

# «Plankton der Atmosphäre» – Vorkommen und Verbreitung von Mikroorganismen in der Luft

Helmut Brandl (Zürich)

## Zusammenfassung

Bioaerosole sind luftbürtige Partikel biologischen Ursprungs und umfassen hauptsächlich Viren, Bakterien, Pilze, sowie Pollen und andere Pflanzenteile. Diese machen etwa 25% der gesamten partikulären Aerosole aus, in gewissen geographischen Regionen sogar bis zu 75%. Bakterien und Pilze sowie deren Sporen stellen den wichtigsten Teil der Bioaerosole dar und finden durch Windsysteme (z. B. Passatwinde) eine interkontinentale Verbreitung. Bioaerosole üben einen Einfluss auf unsere Gesundheit (Ausbreitung von Krankheiten) aus. Sie können ausserdem die chemische Zusammensetzung unserer Atmosphäre modifizieren, indem sie beispielsweise flüchtige organische Verbindungen aufnehmen und umwandeln. Durch die aktive Katalyse der Bildung von Eiskristallen oder der Kondensation von Wasser können sie zur Wolkenbildung beitragen und somit Wetter und Klima beeinflussen. Unser Wissen über die mikrobielle Zusammensetzung und deren Abhängigkeit von Umweltfaktoren sowie über Quellen und Senken von Bioaerosolen ist aber heute nur bruchstückhaft.

## «Plankton of the atmosphere» – Occurrence and distribution of microorganisms in the air

Bioaerosols are part of airborne particles occurring in the atmosphere and include mainly viruses, bacteria, fungi as well as pollen grains and other plant parts. It has been estimated that approximately 25% of all airborne particles are of biological origin, though in certain geographical regions levels of up to 75% are reached. Bacteria and fungi as well as their spores are the most important bioaerosols. They are intercontinentally distributed through global wind systems (e.g., trade winds). Airborne particles of biological origin might influence human health as well as weather and climate. In addition, bioaerosols might actively modify the chemical composition of the atmosphere by adsorbing, transforming, and desorbing volatile organic compounds. However, the understanding of the governing processes, of the dependency between particles and microbes, and of the occurrence of sources and sinks is still limited. In particular, the microbial diversity of bioaerosols and its relation to environmental factor is largely unknown.

**Schlagwörter:** Bioaerosole – Globale Verteilung – Klima – Mikrobielle Diversität – Wetter

**Key words:** bioaerosols – climate – global distribution – microbial diversity – weather

## 1 BIOAEROSOLE SIND OMNIPRESENT IN DER ATMOSPHERE

Als Aerosole bezeichnet man Tröpfchen oder feste Partikel in einem Gas. Bezüglich unserer Atmosphäre umfassen diese v. a. mineralische Bestandteile (Sand- und Bodenpartikel) und Meersalze (JAENICKE 2010). Ein signifikanter Teil ist jedoch biologischen Ursprungs: man schätzt, dass etwa 25% aller luftbürtigen Partikel in der Atmosphäre biologische Partikel sind (MORRIS et al. 2008, JAENICKE 2010). In bestimmten geographischen Regionen wurde sogar ein Anteil von etwa 75% festgestellt (MORRIS et al. 2008). Dieser umfasst Viren, Bakterien und deren Sporen,

Pilze und deren Sporen, Algen, Protozoen, Pollen, Pflanzenpartikel oder sogar Hautschuppen (BRANDL et al. 2008, GIERÉ & QUEROL 2010), wobei Bakterien und Pilze die wichtigsten und anteilmässig die bedeutendsten biologischen Partikel darstellen. Viele luftbürtige biologische Partikel sind zwischen 1 und 10 Mikrometer gross (JAENICKE 2010), können aber (z. B. im Falle von Pollenkörnern) auch grösser sein (Abb. 1).

Aufgrund ihrer Kleinheit und geringen Dichte werden Bioaerosole durch Wind- und Luftströmungen weltweit verfrachtet (GRIFFIN et al. 2002). Prinzipiell gibt es zwei grosse Systeme, die zur globalen Verbreitung von atmo-

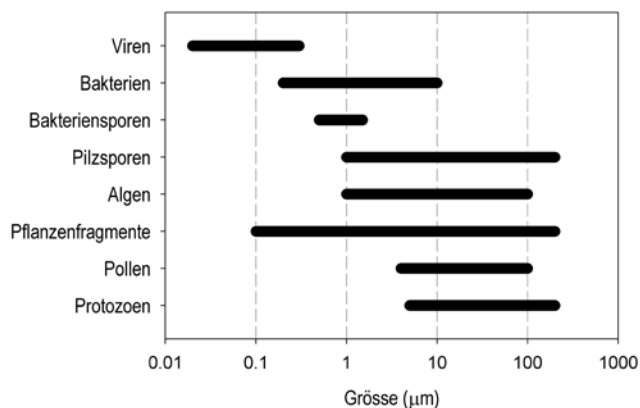


Abb. 1. Ungefähre Grössen von Bioaerosolen (modifiziert nach JAENICKE 2010).

Fig. 1. Approximate size ranges of bioaerosols (modified after JAENICKE 2010).

sphärischem Staub und biologischen Partikeln beitragen (Abb. 2) (KELLOGG & GRIFFIN 2006, ENGELBRECHT & DERBYSHIRE 2010). Das afrikanische System hat seinen Ursprung in den Wüstengebieten Nordafrikas, v. a. in der Sahara. In den Sommer- und Herbstmonaten (Mai bis November) werden Sand- und Bodenpartikel durch Passatwinde aus der Sahara in die Karibik und den Süden der USA verfrachtet. Die durchschnittliche «Reisezeit» beträgt 10 bis 11 Tage, wobei bei Starkwind und in höheren Luftschichten die Aufenthaltsdauer auf nur wenige Tage verkürzt werden kann (GORBUSHINA 2007). In den Wintermonaten (Dezember bis April) werden Staubpartikel

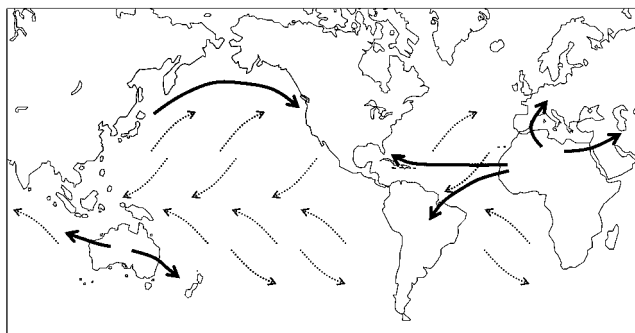


Abb. 2. Globale Windsysteme, die für die Verfrachtung von Staub und Bioaerosolen verantwortlich sind (modifiziert nach GRIFFIN et al. 2002, KELLOGG & GRIFFIN 2006, ENGELBRECHT & DERBYSHIRE 2010). Schraffierte Flächen mit Pfeilen bezeichnen Windsysteme und Ausbreitungsrouten, gestrichelte Pfeile Windströmungen (v. a. Passat).

Fig. 2. Global wind system responsible for the distribution of dust and bioaerosols (modified after GRIFFIN et al. 2002, KELLOGG & GRIFFIN 2006, ENGELBRECHT & DERBYSHIRE 2010). Shaded areas with arrows denote wind systems and distribution routes, dotted arrows wind currents (mainly trade winds).

nach Südamerika, hauptsächlich in das Amazonasgebiet, getragen. Das ganze Jahr über gelangen Pulse von Saharastaub über das Mittelmeer nach Süd- und Zentraleuropa (KELLOGG & GRIFFIN 2006). Das asiatische System ist vor allem im Frühling (März bis Mai) aktiv und hat seinen Ursprung in den Wüsten Gobi und Taklamakan. Mit den Winden gelangen Sand- und Staubpartikel (oft zusammen mit industriellen Emissionen aus China, Korea und Japan) bis an die Westküste der USA. Gelegentlich werden Stäube aus Asien bis an die Ostküste der USA und sogar bis nach Europa getragen und werden so global verteilt (KELLOGG & GRIFFIN 2006). Das australische System hat für die globale Verteilung nur eine geringe Bedeutung und erreicht Neuseeland und die Inseln des Südpazifiks.

## 2 ÖKOLOGISCHE BEDEUTUNG VON BIOAEROSOLEN

Man schätzt, dass jährlich etwa 2 Milliarden Tonnen Erd-, Sand- und Staubpartikel durch Winde und Stürme in die Atmosphäre verfrachtet werden (GRIFFIN et al. 2002, KELLOGG & GRIFFIN 2006). Diese Erkenntnis ist aber nicht neu und wurde schon vor 100 Jahren formuliert (FREE 1911). Es reichen bereits geringe Windgeschwindigkeiten von etwa 2 km/h (was einer Windstärke von 0 bis 1 Beaufort entspricht), um Quarzpartikel mit einem Durchmesser von 40 µm in Schwebelage zu halten (THOULET 1908). Wenn man nun annimmt, dass 1 Gramm Wüstensand etwa  $10^6$  und fruchtbarer Ackerboden etwa  $10^9$  Mikroorganismen enthält, lassen sich etwa  $10^{21}$  bis  $10^{24}$  mikrobielle Zellen in der Atmosphäre finden. Weiter kann man annehmen, dass in einem Kilogramm Erdmaterial etwa 500 mg mikrobielle Biomasse zu finden ist, was eine Menge von 1 Million Tonnen Biomasse ergibt, welche jährlich in der Atmosphäre die Erde umkreist.

Wir atmen mit einem Atemzug ungefähr einen halben Liter Luft ein. Mit 15 Atemzügen pro Minute erreichen etwa zehn Kubikmeter Luft pro Tag unsere Lunge. In einem Kubikmeter Luft finden wir etwa 1000 KBE (koloniebildende Einheiten; engl. cfu, colony forming units), d. h. mikrobielle Zellen (Bakterien, Pilze), die fähig sind, auf einem Nährmedium zu wachsen. Es ist bekannt, dass dies aber nur etwa 1% aller Mikroorganismen gelingt, die effektive Zahl also um einen Faktor 100 höher liegt. Somit inhalieren wir täglich 1 Million Mikrobzellen!

Bioaerosole werden nicht nur passiv in der Atmosphäre durch Luftströmungen verfrachtet, sondern besitzen auch aktive Funktionen (ARIYA et al. 2009). Unsere Gesund-

heit wird direkt durch Bioaerosole beeinflusst (Abb. 3). Einerseits können pilzliche Aerosole oder Pflanzenpollen zu allergischen Immunreaktionen (z. B. Heuschnupfen) führen, andererseits können Krankheitserreger (z. B. Milzbrand) als Bioaerosole verbreitet werden. Im Gegensatz zu mineralischen Partikeln sind mikrobielle Bestandteile von Aerosolen ausserdem fähig, die Zusammensetzung der Atmosphäre aktiv zu modifizieren. Flüchtige organische Verbindungen können aufgenommen, metabolisch transformiert und dann wieder abgegeben werden (MORRIS et al. 2008). Zellen, die nicht metabolisch aktiv sind, können chemische Komponenten sorbieren und desorbieren. Auch Wetter und Klima können durch luftbürtige Mikroben beeinflusst werden (ARIYA et al. 2009). Bioaerosole können zur Kondensation von Wasserdampf und zur Wolkenbildung beitragen. Ebenso kann die Eis-Nukleation von Mikroorganismen aktiv katalysiert werden. So besitzen z. B. *Pseudomonas syringae*, *Pseudomonas fluorescens*, *Erwinia herbicola* oder *Xanthomonas campestris* Membranproteine, welche die Bildung von Eis schon bei Temperaturen von  $-2$  bis  $-5$  °C katalysieren (MARGARITIS 1991), während mineralische Partikel (z. B. Vulkanasche) erst bei  $-8$  °C beginnen, als Nukleus für die Eisbildung zu wirken (JAENICKE 2010). Pseudomonaden sind typische bakterielle Vertreter in Erd- und Bodenmaterial und können leicht aufgewirbelt und in die Atmosphäre verfrachtet werden.

Sonnenstrahlung kann von biologischen Bestandteilen direkt absorbiert oder gestreut und die Albedo so verändert werden (Abb. 3). Neben Absorption und Reflektion tragen natürlich auch Wolkenbildung und Eis-Nukleation zu einem veränderten globalen Strahlungsregime bei.

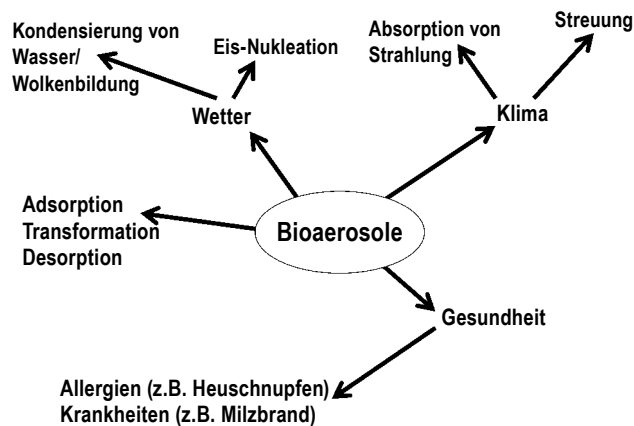


Abb. 3. Ökologische Bedeutung von Bioaerosolen bezüglich Gesundheit und Klima.

Fig. 3. Ecological importance of bioaerosols in relation to human health and climate.

### 3 MIKROBIELLE ZUSAMMENSETZUNG VON BIOAEROSOLEN

Generell wird angenommen, dass in aquatischen Ökosystemen (z. B. in tropischen Meeren) die mikrobielle Artenvielfalt hoch ist. Dies gilt auch für terrestrische Systeme (z. B. Böden). Im Gegensatz dazu weiss man über die mikrobielle Zusammensetzung der Atmosphäre sehr wenig. Verschiedene neuere Untersuchungen (BRODIE et al. 2007) lassen aber den Schluss zu, dass auch die Atmosphäre ein Ökosystem ist, das sich durch eine hohe mikrobielle Diversität auszeichnet. Dies hat Craig Venter (Initiator des «Human Genome Project») anlässlich eines Mikrobiologie-Kongresses (ISME11, Wien, Sept. 2006) veranlasst, das «Air Genome Project» vorzustellen und zu bemerken, dass «The microbial diversity in New York City air might be higher than in the ocean!»

Typische Bakterien in der Atmosphäre und anteilmässig bedeutend sind Arten von *Bacillus*, *Micrococcus* und *Kocuria*. Vertreter der Gattung *Bacillus* besitzen die Fähigkeit, Sporen zu bilden, welche sehr resistent gegenüber UV-Strahlung, Nährstoffmangel und Austrocknung sind. Dies erleichtert die Verbreitung der Organismen über lange Distanzen (GORBUSHINA 2007). *Micrococcus* und *Kocuria* haben die Fähigkeit, farbige (rosa, gelbe, orange und rote) Pigmente zu bilden (siehe dazu Abb. 1.6.2. in BACHOFEN et al. 2006, S. 23), was typisch für einen grossen Teil von luftbürtigen Bakterien ist. Detaillierte Studien über die chemische Struktur und die Physiologie dieser Pigmente gibt es nur wenige, aber es wird angenommen, dass Pigmente den Bakterien als Schutz vor dem UV-Licht der Sonne dienen und zur erhöhten Widerstandsfähigkeit gegen Umwelteinflüsse beitragen (TONG & LIGHTHART 1997). Pigmente werden aber auch nach ein paar Tagen Lagerung der Bakterienkulturen ohne Licht im Kühlschrank bei 4 °C gebildet (BRANDL, unveröffentlicht), was eine Funktion als «Kälteschutz» vermuten lässt. Im Weiteren bestehen auch wenige Hinweise über den Zusammenhang zwischen Pigmentbildung und Pathogenizität, Virulenz und Antibiotika-Resistenz (LIU & NIZET 2009, SCHLOSS et al. 2010). Ausserdem zeigen gewisse Pigmente (z. B. blaues Violacein aus *Chromobacterium violaceum*) eine antibakterielle Wirkung (NAKAMURA et al. 2003).

Pilze, die anteilmässig von Bedeutung sind, umfassen v. a. die Gattungen *Alternaria*, *Aspergillus*, *Cladosporium* und *Penicillium* und sind weltweit verbreitet (GORBUSHINA 2007, GONÇALVES et al. 2010). Die mikrobielle Zusammensetzung ist aber sehr dynamisch und ist starken zeitlichen

Fluktuationen (oft im Sekunden- oder Minuten-Massstab!) unterworfen (BRANDL et al. 2008). Die organismische Zusammensetzung ist aber auch sehr standortspezifisch: In der unmittelbaren Nähe von Kläranlagen können vermehrt Fäkalkeime (z. B. *Enterobacter*) auftreten, während die Umgebung von Kompostieranlagen durch erhöhte Konzentrationen an Pilzsporen (z. B. *Aspergillus*) belastet sein kann.

#### 4 ZÜRICH-IRCHEL UND JUNGFRAUJOCH – EIN STANDORTVERGLEICH

Auf dem Jungfraujoch (Sphinx, 3571 m ü. M.) betrug zu einem bestimmten Zeitpunkt der Anteil an biologischen Partikeln am gesamten Aerosol etwa 13% bezüglich der Anzahl und etwa 10% bezüglich des Volumens (REICHERT et al. 2000). Die Bioaerosole beinhalteten v. a. Bakterien (Grösse <1 µm), Sporen (1 bis 15 µm), Pollen (10 bis 20 µm) und Pflanzenfragmente (>20 µm) (REICHERT et al. 2000). Eigene Messungen zeigen im Vergleich der Partikel- und Keimkonzentrationen in der Luft eines städtischen Standorts (Zürich-Irchel, 488 m ü. M.) mit derjenigen auf dem Jungfraujoch signifikante Unterschiede (Abb. 4). Pro Kubikmeter Luft findet man auf dem Jungfraujoch nur wenige Keime (<10 KBE, koloniebildende Einheiten) auf einem entsprechenden Nährboden für Bakterien oder Pilze. Im Gegensatz dazu waren am Messtag am Standort Zürich-Irchel etwa 80 bis 120 KBE zu finden, eine für die Jahreszeit (Mitte September) typische Konzentration. Die Partikelkonzentration auf dem Jungfraujoch war in allen Grössenklassen etwa 10x niedriger im Vergleich zum Standort in Zürich (Abb. 4), was (gemäss einer Umrechnung nach LOUMA & BATTERMAN 2001) zu Feinstaubbelastungen von 3 bzw. 65 µg/m<sup>3</sup> führte (Tab. 1). Trotz der unterschiedlichen Feinstaubkonzentrationen war aber die

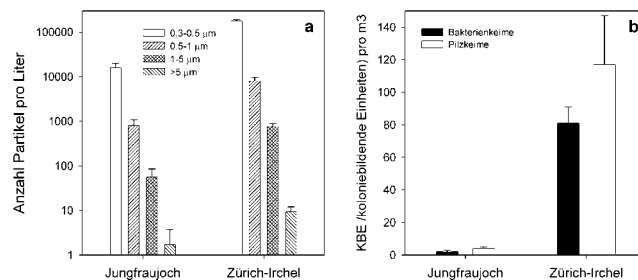


Abb. 4. Grössenverteilung von partikulären Aerosolen (a); Bakterien- oder Pilzkeime (b) auf dem Jungfraujoch (3571 m ü. M.), im Vergleich zu einem städtischen Standort (Zürich-Irchel).

Fig. 4. Particle size distribution of dust (a) sampled at Jungfraujoch (3571 m.a.s.l.) and (b) numbers of bacteria or fungi in comparison to an urban location (Zurich-Irchel).

prozentuale Zusammensetzung der luftbürtigen Partikel bezüglich der einzelnen Grössenklassen an beiden Standorten praktisch identisch (Tab. 1).

#### 5 FAZIT

Die Atmosphäre ist im Gegensatz zum Wasser oder zum Boden ein sehr dynamisches System, was zu einer qualitativ und quantitativ heterogenen Verteilung von biologischen Partikeln führt. Einiges ist heute über die globale Verbreitung von Sand und Staub bekannt, auch aufgrund von Satellitenbildern. Sand- und Staubpartikel dienen als Trägermaterial für Bakterien und Pilze. Die Verbreitung der Bioaerosole ist einer hohen zeitlichen Dynamik mit Schwankungen im Minutenbereich, aber auch saisonalen Schwankungen unterworfen. Die mikrobielle Diversität in Bioaerosolen und ihre Abhängigkeit von Quellen und Senken sowie von verschiedenen Umweltfaktoren ist aber noch kaum bekannt und wir tappen diesbezüglich noch weitgehend im Dunkeln.

Tab. 1. Prozentuale Korngrössenverteilung von Feinstaub auf dem Jungfraujoch (3571 m ü. M.) im Vergleich zu einem städtischen Standort (Zürich-Irchel, 488 m ü. M.). n= 72 bzw. 104. <sup>a</sup>Umrechnung aus Anzahl Partikel in einer Grössenklasse nach LUOMA & BATTERMAN (2001).

Tab. 1. Percental particle size distribution of dust sampled at Jungfraujoch (3571 m.a.s.l.) in comparison to an urban location (Zurich-Irchel, 488 m.a.s.l.). n=72 and 104, resp. <sup>a</sup>Conversion from particle numbers to particulate matter according to LUOMA & BATTERMAN (2001).

Partikelgrösse (µm)	Anteil (%)		Feinstaub <sup>a</sup> (µg/m <sup>3</sup> )	
	Jungfraujoch	Zürich-Irchel	Jungfraujoch	Zürich-Irchel
0.3–0.5	94.8 ± 23.7	95.3 ± 6.2	0.7	7.8
0.5–1	4.8 ± 1.6	4.3 ± 0.8	0.2	29.9
1–5	0.34 ± 0.17	0.41 ± 0.06	1.8	26.6
>5	0.010 ± 0.012	0.005 ± 0.002	0.5	2.6
Total			3.2	64.9

## 6 LITERATUR

- ARIYA, P.A., SUN, J., ELTOUNY, N.A., HUDSON, E.D., HAYES, C.T. & KOS, G. 2009. Physical and chemical characterization of bioaerosols – Implication for nucleation processes. *International Reviews in Physical Chemistry* 28, 1–32.
- BACHOFEN, R., BRANDL, H. & SCHANZ, F. 2006. Mikroskopisch klein, aber doch sichtbar! Ein Feldführer für Mikroorganismen. *Neujahrsblatt der Naturforschenden Gesellschaft in Zürich*, Bd. 209, 148 pp.
- BRANDL, H., von DÄNIKEN, A., HITZ, C. & KREBS, W. 2008. Short-term dynamic patterns of bioaerosol generation and distribution in an indoor environment. *Aerobiologia* 14, 203–209.
- BRODIE, E.L., DESANTIS, T.Z., MOBERG, P.M.P., ZUBIETTA, I.X., PICENO, Y.M. & ANDERSEN, G.L. 2007. Urban aerosols harbor diverse and dynamic bacterial populations. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 104, 299–304.
- ENGELBRECHT, J.P. & DERBYSHIRE, E. 2010. Airborne mineral dust. *Elements* 6, 241–246.
- FREE, E.E. 1911. *The Movement of Soil Material by the Wind*. U.S. Department of Agriculture, Bureau of Soils. Bulletin No. 68, Washington D.C., 272 pp.
- GIERÉ, R. & QUEROL, X. 2010. Solid particulate matter in the atmosphere. *Elements* 6, 215–222.
- GONÇALVES, F.L.T., BAUER, H., CARDOSO, M.R.A., PUKINSKAS, S., MATOS, D., MELHEM, M. & PUXBAUM, H. 2010. Indoor and outdoor atmospheric fungal spores in the Sao Paulo metropolitan area (Brazil): species and numeric concentrations. *International Journal of Biometeorology* 54, 347–355.
- GORBUSHINA 2007. Life in Darwin's dust: intercontinental transport and survival of microbes in the nineteenth century. *Environmental Microbiology* 9, 2911–2922.
- GRIFFIN, D.W., KELLOGG, C.A., GARRISON, V.H. & SHINN, E.A. 2002. The global transport of dust. *Scientific American* 90, 228–235.
- JAENICKE, R. 2010. Bioaerosole in der Atmosphäre. *Rundgespräche der Kommission für Ökologie* 38, 31–40.
- LIU, G.Y. & NIZET, V. 2009. Color me bad: Microbial pigments as virulence factor. *Trends in Microbiology* 17, 406–413.
- LUOMA, M. & BATTERMAN, S.A. 2001. Characterization of particle emissions from occupant activities in offices. *Indoor Air* 11, 35–48.
- KELLOGG, C.A. & GRIFFIN, D.W. 2006. Aerobiology and the global transport of desert dust. *Trends in Ecology & Evolution* 21, 638–644.
- MARGARITIS, A. & BASSI, A.S. 1991. Principles and biotechnological applications of material ice nucleation. *Critical Reviews in Biotechnology* 11, 277–295.
- MORRIS, C.E., SANDS, D.C., BARDIN, M., JAENICKE, R., VOGEL, B., LEYRONAS, C., ARIYA, P.A. & PSENNER, R. 2008. Microbiology and atmospheric processes: an upcoming era of research in bio-meteorology. *Biogeosciences Discussions* 5, 191–212.
- NAKAMURA, Y., ASADA, C. & SAWADA, T. 2003. Production of antibacterial violet pigment by psychrotropic bacterium RT102 strain. *Biotechnology & Bioprocess Engineering* 8, 37–40.
- REICHERT, K., MATTHIAS-MASER, S. & JAENICKE, R. 2000. Primary biological aerosol particles at the high alpine site Jungfrauoch/Switzerland. Poster, European Aerosol Conference (EEAC2000), Dublin.
- SCHLOSS, P., ALLEN, H.K., KLIMOWICZ, A.K., MLOT, C., GROSS, J.A., SAVENGUSKA, S., MCELLIN, J., CLARDY, J., RUESS, R.W. & HANDELSMAN, J. 2010. Psychrotrophic strain of *Janthinobacterium lividum* from a cold Alaskan soil produce prodigiosin. *DNA & Cell Biology* 29, 533–541.
- THOULET, M. 1908. De l'influence du vent dans le remplissage du lit de l'Océan. *Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des Sciences* 146, 1184–1186.
- TONG, T., LIGHTHART, B. 1997. Solar radiation is shown to select for pigmented bacteria in the ambient outdoor atmosphere. *Photochemistry & Photobiology* 65, 103–106.



Installieren Sie das Gratis-App «ScanIt» auf Ihren iPhone und scannen Sie den QR-Code, um weiterführende Informationen zu erhalten.