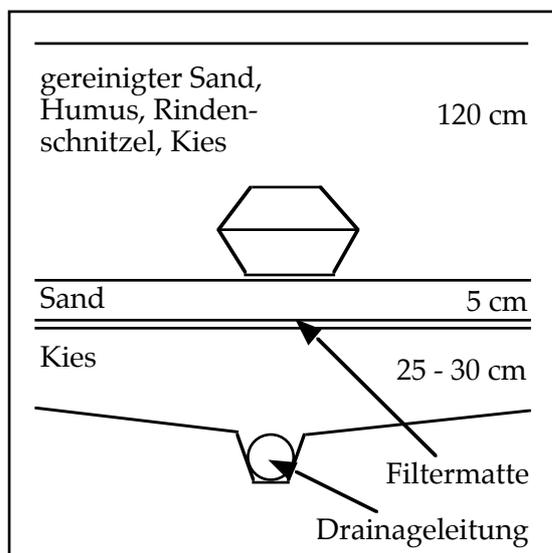


Abb. 5.1: Aufbau eines sanierten Grabes gemäss der Firma Tony Linder + Partner AG, Altdorf.

Bei ungünstigen Bodenvoraussetzungen (z.B. tonreiche Böden) und fehlenden Geländealternativen kann die Drainierung eines Friedhofes als technische Massnahmen in Betracht gezogen werden. An verschiedenen Orten geschah dies im Rahmen einer Friedhofsanierung, nachdem sich im Friedhof zunehmend Zersetzungsstörungen zeigten. Die "alte" Friedhofserde wird dabei ausgehoben und weggeführt. Neues Erdmaterial wird eingefüllt, das aus Humusmaterial besteht und mit Sand oder Kies durchsetzt ist (vgl. Abb. 5.1).

### 5.7.1. Zur Drainageleitung

Heute werden Friedhöfe vielerorts mit Drainageleitungen versehen. Eine künstliche Entwässerung kann dann sinnvoll sein, wenn sie als Massnahme zur Sicherung der Leichenzersetzung vorgenommen wird. Sie sollte aber erst als letzte mögliche Massnahme in Betracht gezogen werden, nachdem die Verringerung der Grabtiefe, eine zweckmässige Bepflanzung des Geländes, gut abbaubare Säрге und Leichenkleider sowie allenfalls auch pflanzliches Füllmaterial im Sarg nicht zum erwünschten Erfolg geführt haben. Aus hygienischen Gründen ist eine Drainageleitung hingegen nicht vonnöten - wenn nicht sogar kontraproduktiv.

Eine wichtige Funktion des Bodens ist die Filterwirkung, welche mit der Mächtigkeit der Bodenschicht zunimmt. In einer Drainageleitung findet dieser Reinigungsprozess hingegen nicht statt. Stattdessen wird das Wasser mit vergleichsweise grosser Fliessgeschwindigkeit weggeführt. Die Reinigung des Sickerwassers beschränkt sich somit auf die Bodenschicht von der Grabsohle bis zur Drainageleitung. Es stellt sich nun die Frage nach der Reinheit dieses

Wassers und nach dessen weiteren Entsorgung. Gemäss den Untersuchungen des Drainagewassers in Zürcher Friedhöfen von 1976/77 (vgl. Kap. 4.2.3. Transport von Krankheitserregern zum Grundwasser) müssen bezüglich der Reinheit dieses Wasser kaum Bedenken gehegt werden. Weitere Abklärungen sind aber wünschenswert, insbesondere nach starken Niederschlägen.

Die Entsorgung des Drainagewassers kann auf verschiedene Weisen geschehen: Eine direkte Einleitung in ein Oberflächengewässer oder die Einspeisung in die Kanalisation mit anschliessender Reinigung in einer Abwasserreinigungsanlage sind denkbar. Im Friedhof Witikon in Zürich wird im Herbst 1996 mit einem Bioklärweiher auf dem Friedhofsgelände ein dritter Entsorgungsweg besprochen.

Aus hygienischer Sicht ist die Einleitung von Drainagewasser in ein Oberflächengewässer im Vergleich zur Tiefensickerung ins Grundwasser als die schlechtere Lösung zu betrachten. Dem versickernden Wasser steht im Vergleich zur Drainage eine grössere reinigende Bodenschicht zur Verfügung. Als Ausnahme kann ein Friedhof gesehen werden, der auf gut durchlässigem Boden mit hohem Grundwasserspiegel und einer nahen Wasserfassung angesiedelt ist. In dieser ungünstigsten Konstellation kann die künstliche Entwässerung vor einer möglichen Beeinträchtigung des Grundwassers vorbeugen.

Bei der Einleitung von Drainagewasser in ein Oberflächengewässer ist ein "Worst-case-Szenario" zu denken, bei dem starke Niederschläge eine länger anhaltende Trockenperiode ablösen. Hierdurch werden die durch Adsorption zurückgehaltenen Mikroben ungestaffelt ins Sickerwasser und schliesslich in die Drainageleitung abgegeben. Zur Bakterienkonzentration, die in diesem Szenario freigesetzt werden können, sind weitere Abklärungen wünschenswert. Doch selbst in diesem Fall sind wohl keine hygienischen Unannehmlichkeiten zu erwarten. Hierfür dürften die im Friedhof eingebrachten Mengen an organischem Material und somit die Nährstoffgrundlage für das Bakterienwachstum zu klein sein.

Doch auch eine Entsorgung des Drainagewassers über Abwasserreinigungsanlagen (ARA) kann nicht vorbehaltlos gutgeheissen werden. Um dies zu verstehen, ist allerdings eine kurze Einführung zu den Kläranlagen vonnöten. Nebst den Haus- und Industrieabwässern gelangt auch Fremdwasser in die ARA, worunter weitgehend unverschmutztes, in die Kanalisation eindringendes Grund- und Oberflächenwasser sowie Regenabflusswasser verstanden wird.<sup>27</sup> Bei starken Niederschlägen kann der Zustrom an Fremdwasser ein Ausmass annehmen, das bei Normalbetrieb zum Überlaufen der Klärbecken führen würde. Um dies zu verhindern, wird das Abwasser in ein Regenbecken geleitet. Sobald auch dessen Kapazität erschöpft ist, müssen die Abwässer ungeklärt in den Vorfluter (Fließgewässer oder See) eingeleitet werden. Zur Entlastung der Kläranlagen wurde deshalb vor einigen Jahren in Diskussion gebracht, das Regenabflusswasser der Strassen nicht mehr in die Kanalisation einzuleiten, sondern an der Strassenseite in einem Kiesbett versickern zu lassen.

Die Ableitung des Drainagewassers aus Friedhöfen in eine Abwasserreinigungsanlage (ARA) führt zu deren weiteren Belastung mit kaum verunreinigtem Wasser (vgl. Kap. 4.2.3. Transport von Krankheitserregern zum Grundwasser). Bei starken Niederschlägen also, wenn die Wahrscheinlichkeit von Bakterienverlagerungen aus Friedhöfen noch am grössten ist, besteht die Möglichkeit, dass wegen einer Überlastung der ARA das Drainagewasser ungeklärt einem Oberflächengewässer zugeführt wird.

Aus den dargelegten Gründen sollten in Friedhöfen Drainageleitungen lediglich dann Verwendung finden, wenn ansonsten durch Stauwasser eine negative Beeinträchtigung des Leichenzersetzungprozesses zu befürchten ist. Zur Entsorgung des Wassers kann auch die kontrollierte Versickerung innerhalb oder ausserhalb des Friedhofes geprüft werden.

<sup>1</sup>Rubner (1912): S. 198

<sup>2</sup>nach mündlicher Mitteilung von Fr. Jucker, Doktorandin an der EAWAG Dübendorf

<sup>3</sup>gemäss mündlicher Mitteilung von Hr. Prof. Schlüchter

<sup>4</sup>mündliche Mitteilung von Prof. Schlüchter

<sup>5</sup>Rubner (1912): S. 191

<sup>6</sup>Rodriguez (1985): S. 848/850

<sup>7</sup>vgl. Mant (1987): S. 69

<sup>8</sup>a.a.O.

<sup>9</sup>Schneider (1982): S. 158 ff.

<sup>10</sup>Bill/Etter: S. 28

<sup>11</sup>Illi (1992): S. 74

<sup>12</sup>Illi (1992): S. 75

<sup>13</sup>Illi (1992): S. 137

<sup>14</sup>Rubner (1912): S. 199

<sup>15</sup>a.a.O.

<sup>16</sup>a.a.O.

<sup>17</sup>vgl. Rubner (1912): S. 199

<sup>18</sup>„Empfehlungen der Gesundheitsdirektion Uri betreffend Vorschriften für die Bestattung“, gezeichnet durch Regierungsrat Franz Achermann am 30. Juni 1980.

<sup>19</sup>Mant (1987): S. 68

<sup>20</sup>aus Materialkunde für Schreiner (S. 51). Zitiert aus Gerber: S. 17

<sup>21</sup>vgl. z.B. Reglement über das Bestattungs- und Friedhofswesen der Gemeinde Wollerau (vom Regierungsrat am 19. Januar 1993 genehmigt): Artikel 14

<sup>22</sup>Hauser (1994): S. 25

<sup>23</sup>vgl. Healing (1995): R 61

<sup>24</sup>vgl. „Empfehlungen der Gesundheitsdirektion Uri betreffend Vorschriften für die Bestattung“, gezeichnet durch Regierungsrat Franz Achermann am 30. Juni 1980.

<sup>25</sup>a.a.O.

<sup>26</sup>vgl. z.B. Reglement über das Bestattungs- und Friedhofswesen der Gemeinde Wollerau (vom Regierungsrat am 19. Januar 1993 genehmigt): Artikel 13

<sup>27</sup>Heintz/Reinhardt (1991): S. 256 f.

# DANK

Viele Personen standen mir während der Diplomarbeit "Leichenzersetzung im Erdgrab", die diesem Bericht zugrunde liegt, mit Informationen, Rat und Tat bei. Diesen allen sei herzlich gedankt. Besondere Erwähnung verdient Hansjürg Büchi. Er betreute mich während des viermonatigen Diplomsemesters in lobenswerter Weise. Dabei deckte er mich bei vielen Diskussionen mit Anregungen ein, koordinierte die Felduntersuchungen im Friedhof Zürich-Affoltern und las fortwährend die fertiggestellten Kapitel durch und belegte diese mit kritischen Anmerkungen. Neben Hansjürg Büchi lasen auch Dr. Peter Weidler und Prof. H. Sticher einzelne Kapitel durch und brachten Verbesserungen an. Als Diplomprofessor und Ansprechperson bei allen Bodenfragen war Herr Sticher zusätzlich in die Diplomarbeit eingebunden. Für alle Dienste und Auskünfte sei ihm recht herzlich gedankt. Prof. Ch. Schlüchter (Universität Bern) war ebenfalls in dieser Diplomarbeit einbezogen. Während den beiden Lagebesprechungen in der ersten Phase der Diplomarbeit trug sein Berner Charme zur positiven Grundstimmung bei. Herr Schlüchter war für die Fragen im Bereich der Geologie zuständig. Die geologische Abhandlung kommt in diesem Bericht allerdings etwas zu kurz, wird aber in der Diplomarbeit von Gisela Eichenberger (voraussichtlicher Abgabetermin: Frühling 1998) eingehend behandelt.

Während den Felduntersuchungen im Friedhof Zürich-Affoltern bot Hansjürg Büchi ein ganzes Forscherteam auf. Allen dort beteiligten Leuten sei ebenfalls herzlich für ihren Einsatz gedankt. Hierzu gehörten Susanne Schott, Gisela Eichenberger, Pirmin Mader, Holger Hoffmann-Riem und Peter Weidler. Gisela Eichenberger verdanke ich die Darstellungen der Bodenprofile im Anhang D.

Weiteren Dank verpflichtet bin ich der Firma Tony Linder + Partner AG in Altdorf. Insbesondere ist Herr Linder recht herzlich zu danken, der mir erlaubte, bei einer Friedhofsanierung dabei zu sein. Ausserdem nahm sich Herr Linder viel Zeit, um mir aus seinem reichen Erfahrungsschatz mit Friedhofsanierungen zu berichten. Hierdurch wurde mir ein guter Einstieg in die Diplomarbeit geboten.

Last, but not least gilt es dem Bestattungsamt der Stadt Zürich und ihren Angestellten einen besonderen Dank auszusprechen. Aufgrund ihrer Anregung wurde diese Diplomarbeit an der Abteilung für Umweltnaturwissenschaften der ETH Zürich ausgeschrieben. Nebst dem, dass sie mir also die Bearbeitung dieses interessanten Themenkreises ermöglichten, waren sie aber auch stets hilfsbereit, boten Hand für die Felduntersuchungen im Friedhof Zürich-Affoltern und unterstützten die Schlussbearbeitung dieses Berichtes mit einem finanziellen Beitrag.

Anschrift des Autors: Ivo Willimann  
Joderstrasse 9  
CH-6221 Rickenbach LU

# GLOSSAR

<b>aerob</b>	Sauerstoff zum Leben benötigend (bei Organismen).
<b>Alkalität</b>	Gehalt einer Lösung an basischen Stoffen.
<b>anaerob</b>	Unter Ausschluss von Sauerstoff lebend (bei Organismen).
<b>Detritivoren</b>	Tierische Konsumenten von totem Material.
<b>Dissoziation</b>	Zerfall von Molekülen in Ionen oder Atome. In diesem Bericht ist darunter stets die Abspaltung eines "sauren" Protons zu verstehen.
<b>Enzyme</b>	Spezielle Eiweissverbindungen, die bestimmte chemische Umsetzungen zu katalysieren vermögen.
<b>Hydrolyse</b>	Spaltung chemischer Verbindungen durch Wasser.
<b>Inhibition</b>	Unterbindung eines biochemischen Vorgangs.
<b>Kationenaustauschkapazität (KAK)</b>	Die maximal sorbierbare, respektive austauschbare Menge an positiv geladenen Ionen (Kationen). Weil der dominierende Anteil der Bodenoberfläche eine negative Ladung trägt und einige Kationen zu den wesentlichen Pflanzennährstoffen zu zählen sind, ist die Bedeutung der KAK weit höher einzuschätzen als die Anionenaustauschkapazität.
<b>Lipasen</b>	Fettsplattende Enzyme.
<b>Lipid</b>	Sammelbezeichnung für alle Fette und Lipide.
<b>Lipide</b>	Sammelbezeichnung für die uneinheitliche Gruppe fettähnlicher Substanzen.
<b>Primärporen</b>	Die Hohlräume des Bodens, die sich aufgrund der Form und Packung der Einzelkörner ergeben.
<b>Proteasen</b>	Eiweissplattende Enzyme.
<b>Pyrit</b>	Ein Eisensulfid ( $\text{FeS}_2$ ).
<b>Redoxpotential</b>	Ein Mass für die Tendenz von Verbindungen oder Elementen, Elektronen abzugeben.
<b>spezifische Oberfläche</b>	Das Verhältnis zwischen der Summe aller Grenzflächen fest-flüssig sowie fest-gasförmig und dem Volumen einer Bodenprobe.

<b>subkutan</b>	Unter der Haut befindlich. Die Haut besteht "im weiteren Sinne" aus drei Schichten: der Oberhaut (Epidermis), der Lederhaut (Dermis) und der Unterhaut (Subcutis). Die Epidermis und die Dermis werden zur Cutis zusammengefasst und als Haut "im engeren Sinne" verstanden. Die Subcutis schliesst ohne scharfe Abgrenzung an die Cutis an. Bei ihr handelt es sich um ein locker gebautes Bindegewebe, worin mehr oder weniger reichlich Fettgewebe eingelagert ist.
<b>Synergismus</b>	Das Zusammenwirken von Organismen, Substanzen oder Faktoren, die sich gegenseitig fördern.
<b>Textur</b>	Beschreibt die Zusammensetzung eines Bodens nach der Grösse seiner mineralischen Einzelkörner. Sie wird auch Kornverteilung genannt.
<b>"verwesungsmüder Boden"</b>	Ein Friedhofsboden, der nach mehrmaliger Bestattung verstärkte Neigung zu Zersetzungsstörungen zeigt. Es ist aber nicht geklärt, ob dieser Vorgang tatsächlich eintritt. (Vgl. hierzu die Diskussion im Kap. 3.4. Auswirkungen der Friedhofstätigkeit auf den Boden.)

# LITERATURVERZEICHNIS

- Baccini P. (1992): Stoffwechsel der Anthroposphäre. Vorlesungsunterlagen, ETH Zürich.
- Bajpai R. K., Iannotti E. L. (1988): Product Inhibition. In: Erickson L. E., Fung, D. Y-C: Handbook on anaerobic fermentations. Marcel Dekker Inc.
- Begon M., Harper J. L., Townsend C. R. (1991): Ökologie. Birkhäuser Verlag, Basel-Boston-Berlin.
- Berg, S. (1975): Leichenzersetzung und Leichenzerstörung. In: Mueller B.: Gerichtliche Medizin. Springer Verlag, Berlin-Heidelberg-New York.
- Bill J., Etter H.: Das frühmittelalterliche Gräberfeld vom "Runden Büchel" in Balzers. Sonderdruck aus Band 81 des Jahrbuches des Historischen Vereins für das Fürstentum Liechtenstein.
- Borneff J., Borneff M. (1991): Hygiene. Georg Thieme Verlag, Stuttgart-New York.
- Brock T. D., Madigan M. T.(1991): Biology of Microorganisms. Sixth Edition, Prentice-Hall Inc., New Jersey.
- Brock T. D. et al. (1994): Biology of Microorganisms. Seventh Edition, Prentice-Hall Inc., New Jersey.
- Coe J. I. (1974): Postmortem Chemistry: Practical Considerations and a Review of the Literature. Journal of Forensic Sciences, 19: 13-32.
- Cotton G. E., et al. (1987): Preservation of Human Tissue Immersed for Five Years in Fresh Water of Known Temperature. Journal of Forensic Sciences, Vol 32, No. 4: 1125-1130.
- Cunningham A. B., et al. (1991): Influence of Biofilm Accumulation on Porous Media Hydrodynamics. Environ. Sci. Technol., 25 (7), 1305-1311.
- Daldrup T. (1978): Postmortaler Eiweisszerfall in menschlichen Organen. Tritsch Verlag, Düsseldorf.
- Danielopol D. L. (1983): Gewässerökologie: Der Einfluss organischer Verschmutzung auf das Grundwasser-Ökosystem der Donau im Raum Wien und Niederösterreich. Bundesministerium für Gesundheit und Umweltschutz Österreich.
- Dorn J. M., Hopkins B. M. (1985): Thanatochemistry. Reston Publishing Company, Reston.
- Evans, W. E. (1963): Adipocere formation in a relatively dry environment. Medicine, Science and the Law, 3, 145-153.
- Fellenberg G. (1994): Boden in Not. Trias, Stuttgart.

- Flühler H. (1991): Bodenphysik. Manuskript zur gleichnamigen Vorlesungsveranstaltung, ETH Zürich.
- Flühler H. (1995a): Grundlagen der Bodenphysik. Update der Kapitel 2, 3, 6 und Anhang, ETH Zürich.
- Flühler H.(1995b): Wasserhaushalt von Böden. Unterlagen für das DBG-Graduiertenkolleg in La Vancelle (Entwurf).
- Gerba C. P., Bitton G. (1984): Microbial Pollutants: Their Survival and Transport Pattern to Groundwater. In: Bitton, Gerba: Groundwater - Pollution - Microbiology. John Wiley & Sons.
- Gerber H. (vermutlich 1976): Technische und gesetzliche Anforderungen an einen Schweizer Sarg. Selbstverlag Sargfabrik Gerber, Lindau.
- Gerlach, U., et al. (1989): Innere Medizin für Krankenpflegeberufe. Thieme Verlag, Stuttgart-New York.
- Gisi U., et al. (1990): Bodenökologie. Thieme Verlag, Stuttgart-New York.
- Hall D. G. M., et al. (1977): Water Retention, Porosity and Density of Field Soils. Soil Survey Technical Monograph No. 9, Harpenden.
- Hauser A. (1994): Von den letzten Dingen. Verlag Neue Zürcher Zeitung, Zürich.
- Healing T. D., Hoffman P. N., Young S. E. (1995): The infection hazards of human cadavers. Communicable Disease Report, Vol. 5, Review Number 5, London.
- Heintz A., Reinhardt G. (1991): Chemie und Umwelt. Vieweg Verlag, Braunschweig.
- Henderson J. D. (1987): Factors determining the state of preservation of human remains. In: Boddington A., et al.: Death, decay and reconstruction. Manchester University Press.
- Hugger P. (Feb. 1984): Zürichs Städtische Friedhöfe. Kopien von Unterlagen zu einem volkshundlichen Seminar an der Universität Zürich.
- Illi M. (1992): Wohin die Toten gingen. Chronos Verlag, Zürich.
- Janaway R. C. (1987): The preservation of organic materials in association with metal artefacts deposited in inhumation graves. In: Boddington A., et al.: Death, decay and reconstruction. Manchester University Press, Manchester.
- Killam E. W. (1990): The Detection of Human Remains. Charles C. Thomas Publisher, Springfield, Illinois.
- Kuttler W. (1995): Handbuch zur Ökologie. Analytica Verlagsgesellschaft, Berlin.
- Mann R. W., et al. (1990): Time since death and decomposition of the human body: Variables and observations in case and experimental field studies. Journal of Forensic Sciences, 35(1), 103-111.
- Mant, A. K. (1987): Knowledge from post-war exhumations. In: Boddington A., et al.: Death, decay and reconstruction. Manchester University Press.
- McCarty P. L., et al. (1984): Microbiological Processes Affecting Chemical Transformations in Groundwater. In: Bitton, Gerba: Groundwater - Pollution - Microbiology. John Wiley & Sons.

- Mellen P. F. M., et al. (1993): Experimental Observations on Adipocere Formation. *Journal of Forensic Sciences*, Vol. 38, No. 1: 91-93.
- Ottmann F. (1987): *Créer ou aménager un cimetière: géologie, techniques, hygiène*. Editions du Moniteur, Paris.
- Reh, H. (1960): Diskussionsbemerkung zum Vortrag H. J. Wagner. *Deutsche Zeitschrift für die gesamte gerichtliche Medizin*, 49, 720-722.
- Robert M., Berthelin J. (1986): Role of Biological and Biochemical Factors in Soil Mineral Weathering. In: Huang P. M., Schnitzer M. (Eds.): *Interactions of Soil Minerals with Natural Organics and Microbes*. Soil Science Society of America, Madison.
- Rodriguez W. C., Bass W. M. (1985): Decomposition of buried bodies and methods that may aid in their location. *Journal of Forensic Sciences*, 30(3), 836-852.
- Rubner M., et al. (1912): *Handbuch der Hygiene*. Band 4, Abt. 1, Verlag von S. Hirzel, Leipzig.
- Scheffer F., Schachtschabel P. (1992): *Lehrbuch der Bodenkunde*. Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart.
- Schertenleib H. (1996): *Das Zimmer der Signora*. Kiepenheuer & Witsch.
- Schlegel H. G. (1992): *Allgemeine Mikrobiologie*. Thieme Verlag, Stuttgart-New York.
- Schmidt, G. (1969): Postmortale Veränderungen von Arzneistoffen und Giften in Organen und Körperflüssigkeiten einschliesslich Neubildung von Störsubstanzen. In: *Gadamers Lehrbuch der chemischen Toxikologie*, Bd. 1, Vandenhoeck & Ruprecht, Göttingen.
- Schmidt R. F. (1983): *Medizinische Biologie des Menschen*. Piper & Co Verlag, München.
- Schneider J. et al. (1982): *Der Münsterhof in Zürich*. Walter-Verlag, Olten.
- Schwarzenbach, R. P., Gschwend, P. M., Imboden, D. M. (1993): *Environmental Organic Chemistry*. John Wiley & Sons, Inc., New York.
- Sigg L., Stumm W. (1994): *Aquatische Chemie*. Verlag der Fachvereine Zürich, Teubner Verlag Stuttgart.
- Takatori T., et al. (1986): Microbial Production of Hydroxy and Oxo Fatty Acids by several Microorganisms as a Model of Adipocere Formation. In *Forensic Science International*, 32: 5-11.
- Takatori T., et al. (1987): The Mechanism of Experimental Adipocere Formation: Substrate Specificity on Microbial Production of Hydroxy and Oxo Fatty Acids. In *Forensic Science International*, 35: 277-281.
- Thalmann R. (1978): *Urne oder Sarg?*. Europäische Hochschulschriften, Reihe 9, XV, Abt. A, Band 14, Verlag Peter Lang, Bern-Frankfurt a.M.-Las Vegas.
- van Wyk C. W., Theunissen F., Phillips V. M. (1990, Dezember): A Grave Matter - Dental Findings of People Buried in the 19th and 20th Centuries. *The Journal of Forensic Odontostomatology*, Vol. 8, No. 2.

Vass A. A., et al. (1992): Time Since Death Determinations of Human Cadavers Using Soil Solution. *Journal of Forensic Sciences*, Vol. 37 (5), 1236-1253.

Wagner, H. (1961): Die Beeinflussung postmortaler physikalisch-chemischer Vorgänge durch Antibiotica und Sulfonamide. *Deutsche Zeitschrift für die gesamte gerichtliche Medizin*, 51, 572-581.

Wagner, H. (1960): Einfluss der Antibiotica und Sulfonamide auf die Leichenfäulnis. *Deutsche Zeitschrift für die gesamte gerichtliche Medizin*, 49, 714-720.

Wallhäuser K. H. (1978): *Sterilisation - Desinfektion - Konservierung*. Thieme Verlag, Stuttgart.

Weinberg E. D. (1987): The influence of soil on infectious disease. In: *Experientia* 43, Birkhäuser Verlag, Basel.

Zeyer J. (1994): *Bodenbiologie*. Manuskript zur gleichnamigen Vorlesungsveranstaltung, ETH Zürich.

# **ANHANG**

## **Inhaltsverzeichnis**

### **Anhang A**

Daten und Beobachtungen zum Versuch von RODRIGUEZ/BASS

### **Anhang B**

Säurewirkung langkettiger Fettsäuren

### **Anhang C**

Zusammenstellung der Leichenkatabolite

### **Anhang D**

Datenmaterial zu bodenkundlich-geologischen Sondierungen im Friedhof Zürich-Affoltern

## Anhang A: Daten und Beobachtungen zum Versuch von Rodriguez/Bass

Aspekte dieses Versuches wurden in den Kapiteln 1.4.2 Temperatur und 2.4.1. Inhibition des Fäulnisprozesses besprochen.

Leiche	1	2	3
Best.tiefe	1.2 m	0.6 m	0.3 m
Best.datum	18. 5. 82	4. 6. 83 (?)	24. 8. 83
Exhumation	18. 5. 83	7. 12. 83	7. 11. 83
Kleider	synthetische Hosen	Baumwollhosen, Lederstiefel	synthetische Hosen
Körpertemperatur zum Bestattungszeitpunkt (≈ Bodentemperatur)	≈ 20°C	≈ 27°C	≈ 26°C
mittlerer Temperaturanstieg	≈ 3.4°C	≈ 5°C	≈ 10°C
Zustand	bemerkenswerte Erhaltung	wenig Zersetzung	starke Zersetzung. Innere Organe sind abgebaut
Skelettierungsgrad	minimal, auf Kopf, Hände und Füße beschränkt	Hände und Füße vollständig, Schienbein geringe Freisetzung	stark vorangeschritten, Füße mumifiziert
Adipocire	der grösste Teil des Körpers stark bedeckt	mässiges Auftreten auf Brustkasten und Beinen	geringe Mengen entlang der verbliebenen Wände der oberen Brusthöhle
Brustkasten, Abdomen	leicht eingedrückt	Brustkasten: intakt Abdomen: stark eingedrückt	Brustbein teilweise eingefallen
Schädel	noch grosse Gewebemengen vorhanden, Augenhöhle und Nasenpartie sind frei	vollständig mit Gewebe bedeckt, ausser Ober- und Unterkiefer, Augenhöhle und Nasenpartie sind frei	skelettiert
Aktivität der Aasinsekten	keine	keine	Diptera in verschiedenen Stadien
Abbau der Kleider	keine Anzeichen	gewisse Anzeichen	geringe Anzeichen
pH vorher	5.3	4.6	4.8
pH nachher	5.8	5.7	6.9
pH-Differenz	+ 0.5	+ 1.1	+ 2.1
Bemerkungen			

Leiche	4	5	6
Best.tiefe	0.3 m	0.3 m	0.3 m
Best.datum	14. 10. 83	23. 1. 84	23. 1. 84
Exhumation	20. 11. 83	11. 4. 84	11. 4. 84
Kleider	Baumwollhosen	keine	keine
Körpertemperatur zum Bestattungszeitpunkt (≈ Bodentemperatur)	≈ 18°C		
mittlerer Temperaturanstieg	≈ 7°C		
Zustand	keine markanten Zer- setzungsanzeichen	mittlere Zersetzung	mittlere Zersetzung
Skelettierungsgrad		gering; rechter Fuss aufgrund Nagetieres, teilweise freier Schä- del	
Adipocire		wenige Spuren entlang der ganzen Länge der Beine	
Brustkasten, Abdomen	Brustkasten: intakt; Abdomen: sehr blutig		
Schädel	Gesicht: schwach blu- tig und gewisse Entstellungen		
Aktivität der Aasinsekten	wenige Dipterenlarven	wenige Dipterenlarven	wenige Dipterenlarven
Abbau der Kleider	stark mit Pilzen befal- len		
pH vorher	5.7	5.8	5.8
pH nachher	5.9	5.9	5.8
pH-Differenz	+ 0.2	+ 0.1	= 0
Bemerkungen	aus Nase, Mund und Enddarm flossen mitt- lere Mengen an Körper- flüssigkeiten	autopsiert	autopsiert

#### Literatur:

Rodriguez W. C., Bass W. M. (1985): Decomposition of buried bodies and methods that may aid in their location. Journal of Forensic Sciences, 30(3), 836-852.

## Anhang B: Säurewirkung langkettiger Fettsäuren

Langkettige Fettsäuren dürften eine abgeschätzte theoretische Säurekonstante von ungefähr fünf besitzen. Dieser Wert, welcher die Säurestärke relativ zu Wasser angibt, folgt aus der Bestimmung der entsprechenden Konstante bei kürzerkettigen Fettsäuren und aus der Überlegung, dass eine Verlängerung der Kohlenwasserstoffkette aufgrund der grossen Distanz zur Säuregruppe keinen wesentlichen Einfluss ausübt.<sup>i</sup> Die pK-Werte von Buttersäure, Capronsäure und Heptansäure betragen 4.81, 4.89 und 4.88.<sup>ii</sup> Aufgrund der äusserst geringen Wasserlöslichkeit der langkettigen Fettsäuren kann es sich allerdings lediglich um einen theoretischen Wert handeln. Die Ölsäure gilt in Wasser als praktisch unlöslich, die Palmitinsäure wird gänzlich als unlöslich beschrieben.<sup>iii</sup> (Gemäss SCHWARZENBACH sind allerdings alle organischen Verbindungen in einem gewissen Ausmass in Wasser löslich. Die Frage ist nur, ob die Analytik für deren Bestimmung tauglich ist.<sup>iv</sup>) Ihr Potential zur Freisetzung von Protonen ist demnach nur in einem beschränkten Ausmass vorstellbar.

Mit der Protonenfreisetzung von Fettsäuren ins Wasser ist ein Ladungstransfer verbunden, der wieder ausgeglichen werden muss. Mit Bodenpartikeln würde ein solcher Prozess über Kationenaustausch erfolgen. Es ist vorstellbar, dass dieser Prozess bei Fettsäuren, die mit Wasser in Kontakt stehen, ähnlich ablaufen wird. Bei amorphem Vorliegen der Fettsäuren werden diese - analog den andern Tensiden - das polare Molekülende gegen die Wasserphase, das apolare Ende gegen die Fettsäurenphase orientieren. Auf diese Weise stehen an der Grenzfläche die Säuregruppen der Fettsäuren mit dem Wasser in Kontakt. Die Gegenladung zu den herausgelösten Protonen ist - in Analogie zum Boden - als elektrische Doppelschicht denkbar.

(Diese Ausführungen beruhen auf theoretischen Überlegungen und sind nicht experimentell abgestützt.)

### Literatur:

Schwarzenbach, R. P., Gschwend, P. M., Imboden, D. M. (1993): Environmental Organic Chemistry. John Wiley & Sons, Inc., New York.

Handbook of Chemistry and Physics.

The Merck Index, 11.ed, 1989.

---

<sup>i</sup>vgl. Schwarzenbach (1993): S. 167

<sup>ii</sup>Handbook of Chemistry and Physics

<sup>iii</sup>The Merck Index, 11. ed., 1989

<sup>iv</sup>Schwarzenbach (1993): S. 107

## Anhang C: Zusammenstellung von Leichenkataboliten

Diese Liste hegt keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Sie bezweckt lediglich einen groben Überblick zu vermitteln, mit welchen Substanzklassen im Rahmen der Leichenzersetzung zu rechnen ist.

### Amine

- Ptomaine (Schmidt, 193)  
meist aromatische Amine (Schmidt, 228)
- quaternäre Ammoniumbasen (Schmidt, 193)
- Mono- und Diamine (Schmidt, 226)

### Organische Säuren

- Bernsteinsäure: relativ häufig in gefaulten Organen gefunden (Schmidt, 227)
- Benzoesäure (Schmidt, 226)
- Oxalsäure (Schmidt, 227)
- Salicylsäure (Schmidt, 227)
- Aminosäuren (Schmidt, 193)
- Palmitinsäure (Berg, 71)
- Ölsäure (Berg, 71)
- Ameisensäure (Vass)
- Essigsäure (Vass)
- Capron- und Heptansäure: in den kalten Monaten (< 10°C) aufgefunden (Vass)
- Propion-, Butter- und Valeriansäuren: werden in bestimmten Verhältnis freigesetzt (Vass)
- aromatische Säuren (Schmidt, 193)

### Sulfide

- Schwefelwasserstoff (Schmidt, 226)
- Alkylsulfide (Schmidt, 193)
- Alkylschwefelsäuren (Schmidt, 193)
- Mercaptane (Schmidt, 193)
- Sulfoxide (Schmidt, 226)
- Thiosulfat-, Thioharnstoff- und Thiophosphorsäureverbindungen (Schmidt, 226)

### Phosphorverbindungen (Schmidt, 226)

### Alkohole

- 95 % Ethanol (Schmidt, 218)
- 1.5 % Methanol, bis zu 15 % bei starker Fäulnis (Schmidt, 218)
- 3 bis 4 % höhere Alkohole, je nach Keimbeseidlung, n-Propanol, iso-Propanol, n-Butanol, sec.-Butanol und weitere (Schmidt, 218)
- Glycerin (Berg, 71)

### Ketone

- Aceton (Schmidt, 226)

### Aldehyde

- Formaldehyd (Schmidt, 217)
- Acetaldehyd (Schmidt, 217)

### Elektrolyte

Vgl. Artikel von Vass (zeitlicher Ablauf der Freisetzung)

- Natrium: unmittelbare aber unterschiedlich ausgeprägte Abnahme p.m. (Coe, 18)
- Chlorid: Abnahme im Plasma durch intrazelluläre Verlagerung. Durchschnittlicher Gehalt: 80-90 mEq/l nach 24 h p.m. (Coe, 18)
- Kalium: markanter Anstieg (bis 18 mEq/l) innerhalb der ersten Stunde p.m. (schnelle Abgabe von Zellen), danach geringerer Anstieg (?) (Coe, 18)
- Kalzium: bleibt in der frühen postmortalen Phase konstant (Coe, 19)
- Phosphor: Anstieg des anorganischen Phosphorgehaltes in der 1. h p.m. Nach 18 h p.m.: 20 mEq/l. Auch der organische Phosphor zeigt einen Konzentrationsanstieg (Coe, 19)
- Magnesium: nur leichten Anstieg. Sobald Hämolyse einsetzt: schneller Konzentrationsanstieg (Coe, 19)

### Weitere Produkte

- Ammoniak (Schmidt, 193)
- starker Anstieg nach den ersten 8 h p.m. (Coe, 16)
- Kohlendioxid (Schmidt, 193)
  - Kohlenmonoxid (Schmidt, 226)
  - Methan (Rubner, 181)
  - Wasserstoff (Berg, 69)
  - Skatol, Indol, etc. (Rubner, 181)
  - Schwefelammonium (Rubner, 181)
  - Blausäure (Schmidt, 218)
  - Nitrit und Nitrat (Schmidt, 227)

### Literatur:

Berg, S. (1975): Leichenzersetzung und Leichenzerstörung. In: Mueller B.: Gerichtliche Medizin, S. 62-106. Springer, Berlin-Heidelberg-New York.

Coe J. I. (1974): Postmortem Chemistry: Practical Considerations and a Review of the Literature. J. For. Sci, 19: 13-32.

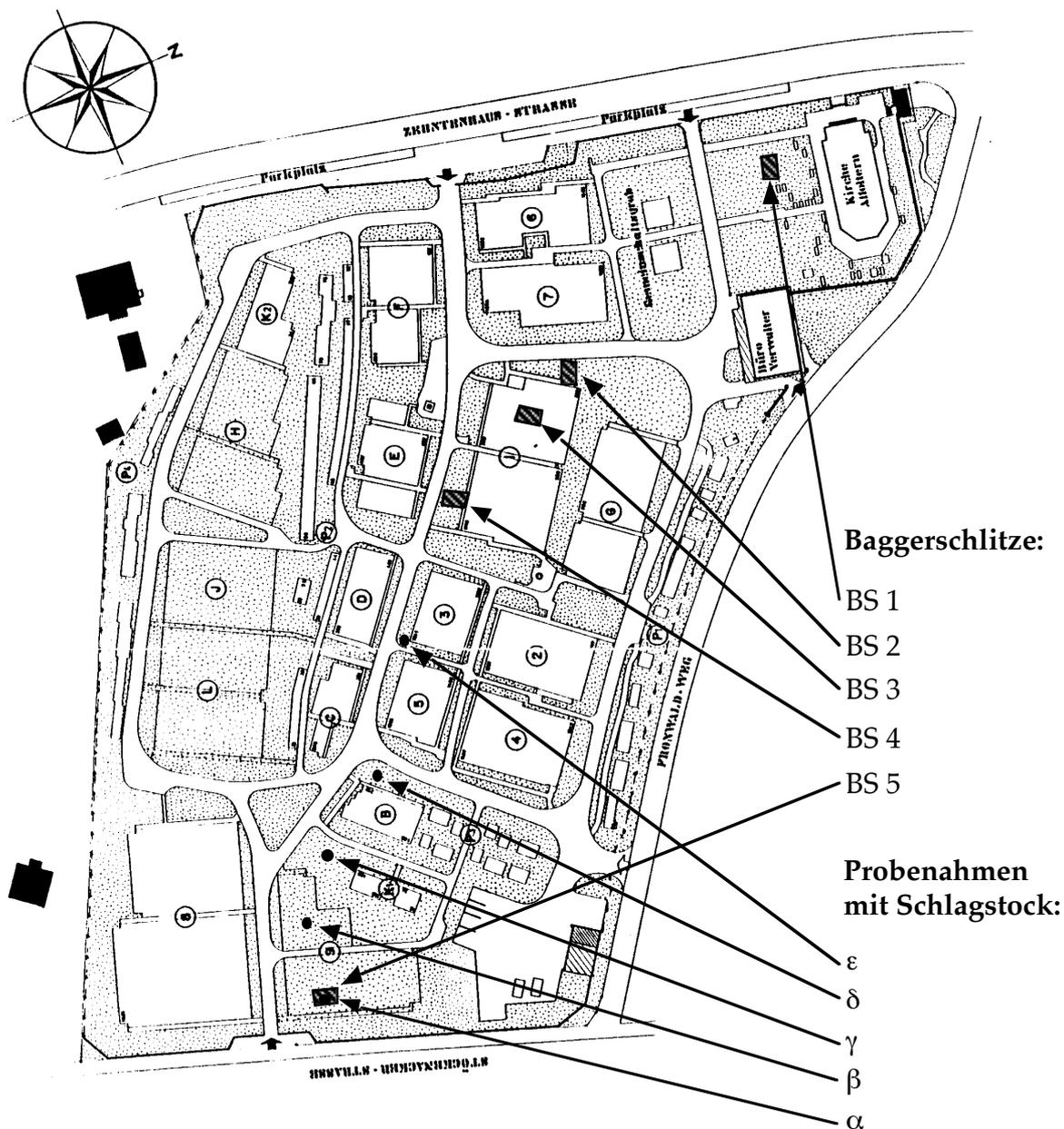
Rubner M., et al. (1912): Handbuch der Hygiene. Band 4, Abt. 1, Verlag von S. Hirzel, Leipzig.

Schmidt, G. (1969): Postmortale Veränderungen von Arzneistoffen und Giften in Organen und Körperflüssigkeiten einschliesslich Neubildung von Störsubstanzen. In: Gadamers Lehrbuch der chemischen Toxikologie, Bd. 1, Vandenhoeck & Ruprecht, Göttingen.

Vass A. A., et al. (1992): Time Since Death Determinations of Human Cadavers Using Soil Solution. Aus: Journal of Forensic Sciences, Vol. 37 (5), 1236-1253.

# Anhang D: Datenmaterial zu den bodenkundlich-geologischen Sondierungen im Friedhof Zürich-Affoltern

## Situationsplan des Friedhofes Zürich-Affoltern



## **Geologie des Friedhofes Zürich-Affoltern**

(schriftliche Mitteilung Hansjürg Büchi)

Der Friedhof Zürich-Affoltern liegt am Rande einer Terrasse, die östlich über eine ca. 5 Meter hohe Geländekante gegen das tiefste Talniveau hin abgeschlossen wird. Die Geländekante ist durch den Strassenbau anthropogen überprägt, ihr Entstehen ist jedoch natürlichen Ursprungs. Der Friedhofuntergrund ist heterogen, im zentralen Teil herrschen sandige Kiese (mässig bis gut gerundet) vor, die gegen die Geländekante hin zunehmend durch siltige Lockergesteine mit wenig Kies und erhöhtem Tonanteil abgelöst werden. Gegen Südwesten wird der Untergrund der Geländeterrasse zunehmend tonig, der Grobanteil verschwindet weitgehend. Die tonigen Böden sind aber gut drainiert, so dass anzunehmen ist, dass der Kieskörper unter das tonige Auflagematerial hineinzieht und als Drainage wirkt.

Der Friedhof liegt in einem durch den Gletscherrückzug am Ende der letzten Eiszeit geprägten Gebiet, im Talraum zwischen den Endmoränen des Schlieren-Stadiums (bei Watt) und des Zürich-Stadiums (bei Dübendorf). HANTKE (1967) kartiert das Gelände des Friedhofs als Grundmoräne. Aufgrund der angetroffenen Lockergesteine muss diese Klassierung jedoch als falsch taxiert werden. Auf dem ganzen Gelände fehlen die hierfür typischen, schlecht sortierten Lockergesteine mit Siltmatrix ebenso wie kantige Steine und grobe Blöcke. Vielmehr dürfte es sich um eine Bachschüttung im Vorfeld des sich zurückziehenden Eises handeln (unter Umständen auch als Resultat eines Eisrandabflusses durch das Holderbach-tobel vom Hönggerberg hinunter). Links und rechts des erhöhten Schwemmfächers lagerten sich dabei feinerkörnige Gesteine ab. Unklar ist die Ausbildung der Geländekante am westlichen Friedhofrand. Möglicherweise handelt es sich um das Produkt des Abschmelzens einer liegegebliebenen Toteismasse, an deren Rand ursprünglich die siltigen Sedimente abgelagert worden wären. Die ursprünglich mehr oder weniger horizontale Oberfläche wäre im Laufe des nachfolgenden Schmelzprozesses nachgesunken und hätte so zur Ausbildung der Kante geführt. Dass eine solche Interpretation nicht abwegig ist, zeigen die Sölle, die das tiefere Talniveau im Westen abschliessen (Katzensee und Moorflächen). Vermutlich wurde das heutige Friedhofsgelände gegen Osten hin durch ein ruhendes Gewässer (evtl. einen Eisrandtümpel oder ein Toteisloch) abgeschlossen, in dem sich nach dem allmählichen Versiegen der Kieszufuhr toniges Material ablagerte.

### **Literatur:**

Hantke, R. et al. (1967): Geologische Karte des Kantons Zürich und seiner Nachbargebiete. Vjschr. Natf. Ges. 112/2. Zürich.

Jäckli, Heinrich (1989): Geologie von Zürich. Von der Entstehung der Landschaft bis zum Eingriff des Menschen. Orell Füssli, Zürich.

## **Ergänzungen zum Kalkvorkommen des Bodens im Friedhof Zürich-Affoltern**

Im Friedhof Zürich-Affoltern lassen sich Unregelmässigkeiten des Kalkvorkommens feststellen, die im Zusammenhang mit dem oben geschilderten heterogenen Untergrund zu sehen sind. Bis zum Baggerschlitz (BS) 4 ist von Südosten her eine deutliche Entkalkung des Bodens festzustellen. An der Stelle  $\gamma$  (vgl. Situationsplan des Friedhofes) erweist sich der Boden unterhalb der obersten 10-15 cm (Ah-Horizont) noch als kalkhaltig. An der Stelle  $\delta$  hingegen beschränkt sich das Kalkvorkommen innerhalb der obersten 80 cm auf einzelne Steine. Die Feinerde hingegen ist kalkfrei. An der Stelle  $\epsilon$  wurde in der gesamten Bodenprobe (bis 0.9 m Tiefe) kein Kalk mehr vorgefunden. Die Kalkgrenzen sind somit bei  $\delta$  und  $\epsilon$  aufgrund der zu geringen Untersuchungstiefe nicht bestimmbar. Diesbezüglich gaben die Baggerschlitze bessere Informationsausbeuten her. An der Stelle des BS 4 liegt die Kalkgrenze bei 1.6 m Bodentiefe. Im BS 2 liegt die Kalkgrenze nur noch bei 0.74 m Tiefe. Auf der Nordwestseite des BS 4 bestätigte sich somit die Tendenz der zunehmenden Entkalkung nicht mehr.

(Die in Grabfeldern gelegenen BS 3 und BS 1 sind bezüglich der Bestimmung von Kalkgrenzen aufgrund der gestörten Schichtung nicht aussagekräftig. Ausser im aufgeschütteten Humus (BS 4) zeigen sich diese beiden Bodenprofile in allen Bodenhorizonten als kalkhaltig.)