

Chimia 49 (1995) 210–213  
 © Neue Schweizerische Chemische Gesellschaft  
 ISSN 0009–4293

# Ökologische Aspekte des Materialschutzes im Bauwesen

Erwin Graf\*

**Abstract.** Ecological assessments of material protection in the building sector imply knowing about the living conditions of potentially destructive organisms, the surroundings and service life of the materials in use and further the influences of these materials on environment and people, from the raw material production till the waste disposal.

## 1. Material im Stoff-Kreislauf

Sämtliche Materialien sind, wenn sie nicht unter sterilen Bedingungen gelagert oder eingesetzt werden, von Organismen umgeben. Auf den Werkstoffoberflächen setzen sich in Abhängigkeit vom Einsatzbereich Mikroorganismen aus der Luft, der Erde oder dem Wasser ab. Sind Material-Zusammensetzung bzw. Fremdstoffablagerung und Umgebungsklima geeignet, so vermehren sich Bakterien, Algen und/oder Pilze. Die Materialien können selbst als Kohlenstoffquelle und/oder als Spurenelement-Donatoren dienen [1]. Es werden z.B. Weichmacher in Kunststofffolien abgebaut, organische Fassadenputze perforiert und Gläser durch Mangan-Oxydation geschwärzt [2]. Bei Bodenheizungen mit Wasserleitungen aus Kunststoffrohren kommt es zu Verstopfungen der Ventile, wenn sulfatreduzierende Bakterien aus dem im Material vorhandenen Schwefel Metallsulfide bilden. Mikroorganismen können mit ihren Ausscheidungsprodukten, wie z.B. mit organischen Säuren und Enzymen, Materialien korrodieren. Betonkühltürme wurden nach Entkalkung des Kühlwassers durch mikrobiogene Oxidation des gelösten Ammoniaks über Nitrit zu Nitrat unter Bildung freier Salpetersäure zerstört. Essentielle Mineralien wie Phosphor, Magnesium, Calcium, Kalium und Schwefel können aus Gestein herausgelöst, Gläser geätzt sowie Eisen und sein Wasserstoff-Schutzfilm – vor allem unter anaeroben Bedin-

gungen – korrodiert werden [3]. Durch den Mikroorganismen-Bewuchs von Stoffen, Materialien und Apparaten können auch arbeits- und wohnhygienische Probleme entstehen, wie sie z.B. von Schneidölen, aus der Klimatechnik und vom Oberflächenbewuchs in Wohnungen bekannt sind.

Eine sichtbare Besiedlung durch Mikroorganismen wird oft nur als ästhetisches Problem angesehen oder gar als Salzausblühung oder Verschmutzung fehlinterpretiert. Aufgrund chemischer Analysen wird die Ursache eines mikrobiogenen Schadens sehr häufig einer rein chemischen Korrosion gleichgesetzt und die Gegenmassnahmen allein auf diese Feststellung abgestimmt. Es handelt sich hier aber um Prozesse, die ihre primäre Ursa-

che in der Vermehrung von Mikroorganismen haben, welche Säuren, Enzyme oder andere Dissimilationsprodukte ausscheiden, welche mit dem Material reagieren können.

Verschiedene Baumaterialien wie z.B. Holz, Dämmstoffe, Kunststofffolien können zusätzlich durch Insekten und je nach Einsatzort durch Nagetiere geschädigt werden. Diese Tiere haben in der Natur die Aufgabe, das Material zu zerkleinern und den Mikroorganismen für den Abbau zugänglich zu machen.

## 2. Biogener Schaden

Unter biogenem Schaden (*Biodeterioration*) wird verstanden, dass ein Werkstoff an seinem Einsatzort die von ihm geforderte Lebensdauer, Funktionalität und/oder Sicherheit nicht mehr gewährleisten kann, weil er vorzeitig durch Organismen in seiner Aufgabe beeinträchtigt oder gar zerstört worden ist. Mit dem Begriff 'Schaden' ist stets die Dimension 'Zeit' verbunden. Aus ökologischen Gründen sollte das Material nach der gewünschten Lebensdauer abbaubar (*Biodegradati-on*) und in den Kreislauf der Stoffe rückführbar sein (vgl. *Kaiser* und *Raschle*, 'Biologischer Materialabbau ...', in diesem Heft).

Damit ein Schaden entstehen kann, müssen die für die Organismen notwendigen Lebensbedingungen bezüglich Nährstoffe, pH, Redoxpotential, Temperatur, relative Luft- bzw. Materialfeuchte erfüllt sein. Algen bedürfen zusätzlich einer bestimmten Lichtmenge. Mikroorganismen



Fig. 1. Abblättern des Farbfilms und Vergrauung des Holzes bedingt durch einen Bewuchs durch Bläuepilze

\*Korrespondenz: Dr. E. Graf  
 Eidgenössische Materialprüfungs- und  
 Forschungsanstalt  
 Unterstrasse 11  
 CH-9001 St. Gallen

überleben sehr tiefe Temperaturen und beginnen ab ca.  $-5^{\circ}$  ihre Entwicklung. Insekten entwickeln sich in der Regel bei Temperaturen  $> 7^{\circ}$  und relativen Luftfeuchtigkeiten  $> 40\%$ . Bei relativen Luftfeuchten  $> 75\%$  bzw. entsprechenden Materialfeuchten wachsen Schimmelpilze. Bei Luftfeuchtigkeiten über  $90\%$  und in Wasser vermehren sich vor allem Bakterien. Wenn nicht durch eine entsprechende Materialwahl die Lebensdauer des Werkstoffs garantiert werden kann, ist u.a. nur durch Einsatz unter trockenen Bedingungen, durch Schutz gegen Befeuchtung, Hydrophobierung, Wasser-Entzug oder aber durch einen temporären oder permanenten Einsatz biozider Stoffe ein mikrobiogener Schaden (Fig. 1–4) zu vermeiden.

### 3. Materialschutz

Ein wirkungsvoller, integrierter Materialschutz setzt die Kenntnis der Lebensbedingungen der verschiedenen Organismen voraus, welche für die Änderung der Materialeigenschaften oder für die Rückführung der Materialien in den natürlichen Kreislauf der Stoffe verantwortlich sind. Aufgrund der Kenntnisse der verschiedenen Zusammenhänge können den Lebewesen die Grundlagen für die Entwicklung entzogen werden.

Während der vergangenen 20 Jahre haben die Anforderungen an den Materialschutz bezüglich human- und ökotoxikologischer Aspekte stetig zugenommen. Ziel ist, dass durch den Menschen, seine Tätigkeiten und Produkte möglichst weder Luft, Wasser, Boden noch ihre Lebewesen beeinträchtigt werden und keine Akkumulation persistenter Stoffe erfolgt. Gegenläufig dazu sind die Forderung nach adäquater Sicherheit, Lebensdauer und Schönheit von Einrichtungen und Konstruktionen. Daraus ergibt sich, dass es ein 'Nullrisiko' nicht gibt, sondern stets zwischen den verschiedenen Risiken abgewogen werden muss.

Gemäss Definition eines Materialschadens hat sich der Schutz primär nach der gewünschten Funktions- und Lebensdauer zu richten. Dabei müssen sich die Massnahmen an den möglichen Folgen eines Schadens orientieren. Die Anforderungen an den Schutz steigen mit zunehmendem Risiko für den Menschen, das aus einem Schaden entstehen kann: von einem ästhetischen Mangel, über eine funktionelle Störung bis hin zu einer Gefahr für Leib und Leben, z.B. bei ungenügender statischer Sicherheit. Unter diesen Aspekten werden die ökologischen Kriterien unter-

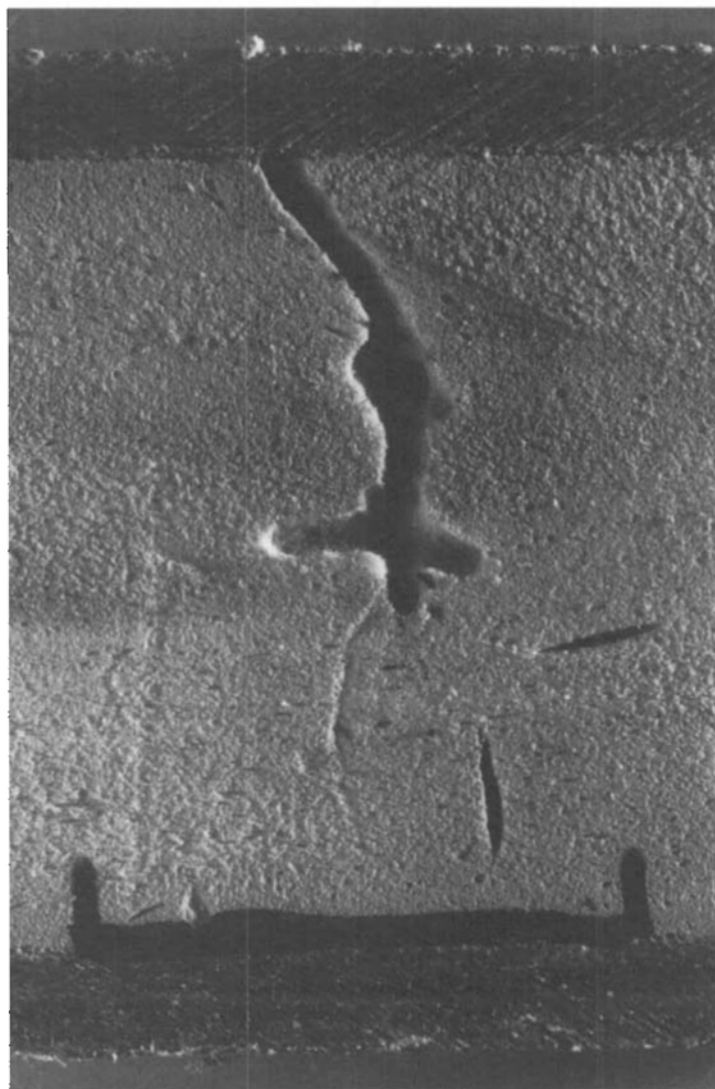


Fig. 2. Durch Insekten angegriffener Dämmstoff

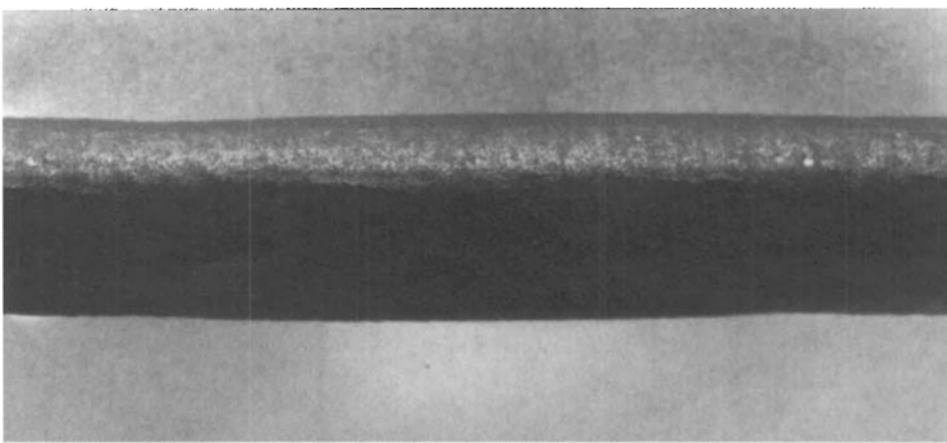


Fig. 3. Ermüdungsbruch an einer Kunststoffolie als Folge eines bakteriellen Abbaus des Weichmachers

schiedlich gewichtet. Während bei der Verhütung ästhetischer Schäden keine nachhaltige Konzession zu Lasten der Umwelt gemacht werden kann, haben bei einer Gefährdung des Menschen durch lebensnotwendige Konstruktionen und Einrichtungen Materialwahl und -schutz Vorrang. Doch auch hier gibt es fließende Übergänge. Ein Stoff kann unter u.U. Menschen auch indirekt durch das Einatmen

kontaminierter Luft oder Trinken von belastetem Wasser Schaden zufügen.

Der Materialschutz erfordert daher ein auf den spezifischen Fall abgestimmtes Massnahmenpaket, welches auf der Beantwortung folgender Fragestellungen basiert:

- Geforderte optimale – nicht maximale – Lebensdauer des Materials, der Konstruktion bzw. der Einrichtung

- Gefährdungspotential durch Organismen unter den vorgesehenen Einsatzbedingungen
- Geforderte Materialeigenschaften (z.B. bezüglich Statik, Witterungs-, Schall-, Lichtschutz, Elastizität, Gewicht, Leitfähigkeit u.a.)
- Materialwahl aufgrund einer Ökobilanzierung über den ganzen Lebenszyklus von Material und Bauprodukt
- Temporärer oder permanenter Schutz
- 'baulich-konstruktive' Massnahmen zum Schutz gegen Feuchte
- Einsatz von Schutzmitteln wie z.B. von Bioziden, Schutzanstrichen, Korrosionsinhibitoren oder andere Oberflächenvergütungen
- Unterhalt resp. Renovierbarkeit des Materials
- Wiederverwertbarkeit des Materials nach Primäreinsatz
- Energetische Verwertbarkeit des Endproduktes am Ende der Nutzungsdauer
- Rückführbarkeit des Materials in den Stoffkreislauf bzw. Art der notwendigen Beseitigung der einzelnen Rohstoffe bzw. des daraus hergestellten Baumaterials

- Einfluss des Materials und der vorgesehenen Schutzmassnahmen auf Mensch (Sicherheit und Humantoxizität) und Umwelt (Ökotoxizität) während Produktion, am Einsatzort, bei der Wiederverwertung und bei der Entsorgung des Materials
- Ökonomische Realisierbarkeit des Schutzkonzepts

Können verschiedene Materialien die am Einsatzort gestellten Bedingungen erfüllen, so liefern umfassende Ökobilanzen (Lebenszyklus-Analysen), welche die ganze Prozesskette von der Rohstoff-Gewinnung, über die Produktion des Materials, die Herstellung des Bauprodukts, die Schutzmassnahmen, über Recycling oder Wiederverwertung bis zur Entsorgung, sowie die verschiedenen Transporte berücksichtigen, eine Entscheidungsgrundlage für Materialwahl und Schutzkonzept. So hat z.B. ein ökologischer Vergleich von Freileitungsmasten aus imprägniertem Holz, armiertem Beton und korrosionsgeschütztem Stahl bei einer angestrebten Standdauer von 35 Jahren ergeben, dass Masten aus druckimprägniertem Holz in einer Regelleitung von 0,4 kV am besten abschneiden [4].

Der Schwerpunkt des Materialschutzes muss heute auf der Detailplanung – Ausführung und nicht auf späteren Korrektur – und den Sanierungsmassnahmen liegen. Es ist primär Aufgabe des Bauprodukte-Herstellers, des Architekten und Bauingenieurs, bei der Planung die Frage nach der geforderten Lebensdauer des Materials, der Einrichtung bzw. des Bauwerks zu stellen und die Risiken in Abhängigkeit verschiedener möglicher Ausführungsarten zu prognostizieren. Bei Kenntnis des Gefährdungspotentials ist durch ein adäquates Schutz- und Baukonzept sowie sachgemässe Ausführung das Risiko, so weit technisch möglich, zu minimieren. Es ist nicht mehr zulässig, sämtliche bei einem Bau anfallenden Probleme mit Hilfe eines chemischen Schutzes zu lösen. Primär gilt es materialtechnische und konstruktive Lösungen zu suchen. Dies bedingt, dass der Hersteller nicht nur die kurzfristige Funktionalität seines Produkts sondern auch dessen Umwelt- und Alterungsverhalten unter praxisrelevanten Bedingungen kennt und den Baufachleuten entsprechende Empfehlungen geben muss. Dies setzt eine enge Zusammenarbeit von Bau- und Werkstoffingenieuren, Biologen, Chemikern und Bauplanern voraus.

Mit Hilfe biologischer und chemischer Untersuchungen wird ein Beitrag zur Beantwortung der oben gestellten Fragen geleistet. Die chemische Analyse des Ma-

terials im Anlieferungszustand dient als Grundlage für den Produkte-Deklarationsraster. Er informiert über die Zusammensetzung des Materials und die mögliche Ausdunstung bzw. Auslaugung von Stoffen. Genormte biologische Prüfungen kombiniert mit Alterungsbeanspruchungen, wie sie z.B. bei Folien für Flachdächer, Geotextilien und bestimmten Dämmstoffen vorgeschrieben sind, geben Auskunft über die Dauerhaftigkeit eines Materials. Durch Biotests begleitende chemische Analysen wird ersichtlich, welche Stoffe (Metaboliten) bei der Alterung des Materials an die Umwelt abgegeben werden. An ihnen können anschliessend die notwendigen human- und ökotoxikologischen Untersuchungen durchgeführt werden.

#### 4. Chemische Schutzmassnahmen

Unter chemischem Schutz muss sowohl der Einsatz wirkstoffhaltiger wie auch aller anderen chemischen Produkte ohne biozide Wirkung verstanden werden, welche die geforderte Gebrauchsdauer eines Materials garantieren. Unabhängig davon, ob die Produkte direkt auf die Organismen wirken (z.B. Biozide) oder indirekt – z.B. durch eine Vergütung der angreifbaren Materialoberfläche durch eine inerte Beschichtung – einen Bewuchs oder eine Vermehrung verhindern, nehmen sie Einfluss auf die Umwelt. Für Synthese, Transport, Applikation und Renovation der Schutzbehandlung wird Energie benötigt. Je nach Stoff kann er Wasser, Luft oder Boden belasten und die in ihnen lebenden Organismen beeinträchtigen. Alle diese Produkte weisen nur eine zeitlich limitierte Schutzwirkung auf. Sie sind biologisch oder photochemisch abbaubar, verdunsten aufgrund ihres Dampfdrucks, sind auslaugbar oder werden auf eine andere Art zerstört. Wird diese begrenzte Wirksamkeit des chemischen Materialschutzes berücksichtigt, so kann sich diese Eigenschaft – falls keine umwelttoxischen Abbauprodukte entstehen – bei der Entsorgung des Materials insofern positiv auswirken, dass am Ende der Gebrauchsdauer kaum relevante Mengen an 'Korrosionsinhibitoren' vorliegen.

Durch Kombination von Alterungs- und Biotests mit chemischen Analysen kann die Grenzkonzentration eines Schutzmittels, seine Verteilung auf oder im Material und die dem Werkstoff angepasste Wirkungsdauer eruiert werden. Ein durch die Abteilungen Biologie und Produktanalytik durchgeführtes Projekt zum temporären Schutz von berindetem Rundholz

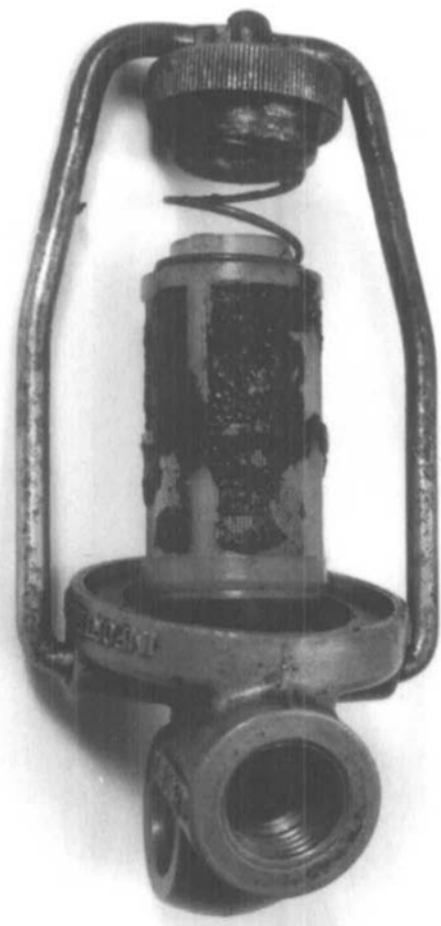


Fig. 4. Durch den Schimmelpilz *Cladosporium resinae* verstopfter Ölfilter eines Dieselfahrzeugs. Vermehrung des Pilzes in der Grenzzone zwischen Treibstoff und Kondenswasser.

im Wald gegen Nutzholzinsekten ergab, dass mit verschiedenen Insektiziden die Wirkung während der geforderten Dauer von sechs Monaten gewährleistet ist und die Rinde nach dem Schälen der Stämme, gemäss den Anforderungen der Luftreinhalteverordnung, ohne spezielle Auflagen wie Restholz verbrannt werden darf (Fig. 5) [5]. Zum Nachweis dieser Wirkstoffe vgl. auch den Beitrag von Rezzonico in diesem Heft ('Analyse von synthetischen Pyrethroiden im Materialschutz'). Chemische Untersuchungen zeigten, dass bei alten Leitungsmasten zum Zeitpunkt der Entsorgung der Wirkstoffgehalt unterhalb der biologischen Wirkungsgrenze liegt [6]. Zur Zeit wird in einem Forschungsprojekt der biologische Abbau von Kunstharzen, welche in Anstrichstoffen als Witterungsschutz des behandelten Materials eingesetzt werden, untersucht und chemisch analytisch verfolgt. Diese Daten sollen der ökologischen Beurteilung verschiedener Harze dienen.

**5. Gefahren einseitig ökologischer Betrachtungen**

Unter dem Druck der Öffentlichkeit können einzelne ökologische Kriterien bei bewährten Produkten isoliert betrachtet und überbewertet werden. Dies kann dazu führen, dass neuen Produkten rasch eine Zulassungsbewilligung oder ein Gütezeichen erteilt wird, ohne dass ihre Wirksamkeit sowie ihre öko- und humantoxikologischen Eigenschaften hinlänglich bekannt sind. Als Beispiel mögen die im Holzschutz bezüglich Wirksamkeit, Human- und Ökotoxikologie umfassend dokumentierten chromhaltigen Schutzmittel dienen, welche geächtet wurden, bzw. für deren Verwendung in Deutschland gar ein Verbot angedroht wurde. Gleichzeitig wurden chromfreie, aber dennoch schwermetallhaltige Produkte ohne umfassende Untersuchungen von Behörden als Alternativen gepriesen. Bei ungenügender Langzeitwirkung neuer Produkte kann dies zu Schaden- und Unfällen führen, den Einsatz ökologisch bedenklicherer Materialien zur Folge haben und die Marktchancen, z.B. des Holzes für bewitterte Konstruktionen, verringern.

Es besteht die Gefahr, dass aus emotionalen Gründen direkt aus der Natur oder über biotechnologische Verfahren mit Organismen gewonnene Stoffe – sogenannte 'Bioprodukte' – ohne umfassende Abklärungen für den Handel zugelassen oder von Konsumenten priorisiert werden. An diese Produkte sind aber die gleichen Massstäbe anzulegen wie an die in-

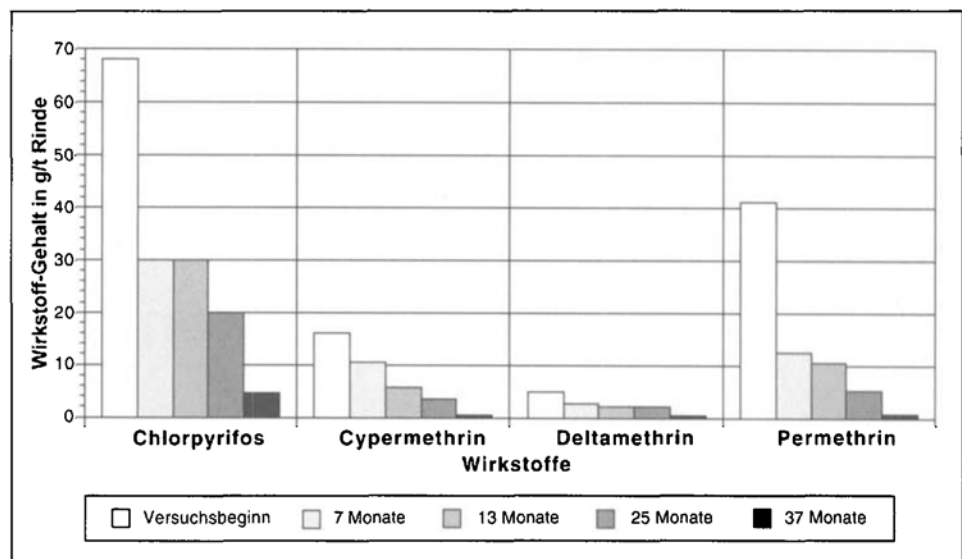


Fig. 5. Abbau insektizider Wirkstoffe während der 25-monatigen Lagerung des berindeten Rundholzes sowie während der anschliessenden 12-monatigen Rindenkompostierung

dustriell synthetisierten Stoffe. Bei beiden Gruppen handelt es sich um chemische Stoffe. Sie sind daher denselben human- und ökotoxikologischen Prüfungen zu unterwerfen. Ein Terpen oder ein aus Holz gewonnenes ätherisches Öl, welches zum Schutz von Wollstoffen gegen Textilinsekten eingesetzt wird, ist nicht weniger human- und ökotoxisch als derselbe Stoff aus einer industriellen Anlage. Unter Umständen können sie toxischer sein, weil sie nicht dieselbe Reinheit aufweisen.

Bei einem Vergleich verschiedener Stoffe kann heute eine Fehlbeurteilung nicht ausgeschlossen werden. Da zu diversen ökotoxikologischen Fragestellungen keine international genormten Prüfverfahren vorliegen, bestehen parallel oft mehrere Methoden mit unterschiedlichen Anforderungen. Zum Beispiel können Daten zur Fischtoxizität aus Versuchen mit unterschiedlichen Fischarten mit verschiedenen Prüftemperaturen und -Inkubationszeiten stammen. Diese Resultate beeinflussen wiederum die Gewichtungen bei Ökobilanzen.

Der Einsatz von gut abbaubaren Schutzmitteln, welche im Pflanzenschutz sinnvoll sind – da sie dort nur Tage bis Wochen wirksam sein müssen – kann im Materialschutz häufigere Unterhaltsarbeiten und Renovationen und damit gesamthaft einen höheren Stoffeinsatz bedingen, als wenn der Nutzungsdauer des Materials angepasste, persistenterere Wirkstoffe eingesetzt werden.

Eine generelle Einführung der Produkthaftpflicht des Herstellers, des Architekten und Bauunternehmers kann einen vermehrten Einsatz von Schutzmitteln zur Folge haben, um mögliche Risiken zu minimieren. Andererseits erfordert

ein differenzierter integrierter Materialschutz, dass weniger Schutzmittel eingesetzt werden [7]. Dies führt zu einem geringeren Marktvolumen und zu höheren Schutzmittelpreisen, da die hohen Entwicklungskosten gedeckt werden müssen. Daraus kann eine aus ökologischer Sicht unerwünschte Konzentrierung des Schutzmittelangebots auf einige wenige Anbieter und damit eine Einengung des Schutzmittelspektrums erfolgen. Dieses Phänomen zeigt sich heute schon im Bereich der Kulturgüter-Konservierung und -Restaurierung, wo die Weiterentwicklung ökologischer und objektschonender Schutzverfahren auf die staatlich finanzierte Forschung angewiesen ist.

Eingegangen am 6. März 1995

[1] J.P. Kaiser, P. Raschle, 'Werkstoffwissenschaften und Bausanierung', Kontakt Studium, Band 420, Ed. F.H. Wittmann, Expert Verlag, Ehningen, 1993, Vol. 1, S. 228.  
 [2] J.P. Kaiser, S. Trümpler, P. Raschle, *Werkstoffe und Korrosion* **1994**, 45, 125.  
 [3] E. Graf, *Material und Technik* **1976**, 2, 59.  
 [4] K. Richter, T. Künniger, 'Ökologischer Vergleich von Freileitungsmasten aus imprägniertem Holz, armiertem Beton und Stahl', Forschungsbericht, Abteilung Holz, EMPA-Dübendorf, 1995, im Druck.  
 [5] E. Graf, P. Manser, S. Rezzonico, *Forstschutz-Bulletin* **1994**, 3/93-1/94, 2.  
 [6] E. Graf, P. Manser, S. Rezzonico, B. Zgraggen, 'Second International Symposium on Wood Preservation – The Challenge Safty-Environment', 8./9. Febr. 1993, Cannes-Mandelieu, 1993, Ed. G. Ozanne, International Research Group on wood preservation, Secretariat, Stockholm, Doc No 93/50001, 283.  
 [7] Graf E., *Holz als Roh- und Werkstoff* **1989**, 47, 383.