

REACTIVE CITY

EINE PROAKTIVE STADT

OHNE BIOZIDE

BIOZIDHALTIGE
BAUSTOFFE
IN URBANEN GEBIETEN

WAS SIND DIE
ALTERNATIVEN
AUF STADTEBENE?

Interreg



Cofinancé par
l'Union Européenne
Kofinanziert von
der Europäischen Union

Rhin Supérieur | Oberrhein

Institut Terre & Environnement
de Strasbourg | ITES | UMR 7063
de l'Université de Strasbourg & GRES & ENGEES

Laboratoire Sage
Sociétés, acteurs, gouvernement en Europe
Université de Strasbourg



INSA INSTITUT NATIONAL
DES SCIENCES
APPLIQUÉES
STRASBOURG

universität freiburg

R
P TU
Rheinland-Pfälzische
Technische Universität
Kaiserslautern
Landau

→ INHALT

1. BESTANDSAUFNAHME

Die spezifischen Umweltschadstoffe	04
Was sind urbane Biozide und wo werden sie eingesetzt ?	06
Eine späte und allmähliche Erkenntnis	06
Mobile Moleküle, die teilweise zu Transformationsprodukten abgebaut werden	07
Moleküle, die für die urbane Umwelt toxisch sind	08

2. HANDLUNGSANSÄTZE

Quantifizierung der Biozidemissionen zur Weiterentwicklung von Projekten zur „durchlässigen Stadt“	09
Mobilisierung einer komplexen Akteurskette für «No-Regret-Lösungen»	12
Differenzierung von Maßnahmen nach ihrer Gesamteffektivität	14
„Rot“: Zu vermeidende Lösungsansätze	14
„Gelb“: Übergangsmaßnahmen	15
„Grün“: Maßnahmen für biozidfreie Fassaden	16

3. DAS PROJEKT REACTIVECITY

Perspektivwechsel für eine biozidfreie Stadt	18
--	----

4. LITERATURVERZEICHNIS 21



Contact : G. Imfeld, S. Payraudeau und F. Kögler,
Institut Terre et Environnement de Strasbourg (ITES)



WAS SIND EIGENTLICH "URBANE BIOZIDE"?

Urbane Biozide sind chemische Substanzen, die unter anderem in Fassadenfarben, Putzen oder Baustoffen enthalten sind, um die Ausbreitung schädlicher Organismen (Schimmel, Algen, Pilze) zu verhindern. Unsichtbar, aber allgegenwärtig in der bebauten Umwelt, werden diese Stoffe regelmäßig durch Regen ausgewaschen und gelangen so in Böden und urbane Gewässer. Damit bilden sie eine erstzunehmende Form diffuser Verschmutzung – kaum sichtbar, schwer zu beziffern und schwierig zu kontrollieren.

Doch im urbanen Raum finden sich Biozide nicht nur an Fassaden, sondern auch in Pestiziden sowie in Haushaltsprodukten, etwa in Desinfektionsmitteln oder als Konservierungsstoffe in Reinigungs- und Waschmitteln.



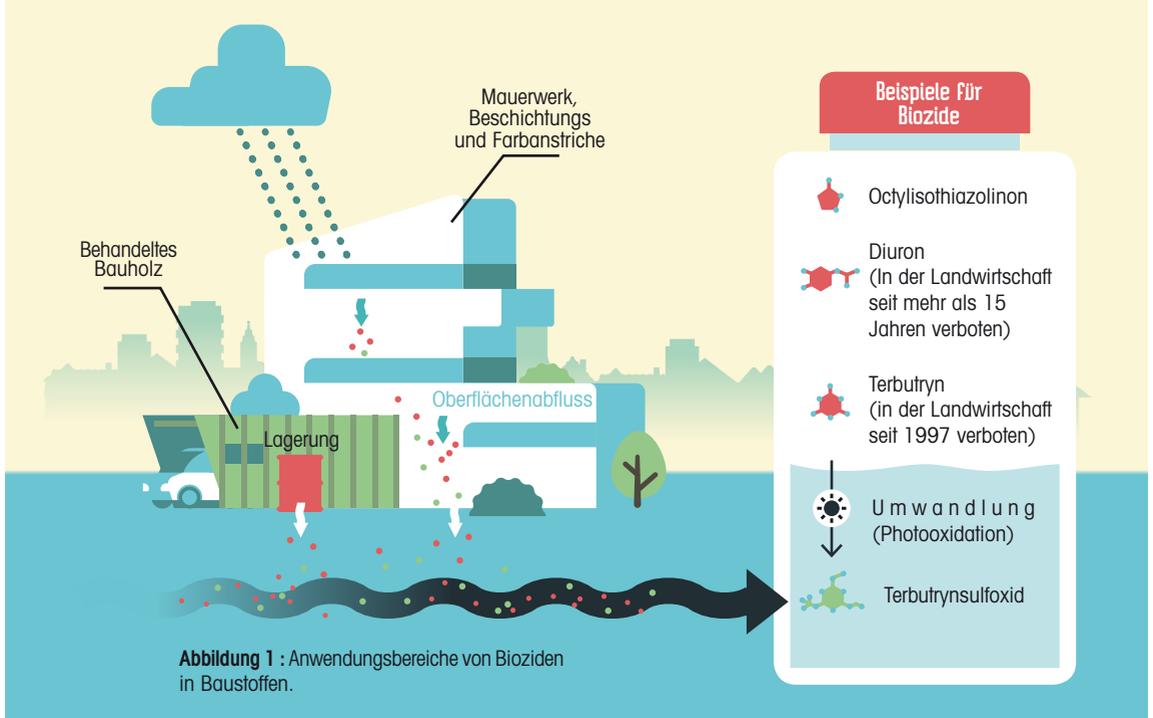
URBANE BIOZIDE UND DER KLIMAWANDEL – WIE HÄNGT DAS ZUSAMMEN?

Der urbane Raum ist besonders vom Klimawandel betroffen: Versiegelte Flächen und fehlendes Grün heizen Städte bei Hitze stark auf. Gleichzeitig fließt Regenwasser, vor allem bei Starkregen, schnell ab – es trägt weder zur Grundwasserneubildung bei noch kühlt es durch Verdunstung.

Die Konzepte der Schwammstadt und der durchlässigen Stadt reagieren auf diese Herausforderungen: Städte sollen Wasser aufnehmen, speichern und bei Bedarf wieder abgeben – wie ein Schwamm. Wichtige Maßnahmen hierbei sind mehr Baumbestand sowie Grün- und Wasserflächen, die Einrichtung von Rückhalte- und Überflutungsflächen sowie die Entsiegelung und anderweitige Förderung der Versickerung von Regenwasser. All diese stadtplanerischen Maßnahmen zielen darauf ab, die Versickerung, Speicherung und Wiederverwendung von Regenwasser zu maximieren, um Hochwasserrisiken zu minimieren, die Grundwasserspiegel aufzufüllen und das städtische Mikroklima zu verbessern.

Allerdings ist der urbane Raum besonders mit Spurenstoffen belastet, etwa aus Verkehr, Haushaltschemikalien, Pestiziden oder den in Fassadenfarben enthaltenen Bioziden, die durch Regenwasser in die Umwelt eingetragen werden.

Da schon sehr geringe Mengen dieser Stoffe schädlich sein können, sind das Vorsorgeprinzip und der Schutz der Wasserressourcen entscheidend. Nachhaltige und zukunftsfähige Städte lassen sich daher in erster Linie mit Maßnahmen direkt an der Quelle umsetzen – etwa durch den Verzicht auf Biozide in Fassadenfarben.



➔ 1. BESTANDSAUFNAHME

Die spezifischen Umweltschadstoffe

Je nach Art des urbanen Schadstoffs kommt es nicht nur auf die Menge der in die Umwelt abgegebenen Substanzen an, sondern auch auf deren Toxizität. Im Gegensatz zu industriellen Schadstoffen (Heizöl, chemische Abfälle usw.) sind urbane Biozide in geringen Konzentrationen vorzufinden, sind dafür aber allgegenwärtig und beständig in der Umwelt vorhanden.

Die Biozide, die häufig in Baustoffen eingesetzt werden, wandeln sich unter Sonneneinstrahlung in mobile Substanzen um und können bei Regen freigesetzt werden. Aufgrund ihrer potenziellen und oft nachgewiesenen schädlichen Auswirkungen auf die Umwelt

ist es notwendig, ganzheitliche Strategien für deren nachhaltiges Management umzusetzen.

In diesem Zusammenhang besitzen die in Baustoffen enthaltenen Biozide wie Terbutryn oder Diuron selbst in geringer Konzentration ein erhebliches ökotoxisches Potenzial in Oberflächengewässern. Biozide und ihre Transformationsprodukte können über lange Zeiträume in Böden, Wasser und Sedimenten urbaner Ökosysteme verbleiben. Die chemische Umwandlung dieser Stoffe führt nicht zwangsläufig zu deren vollständigen Abbau, sondern vielmehr zu Zwischenprodukten, die ebenso oder sogar stärker toxisch als die ursprünglichen Verbindungen

sein können. Ihre Langlebigkeit in der Umwelt kann Risiken für die menschliche Gesundheit darstellen, insbesondere über kontaminiertes Trinkwasser oder Lebensmittel. Da die Toxizität von Bioziden und ihren Transformationsprodukten weitgehend unbekannt, unterstreicht dies die Notwendigkeit der konsequenten Anwendung des Vorsorgeprinzips („No Regret-Maßnahmen“).

Die Hauptmotivation für diesen Artikel ist der Befund, dass die Frage urbaner Biozide in praxisorientierten Leitfäden nach wie vor weitgehend vernachlässigt wird,

beispielsweise im aktuellen Leitfaden, Nachhaltiges Regenwassermanagement – Bestandsorientierte Bewirtschaftung‘ (ASTE, 2024).

Die globale Reduzierung von Schadstoffemissionen, unabhängig von Art oder Herkunft, muss ganzheitlich angegangen werden. Dabei sollte der systematische Einsatz von Bioziden kritisch hinterfragt und „Null-Biozid-Szenarien“ in Betracht gezogen und ihre konkrete Umsetzung bewertet werden. Die Kosten-Nutzen-Bewertung beim Bau und der Instandhaltung von Gebäuden

➔ DAS WICHTIGSTE AUF EINEN BLICK

1/ Quellen und Auswirkungen von Bioziden. Städtische Biozide, die in Baustoffen wie Fassadenfarben enthalten sind, tragen zur diffusen und dauerhaften Kontamination von Böden und Gewässern bei, wobei die Terbutryn-Konzentrationen am Fuß von Fassaden die ökotoxikologischen Grenzwerte um das bis zu 20-fache überschreiten können.

2/ Retention und Akkumulation. Im städtischen Raum halten die Böden mehr als 75 % der Biozide und ihrer Umwandlungsprodukte zurück, sie stellen aber auch eine langfristige Kontaminationsquelle dar, wobei ein Abbau auf die ersten Meter des Bodens begrenzt ist.

3/ Vorbeugend handeln. Ein, Null-Biozid'-Szenario hätte den Vorteil, Emissionen zu vermeiden, zumal 42 % der in urbane Böden eingebrachten Biozide auch nach 20 Jahren noch bestehen. Dies unterstreicht die Bedeutung eines frühzeitigen Handelns.

4/ Technische Lösungen: Der schnelle Umstieg auf biozidfreie Farben und die Entkopplung des Regenwasserabflusses von Fassaden von der Kanalisation erscheinen als Schlüsselmaßnahmen zur Begrenzung der Verschmutzung und stehen im Einklang mit dem Konzept der Schwammstadt.

5/ Mobilisierung der Akteurskette. Entscheidungsträger, Architekten, Maler, Hersteller und Bewohner können alle eine wesentliche Rolle bei der Einführung alternativer Materialien wie etwa Mineralfarbe spielen. Dies erfordert jedoch Aufklärungs- und Schulungsmaßnahmen.

6/ Laufende Projekte. Das Projekt ReactiveCity (2023-2027) weitet die Untersuchung von Bioziden auf die Ebene der Stadt aus und bezieht weitere Spurenstoffe (PFAS, Medikamente, Bakterizide) sowie den Abwasserpfad mit ein, um, im Einklang mit dem europäischen Green Deal, zukunftsfähige und nachhaltige Städte zu fördern.

sollte zudem die bislang nur selten einbezogenen externen Umweltkosten berücksichtigen.

Wenn sich eine potenziell toxische Schadstoffquelle zu geringen Kosten durch Alternativen – etwa Mineralfarben für Fassaden – beseitigen lässt und damit zu einer nachhaltigeren Umwelt beigetragen wird, warum sollte man es dann nicht tun?

Was sind urbane Biozide und wo werden sie eingesetzt ?

Biozide sind Wirkstoffe, die dazu bestimmt sind, durch chemische oder biologische Einwirkungen Zielorganismen zu töten, abzuschrecken oder unschädlich zu machen, ihre Einwirkung zu verhindern oder sie auf verschiedene Weise zu bekämpfen (Europäisches Parlament und Rat, 1998).

Im Baustoffbereich können Biozide mehrere Funktionen erfüllen: Sicherstellen einer längeren Lagerstabilität vor der Verwendung (Abbildung 1), Schutz von Oberflächenmaterialien wie Farben, Putzen, Spachtelmassen oder Wandklebern (Abbildung 1), Schutz des Bauholzes (Abbildung 1) sowie von Mauerwerk- oder Verbundwerkstoffen (Abbildung 1) vor dem Einfluss von Insekten, Mikroorganismen oder Algen, die das Aussehen von Fassaden beeinträchtigen können (Abbildung 1) (Europäisches Parlament und Rat, 2012)

Eine späte und allmähliche Erkenntnis

Die Frage nach den Umweltrisiken von Bioziden in Baustoffen wurde erstmals Ende der 1970er Jahre aufgeworfen, zunächst für die Behandlung von Holz (Grant und Dobbs, 1977), dann in den 2000er Jahren speziell für Fassaden und Putze, vor allem von

Schweizer Forschern. Letztere haben die Mobilität dieser Biozide charakterisiert und vorhergesagt, von ihrem Anwendungsort an den Fassaden über Regenwasser- und Abwassersysteme bis hin zu Böden und städtischen Gewässern (Gereke et al., 2002, Burkardt et al., 2009).

Die Hauptschwierigkeit bestand damals darin, den Beitrag des Einsatzes im urbanen Raum zur Gesamtverschmutzung mit diesen Bioziden abzuschätzen, von denen einige Moleküle, wie Diuron und Terbutryn (Abbildung 1d), noch im großen Ausmaß in der Landwirtschaft eingesetzt wurden. Mit dem Verbot dieser landwirtschaftlichen Nutzung wurde der städtische Beitrag zur Kontamination von sich am Stadtrand befindlichen Fließgewässern offensichtlicher. Es ist bemerkenswert, dass, obwohl das Verbot im landwirtschaftlichen Kontext durch Bedenken hinsichtlich der menschlichen Gesundheit und der Umwelt motiviert war, ähnliche Überlegungen für Baustoffe in städtischen Gebieten nicht angestellt wurden.

Mehrere Studien haben das Ausmaß des Problems auf der Ebene von Stadtvierteln und sogar Metropolen aufgezeigt. Im Jahr 2016 wurden bei Untersuchungen der Qualität des Regen- und Grundwassers in einem Stadtteil der Stadt Freiburg im Breisgau in Deutschland Biozide aus Außenputzen und -farben nachgewiesen. Die festgestellten Konzentrationen von einigen Dutzend Nanogramm pro Liter erreichten sogar den Trinkwassergrenzwert, d. h. 100 Nanogramm pro Liter im Regenwasser für Terbutryn und Diuron, auch wurde ein Eintrag in das Grundwasser nachgewiesen (Hensen et al., 2018).

Das Sammeln von Fassadenabfluss während der Regenfälle bestätigte den Ursprung dieser Verschmutzung und

unterstrich die Notwendigkeit, diese direkt von den Fassaden stammenden Transfer zu verstehen, vorherzusagen und zu begrenzen. Parallel dazu durchgeführte Arbeiten des Laboratoire Eau Environnement et Systèmes Urbains (LEESU) haben ebenfalls die Vielfalt der Kontamination von Regenwasser mit Bioziden aus Baustoffen in der Metropole Paris aufgedeckt (Paijens, 2019).

Das allmähliche Bewusstsein für diese Schadstoffquelle hat deutlich gemacht, dass die Übertragungsmechanismen dieser Biozide aus Fassaden, ihr Abbau und ihre Persistenz sowie ihre Auswirkungen auf die städtischen Ökosysteme nur unzureichend bekannt sind. Weiterhin hat sie auch die geringe Zahl und die Unzulänglichkeit der verfügbaren Diagnoseinstrumente deutlich gemacht.

In diesem Zusammenhang wurde das deutsch-französische Interreg-Projekt NAVEBGO «Reduzierung des Biozideintrags in das Grundwasser am Oberrhein» (2019-2022) initiiert. Dieses Projekt, das in Zusammenarbeit mit drei Partnerkörperschaften - Eurometropole Straßburg, Freiburg und Landau - konzipiert wurde, zielte darauf ab, das Verständnis, die Charakterisierung und die Vorhersage des Verbleibs von Bioziden sowie deren gesellschaftliche Nutzung zu verbessern. Seine Ziele waren die Erstellung regionaler Referenzen zur Sensibilisierung von Baufachleuten und zur Beeinflussung von Stadtplanungsvorschriften in der Oberrheinregion. Die wichtigsten Erkenntnisse, sowohl im Hinblick auf das Verständnis des Verbleibs von Bioziden, als auch auf die Empfehlungen für die Stadtplanung, werden in den folgenden Abschnitten zusammengefasst.

Mobile Moleküle, die teilweise zu Transformationsprodukten abgebaut werden

Bei Regenereignissen können in Baustoffen wie etwa Fassadenfarben enthaltende Biozidmoleküle mobilisiert werden, was im Laufe der Zeit zu konstanten Emissionen dieser Stoffe in den Boden und in die aquatische Umwelt führt (Abbildung 2). Studien über den Abbau von Bioziden liefern wertvolle Informationen über den Verbleib von Bioziden in der Umwelt. Der Abbau von Bioziden kann relativ langsam erfolgen, was ihre Anreicherung in der Umwelt begünstigt. Beispielsweise wurde die biologische Abbaubarkeit des Herbizids Terbutryn, das häufig in Farben und Beschichtungen für Außenfassaden verwendet wird, im Labor untersucht. Dazu wurde Terbutryn Proben von Boden, Sedimenten eines Regenwasserrückhaltebeckens und Klärschlamm zugesetzt (Abbildung 2). Nach 100 Tagen war nur etwa die Hälfte des Terbutryns biologisch abgebaut worden, was auf eine potenzielle Persistenz dieses Moleküls und damit auf sein Gefährdungspotenzial in der Umwelt hindeutet.

Darüber hinaus können die Transformationsprodukte von Bioziden (Abbildung 2), die durch den photochemischen Abbau an Fassaden unter Sonneneinstrahlung entstehen, in größeren Mengen freigesetzt werden als die ursprünglichen Biozide. Zu den wichtigsten Abbauwegen von Bioziden in der Umwelt gehören der biologische Abbau durch Mikroorganismen und der photochemische Abbau. Versuche zur Photoabbaubarkeit von Terbutryn, die in einer Testkammer unter konstanter künstlicher Sonneneinstrahlung durchgeführt wurden, haben gezeigt, dass der Photoabbau in der Umwelt deutlich schneller abläuft als der biologische Abbau

(Junginger et al., 2022). Beim Abbau von Terbutryn entstehen verschiedene Umwandlungsprodukte. Beim biologischen Abbau entstehen hauptsächlich Terbutrynsulfoxid und Terbutryn-2-Hydroxy, während beim photochemischen Abbau eine Vielzahl verschiedener Produkte entstehen kann (Abbildung 2) (Junginger et al. 2023). Diese oft wenig erforschten und wenig bekannten Umwandlungsprodukte können auch schädliche Auswirkungen auf Mikroorganismen und Wasserorganismen haben, sich in der Umwelt anreichern und das Grundwasser kontaminieren (Abbildung 2).

Moleküle, die für die urbane Umwelt toxisch sind

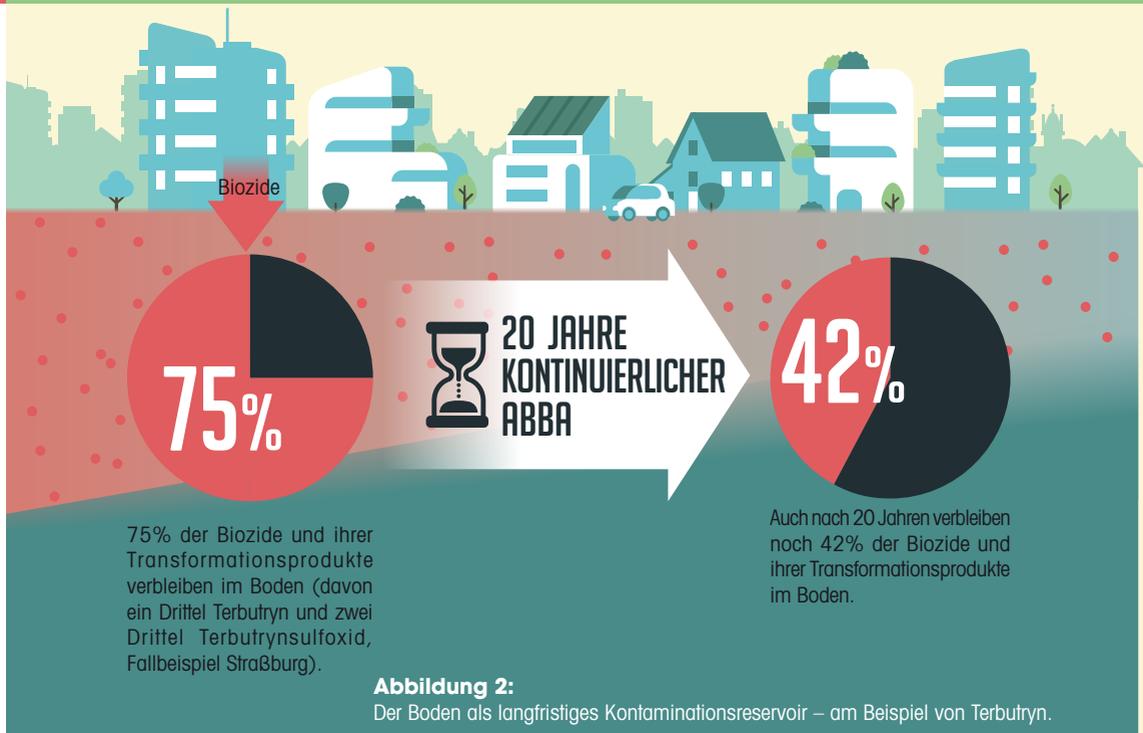
In Baustoffen enthaltene Biozide wie Terbutryn sollen die Photosynthese hemmen und das Wachstum von Pilzen einschränken. Ihre Hauptfunktion besteht darin, das Wachstum von autotrophen Organismen (hauptsächlich Algen und Pflanzen) sowie von Pilzen auf behandelten Oberflächen wie Fassaden, Dächern oder Bodenbelägen zu verhindern. Terbutryn beispielsweise wirkt, indem es den photosynthetischen Prozess blockiert und so die Umwandlung von Sonnenenergie in chemische Energie stört, wodurch das Wachstum und die Reproduktion der Zielorganismen gebremst werden.

Dieser Wirkungsmechanismus kann jedoch auch Nichtzielorganismen, insbesondere im Boden und in den umliegenden Gewässern, beeinträchtigen. Bei Regenfällen werden Biozide von Baustoffen durch Auswaschung in die umliegenden aquatischen Ökosysteme gespült. Wasserorganismen wie Mikroalgen und Wasserpflanzen, die für die Primärproduktion in diesen Lebensräumen unerlässlich sind, können dadurch beeinträchtigt werden, wodurch

die Nahrungsketten gestört werden.

Die Toxizität jedes Stoffes wurde durch ökotoxikologische Tests bewertet und die Konzentration ohne mutmaßliche Auswirkungen auf die Umwelt (PNEC, Predicted No Effect Concentration) wurde abgeschätzt. Für Terbutryn ist der PNEC-Wert mit 0,034 µg/L besonders niedrig. Diese hohe Umwelttoxizität, gepaart mit seiner Persistenz, hat sein Verbot in der landwirtschaftlichen Nutzung begründet. Dennoch liegen die gemessenen Terbutryn-Konzentrationen am Fuß von Fassaden 10- bis 100-mal höher als dieser PNEC-Wert (Junginger et al., 2023) und bis zu 10-mal höher in Regenwassersystemen (Mulden und Rückhaltebecken), was die potenziellen Auswirkungen auf Böden und die damit verbundenen städtischen Gewässer unterstreicht (Sereni et al., 2024). Im Vergleich dazu weisen biozidfreie Farben nur geringe oder keine Auswirkungen auf (NAVEBGO, 2022).

Darüber hinaus können Biozide auch Bodenorganismen, insbesondere Mikroorganismen, beeinträchtigen, die eine entscheidende Rolle bei der Zersetzung organischer Stoffe und im Nährstoffkreislauf spielen. Die potenziellen Auswirkungen von Bioziden auf diese Funktionen, wie den Nährstoffkreislauf, sind noch weitgehend unbekannt. So kann eine langfristige Exposition gegenüber diesen Chemikalien das ökologische Gleichgewicht von Böden und Gewässern stören, die biologische Vielfalt gefährden, ökologische Funktionen (wie Wasserreinigung und Nährstoffregulierung) beeinträchtigen, die Qualität von Ökosystemen verschlechtern und langfristig die menschliche Gesundheit beeinträchtigen.



→ 2. HANDLUNGSANSÄTZE

Quantifizierung der Biozidemissionen zur Weiterentwicklung von Projekten zur „durchlässigen Stadt“

Biozide können im Boden persistent sein und gleichzeitig Transformationsprodukte bilden, sobald sie auf Fassaden aufgebracht werden. Die Mobilität von Bioziden und deren Transformationsprodukten führt zu einer weit verbreiteten Kontamination von Böden und städtischen Wassersystemen. Um Anpassungspläne von Städten zu unterstützen, ist es von entscheidender Bedeutung, den Grad des Austrags dieser Moleküle für bereits gebaute Stadtviertel quantifizieren zu können und den Austrag in neuen Stadtvierteln in Abhängigkeit von technischen und architektonischen Entscheidungen vorhersagen zu können. Es gibt zwei **kom-**

plementäre Ansätze, um diesen Austrag abzuschätzen:

Der erste Ansatz beruht auf der Entwicklung von Referenzwerten für Austragsraten, die pro Hektar oder pro m² Fassadenfläche ausgedrückt werden, um deren Verwendung zu erleichtern. Diese Erstellung von Referenzen erfordert eine Instrumentierung über einige Monate auf der Ebene eines Stadtviertels, um eine zeitliche und räumliche Repräsentativität zu gewährleisten (Sereni et al., 2024). Diese Instrumentierung erfordert, dass Auslässe eines Regenwassernetzes mit einem Durchflussmesser und einem

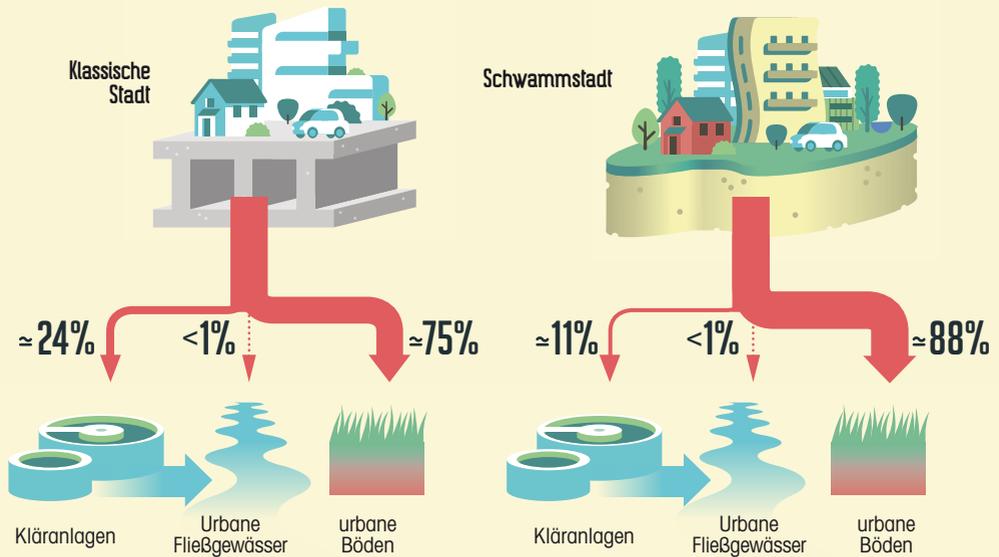


Abbildung 3: Anteile der Biozideinleitungen am Beispiel von Terbutryn in Kläranlagen, urbane Oberflächengewässer und urbane Böden in der gegenwärtigen Situation und in einem Szenario mit optimierter Versickerung an Hauswand und Fassadenfuß (Schwammstadt).

automatischen Probennehmer, der während des Regens durchflussgesteuert ist, ausgestattet sind. Diese Ausrüstung kann von einer ausreichend großen Gemeinde, die über eine Messabteilung verfügt, oder von einem Ingenieurbüro installiert werden.

Die Hauptkosten für die Messung von Bioziden sind jedoch die Kosten für die Analytik, weshalb die erstellten Referenzen in erster Näherung besonders nützlich sind. Ein Bruchteil der ausgetragenen Biozide kann in größerem Maßstab in Kläranlagen für Mischwassersysteme gemessen werden (Paijens, 2019), aber dies stellt nur einen Teil des Austrags dar, da diese Methode weder Regenwassereinleitungen noch Infiltration einbezieht. Da dieses Thema noch neu ist, stehen den kommunalen Diensten nur wenige Referenzen zur Verfügung.

Im Rahmen des NAVEBGO-Projekts wurden diese Referenzen in Form von Praxisblättern erstellt (NAVEBGO, 2022). Beispielsweise setzt eine Fassade, die mit einem terbutrynhaltigen Produkt gestrichen wurde, jedes Jahr fast konstant etwa 1% der ursprünglichen Masse dieses Biozids frei. Bei einer im Durchschnitt alle 10 bis 15 Jahre stattfindenden Fassadenrenovierung bedeutet dies, dass etwa 10 bis 15% der ursprünglichen Biozidmenge am Fassadenfuß abgeführt werden und anschließend in Böden sowie städtische Entwässerungssysteme gelangen. Die damit verbundenen Konzentrationen reichen aus, um die städtischen Ökosysteme nachhaltig zu beeinträchtigen. Wie in Abbildung 2 dargestellt besteht dieser Biozidaustrag aus Fassaden zu einem Drittel aus nicht abgebautem Terbutryn und zu zwei Dritteln aus Transformationsprodukten, deren Ökotoxizität weitgehend unbekannt ist.

Der zweite Ansatz beruht auf der Modellierung mithilfe von Berechnungssoftware, die es ermöglicht, den reaktiven Transport von Bioziden von Fassaden in die wichtigsten Umweltkompartimente wie Böden, Flüsse und städtisches Grundwasser vorherzusagen. Diese Modelle ermöglichen es, schwer messbare Biozidflüsse abzuschätzen, wie z. B. ihren Verbleib in den obersten Bodenschichten. Sie ermöglichen auch das Testen verschiedener architektonischer Szenarien oder von verschiedenen Systemen der Regenwasserbewirtschaftung, insbesondere in Abhängigkeit von Klimaprojektionen.

Diese beiden oft miteinander kombinierten Ansätze ergänzen sich daher (Sereni et al., 2024). Im Rahmen von NAVEBGO wurden zwei Werkzeuge zur Vorhersage des Verbleibs von Bioziden entwickelt und angepasst. Das erste, FReWaB-PLUS, ist ein einfach zu bedienendes Werkzeug zur Schätzung der Auswaschung von Bioziden im städtischen Raum; es ist online zugänglich: www.biozidauswaschung.de (Bork et al., 2022). Das zweite Modell, COMLEAM (Burkardt et al., 2020), oder eine modifizierte Version unter Einbeziehung von Transformationsprodukten (Sereni et al., 2024), das im NAVEBGO-Projekt entwickelt wurde, kann ebenfalls bei der Planung von Maßnahmen zur Verringerung der Biozidauswaschung in bestehenden Stadtvierteln oder auf der Ebene ganzer Städte helfen (Sereni et al., zur Veröffentlichung bei Environmental Pollution eingereicht).

Zur Quantifizierung der Emissionen dieser Biozide und ihrer Transformationsprodukte (TP) auf **Stadtebene wurde ein reaktives Transportmodell entwickelt**, in das

GIS-Daten und Informationen der Stadtverwaltungen einfließen. In Straßburg (79 km²) belaufen sich die jährlichen Emissionen von Terbutryn und seinem wichtigsten Umwandlungsprodukt (Terbutrynsulfoxid) auf 1,4 kg (177 mg ha⁻¹). Die Abflusskonzentrationen überschreiten die ökotoxikologischen Grenzwerte in der Nähe von Fassaden um das 10- bis 20-fache und an den Ausläufen von Stadtvierteln um das 1,5- bis 3-fache. Etwa 76 % der Biozide infiltrieren in den Boden, wobei in einem «Schwammstadt»-Infiltrationsszenario sogar 89 % erreicht werden (Abb. 3)

Der Abbau von Bioziden im Oberboden (0-1 m) bleibt jedoch begrenzt, was zu einer jahrzehntelangen Akkumulation und dem Risiko der Auswaschung in das Grundwasser führt. In einem «Null-Biozid-Szenario» bleiben 42 % der versickerten Biozide auch nach 20 Jahren noch bestehen, obwohl die Stoffflüsse abnehmen. Diese Studie erweitert die Anwendung eines reaktiven Transportmodells auf den städtischen Maßstab aus und zeigt, dass städtische Böden etwa 75 % der Biozide und ihrer Transformationsprodukte aus Gebäudefassaden zurückhalten aber gleichzeitig als langfristige Schadstoffquelle fungieren, wobei die Biozidkonzentrationen an der Grenzfläche zwischen Fassade und Boden die ökotoxikologischen Grenzwerte überschreiten. Der Übergang zu biozidfreien Farben und die Trennung des Fassadenabflusses von der Kanalisation sind Schlüsselmaßnahmen zur Abschwächung der Verschmutzung, obwohl die Remediation der städtischen Böden und die Verringerung der Biozidkontamination selbst in einem «Null-Biozid»-Szenario Jahrzehnte in Anspruch nimmt, was die Dringlichkeit sofortiger Maßnahmen unterstreicht.



Abbildung 4:

Potentielle Hebel zur Veränderung der Praktiken im Bauwesen und im Gebäudemanagement

Mobilisierung einer komplexen Akteurskette für „No-Regret-Lösungen“

Die Frage der Fassadenbehandlung geht weit über Maler und Farbenhersteller hinaus. Sie beinhaltet eine komplexe Akteurskette, die von den Herstellern der Farbkomponenten über Kommunen, Stadtplaner, Architekten und Bewohner bis hin zu den Bauherren reicht.

In dieser komplexen Welt gibt es ein System im System, das einen starken Einfluss auf die von Architekten und Malern getroffenen Entscheidungen zur Behandlung und zum Schutz von Fassaden ausübt. Es handelt sich um ein industrielles System, das in Branchen organisiert ist, die sich der Herstellung und Verbreitung von «schlüsselfertigen» Verfahren verschrieben haben, und das über routinemäßige Vorgaben schließlich eine Norm definiert, die sich den Akteuren wie selbstverständlich «aufdrängt». Dieses System begünstigt heute aus

verschiedenen Gründen Produkte auf synthetischer Basis, die einem ständigen technikorientierten Innovationsansatz folgen und verschiedenste Bestandteile (Biozide, Mikroplastik, Nanopartikel...) enthalten, deren Verbreitung in der Umwelt und deren langfristige Auswirkungen besorgniserregend sind.

Wir sind der Ansicht, dass diese Entscheidungen – solange das industrielle Systems nicht weiterentwickelt wird – von einer Reihe von Akteuren im Alltag kritisch hinterfragt werden sollten. Dies würde es ermöglichen, einen spürbaren Wandel der Praktiken auf regionaler Ebene anzustoßen. Für die Entwicklung hin zu biozidfreien Städten sind insbesondere die folgenden Akteure von entscheidender Bedeutung:

- **Entscheidungsträger des städtischen Raums:** Verantwortliche der Gebietskörperschaften, Raumplaner, Vermieter, die dazu beitragen können,

einen günstigen regulatorischen oder anreizorientierten Rahmen zu schaffen. Gebietskörperschaften und Raumplaner spielen eine wichtige Rolle, indem sie die Bauentscheidungen im Rahmen der öffentlichen Auftragsvergabe lenken. Neue öffentliche Gebäude sollten von vornherein so gestaltet und mit Materialien ausgestattet werden, dass der Einsatz von Bioziden vermieden wird. Dieser Ansatz hätte nicht nur Vorbildcharakter (einige dieser Gebäude könnten als Schulungsort dienen), sondern würde auch die Entwicklung von alternativen Praktiken und Produkten anregen oder unterstützen. Dieser Ansatz gilt auch für soziale Wohnungsbaugesellschaften, die durch die Anzahl der errichteten oder verwalteten Gebäude über eine besonders bedeutende Möglichkeit verfügen, auf bestehende Praktiken Einfluss auszuüben.

• **Architekten:** Sie können über die Gestaltung von Gebäuden und die Vorgaben zu Fassadenbehandlungen Einfluss ausüben. Die Vermeidung des Einsatzes von Bioziden in Fassadenfarben bedeutet, diese Herausforderung bereits bei der Planung des Gebäudes zu berücksichtigen. Durch die Wahl der Baustoffe, der Fassadenverkleidung und der architektonischen Optionen wird das Gebäude mehr oder weniger anfällig für das Wachstum oder die Auswirkungen von Pilzen, Algen oder Bakterien. Die Beteiligung am Bau einer biozidfreien Stadt kann auch dazu beitragen, eine neue, selbstbewusste urbane Ästhetik zu schaffen, die an Materialien anknüpft, die die Umwelt und die menschliche Gesundheit wenig beeinträchtigen. Die Herausforderung für die Architektur wäre es, einen Paradigmenwechsel in Verbindung mit den neuen Herausforderungen unserer Zeit zu verwirklichen.

• **Maler:** Sie können sich für mineralische Systeme entscheiden, die von Natur aus frei von Bioziden sind. Die Entscheidung für mineralische Farben kann den Handwerker in eine Außenseiterposition bringen - , insbesondere in einem Kontext, in dem die «Kombination» von synthetischer Farbe und Wärmedämmung (WDVS) die Norm darstellt. Die Bildung eines Malerkollektivs rund um Mineralfarben könnte Kontakte schaffen sowie Erfahrungsaustausche ermöglichen und das Legitimitätsgefühl der Malerhandwerker stärken, die Mineralfarben als Ersatz für Biozide einsetzen.

• **Farbhersteller und -lieferanten:** Sie können sich für die Verbreitung von Systemen auf mineralischer Basis entscheiden. Im Zusammenhang mit dem Übergang zu einer biozidfreien Stadt spielen diese vorgelagerten Akteure eine wichtige Rolle und können als starke Multiplikatoren für die Verbreitung alternativer Innovationen in Erscheinung treten. Darüber hinaus genießen sie Legitimität und Vertrauen bei den konventionellen Malern. Diese kollektiven Akteure können ihren Diskurs und ihre Praxis im Rahmen einer angemessenen Ausbildung weiterentwickeln, sofern sich ein Markt für biozidfreie Mineral- und Fassadenfarben entwickelt und dauerhaft etabliert.

• **Anwohner:** Sie sind im Allgemeinen nur wenig über die Risiken von fassadenbezogenen Bioziden informiert, können aber eine gesamtgesellschaftliche Nachfrage nach biozidfreien Systemen erzeugen bzw. diese verstärken. Außerdem können sie als Bauherren selbst Vorgaben aussprechen.

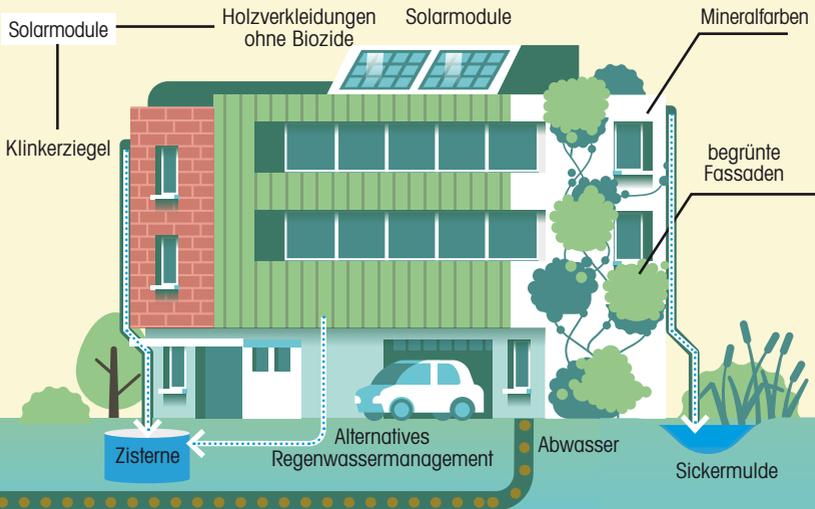


Abbildung 5:
Architektonische und technische Lösungen für eine Stadt ohne biozidhaltige Baustoffe.

Differenzierung von Maßnahmen nach ihrer Gesamteffektivität

Es existieren verschiedene Maßnahmen zur Reduktion der umweltschädlichen Auswirkungen von Bioziden in Farben. Nicht alle sind langfristig gleichwertig wirksam und haben die gleiche Bedeutung für einen globalen Übergangsprozess. Um die Relevanz der verschiedenen Maßnahmen in dieser globalen Perspektive zu klären, hat das NAVEBGO-Projekt eine Klassifizierung in drei Kategorien vorgeschlagen:



ROT: Zu vermeidende Lösungsansätze

- **Verkapselte Biozide**

Die Schutzwirkung von Produkten, die Biozide enthalten, ist in der Regel zeitlich begrenzt, da die Wirkstoffe verdunsten, ausgewaschen oder abgebaut werden. Deshalb müssen die

Fassaden in regelmäßigen Abständen erneut behandelt werden. Um den Biozidverlust zu verringern, werden die Fassaden je nach Exposition mit verkapselten Bioziden behandelt. Diese weisen vor allem im ersten Jahr deutlich geringere Auswaschraten auf als nicht verkapselte Biozide. Allerdings ist die Bildung von Transformationsprodukten bei verkapselten Bioziden noch nicht ausreichend untersucht worden. Daher kann die Verkapselung von Bioziden zur Verringerung der akuten Toxizität beitragen, trägt aber nicht zur Vermeidung von Bioziden bei. Außerdem kann die Auswaschung von verkapselndem Mikroplastik eine zusätzliche Verschmutzungsquelle darstellen.

- **Putze auf Silikonharzbasis**

Neben Bioziden, die häufig darin enthalten sind (insbesondere bei WDVS), enthalten diese Putze auch Weichmacher. Auch diese Stoffe

können im Laufe der Zeit aufgrund von Witterungseinflüssen ausgewaschen werden. Dieses Mikroplastik ist als neues Umweltproblem bekannt und stellt daher keine nachhaltige Lösung für Fassadenmaterialien dar.

• Nanopartikel

Nanopartikel werden immer häufiger in Fassadenfarben eingesetzt. Siliziumdioxid-Nanopartikel erhöhen die Härte von Fassadenfarben und verbessern ihre Abrieb-, Kratz- und Witterungsbeständigkeit. Titandioxid im Nanomaßstab wirkt bakterizid und wird wegen seiner photokatalytischen Aktivität und seines UV-Schutzes eingesetzt. Silber-Nanopartikel verleihen den behandelten Oberflächen ebenfalls einen Schutz gegen Bakterien. Es hat sich jedoch gezeigt, dass Silber- und Titandioxid-Nanopartikel auch aus ökologischer Sicht (auch so gelangen nach dem Abwaschen von Fassaden in die Umwelt) bedenklich sind, wobei zu berücksichtigen ist, dass noch nicht alle Auswirkungen einer dauerhaften Verbreitung von Nanopartikeln in der Umwelt bekannt sind. Außerdem ist ihre Schutzwirkung in Bezug auf eine mögliche Besiedlung durch Mikroorganismen begrenzt.

• Infiltration am Fassadenfuß bei Vorhandensein von Bioziden in der Fassade

Wenn Fassaden mit biozidhaltigen Farben gestrichen werden, sollte das direkte Eindringen von Fassadenabflüssen (z. B. über ungefasste Kiesdrainagen entlang der Hauswand oder mittels Sickerschächten) in jedem Fall vermieden werden. Sickerschächte und Rigolensysteme sollten als potenzielle Eintragspfade für Biozide in das Grundwasser überwacht und auf ihre Wirksamkeit hinsichtlich der Rückhaltung von Stoffen überprüft werden.

Bei biozidfreien Fassaden sind Regenwasserbewirtschaftungsverfahren in Form von Mulden oder Regenrückhaltebecken sehr sinnvoll und tragen zum Konzept der Schwammstadt bei (Abbildung 3).



B/ „GELB“:
Übergangsmaßnahmen

Kennzeichnungen bzw. „Labels“

Sofern sie unabhängig verwaltet werden, können Kennzeichnungen die freiwillige Verwendung von umweltfreundlichen Produkten fördern, im aktuellen Kontext also biozidfreie Produkte. Beispielsweise wird in Deutschland seit 2010 der "Blaue Engel" für Fassadenschutzsysteme vergeben, die keine Biozide enthalten. Das Schweizer Label Stiftung Farbe (<https://stiftungfarbe.org/>) teilt Fassadenfarben nach ihrer Umweltverträglichkeit in sieben verschiedene Kategorien von A bis G ein, wobei die Kategorie A die besten Umwelteigenschaften bescheinigt (Abbildung 3). Bei Fassadenfarben sind die Kategorien A und B Produkten ohne filmbildenden Schutz vorenthalten.

Öffentliche Körperschaften können eine wichtige Rolle bei der Wirksamkeit dieser Kennzeichnungen spielen, indem sie z. B. in ihren Leistungsbeschreibungen für Stadtplanungsprojekte Mindestniveaus für die Umweltstandards festlegen.

Auch Änderungen auf rechtlicher Ebene könnten den Einsatz von Bioziden wirksam reduzieren. So sollte die Instandhaltung von Gebäuden eine selbstverständliche Pflicht des Eigentümers oder Bewohners sein. Wenn man Wert darauf legt, dass die Fassade frei von Algen und Pilzen ist, sollte man vor allem eine physische Reinigung ohne den Einsatz von Bioziden in Betracht ziehen.



C/ „GRÜN“: Maßnahmen für biozidfreie Fassaden

Diese Maßnahmen umfassen eine ganze Reihe von Schritten, die von städtebaulichen und architektonischen Prinzipien bis hin zu Techniken der Fassadenverkleidung reichen. Sie sind in Abbildung 3 zusammengefasst.

Es gibt zwei Hauptpfade, um auf Biozide zu verzichten:

- **Begrenzung des Wachstums von Algen und Pilzen, durch Bekämpfung der Ursachen für deren Verbreitung auf Fassaden.**

→ Vermeidung anhaltender Feuchtigkeit an den Wänden, die die Ansiedlung und Entwicklung von Algen und Pilzen begünstigt (Dachüberstände, Arten der Wandverkleidung, geeignete Umgebung, Abbildung 3 und 3).

→ Schaffung eines ungünstigen Nährbodens für Algen- und Pilzwachstum auf der Oberfläche: Verwendung natürlich widerstandsfähiger Materialien wie Klinkersteine; Schaffung eines hohen pH-Werts wie bei Mineralfarben (Abbildung 3).

- **Algen-, Pflanzen- und Pilzwachstum in den Bau integrieren**

→ Begrünung der Wände (Abbildung 3).

→ Integration von kultivierten Algen in die Fassaden. Dieser letzte Ansatz, der sich noch im Versuchsstadium befindet, zielt auf die Kultivierung von Algen zur Produktion von Biomasse oder pflanzlichen Proteinen ab (Abbildung 3, Musterfassade in Hamburg).

Es gibt heute auf dem Markt mineralische und umweltfreundliche Lösungen für alle Anwendungen, von der Außenisolierung bis hin zu Farben. Ihre Entwicklung hängt von den Entscheidungen ab, die die verschiedenen Beteiligten - von Entscheidungsträgern über Architekten, Bauunternehmer und Lieferanten bis hin zu Malern - treffen, und erfordert eine umfassende Aufklärung und Schulung. Jeder muss Verantwortung übernehmen!

Für weitere Informationen ist der Maßnahmenkatalog für eine biozidfreie Stadt, der im Rahmen des NAVEBGO-Projekts erstellt wurde, unter folgendem Link zugänglich https://www.navegbo.uni-freiburg.de/fr/recherche-actuelle/catalogue-de-mesures-navegbo-septembre-2022?set_language=fr



→ Beispiele für biozidfreie Bauweisen



Fassaden aus unbehandeltem Holz, unbehandeltem Stein
Gion Caminada - Bauernhaus Vrin - Schweiz - 1999



Großer Dachüberstand
*Glenn Murcutt
MariKa-Alderton-Haus
Australien - 1994*



Fassaden aus unbehandeltem Stein, Lehm, unbehandeltem Holz
Salima Naji - Centre culturel Tata Marokko - 2016



Fassaden aus unbehandeltem Massivstein
Gilles Perraudin - Weinkeller Solan - Frankreich - 2008



Lehmfassade mit Wasserabblutungen
Martin Rauch - Haus Rauch Schlins - Österreich - 2008



Auf der Grundlage der Ergebnisse des NAVEBGO-Projekts hat die Eurometropole Straßburg bei der Erstellung ihrer Ausschreibungen für öffentliche Gebäude oder für Projekte auf öffentlichem Gelände ein neues Lastenheft mit einer technischen und/oder architektonischen Lösung ohne Biozide verabschiedet, um diese Gefahr für die menschliche Gesundheit und die Umwelt an der Quelle zu reduzieren. .

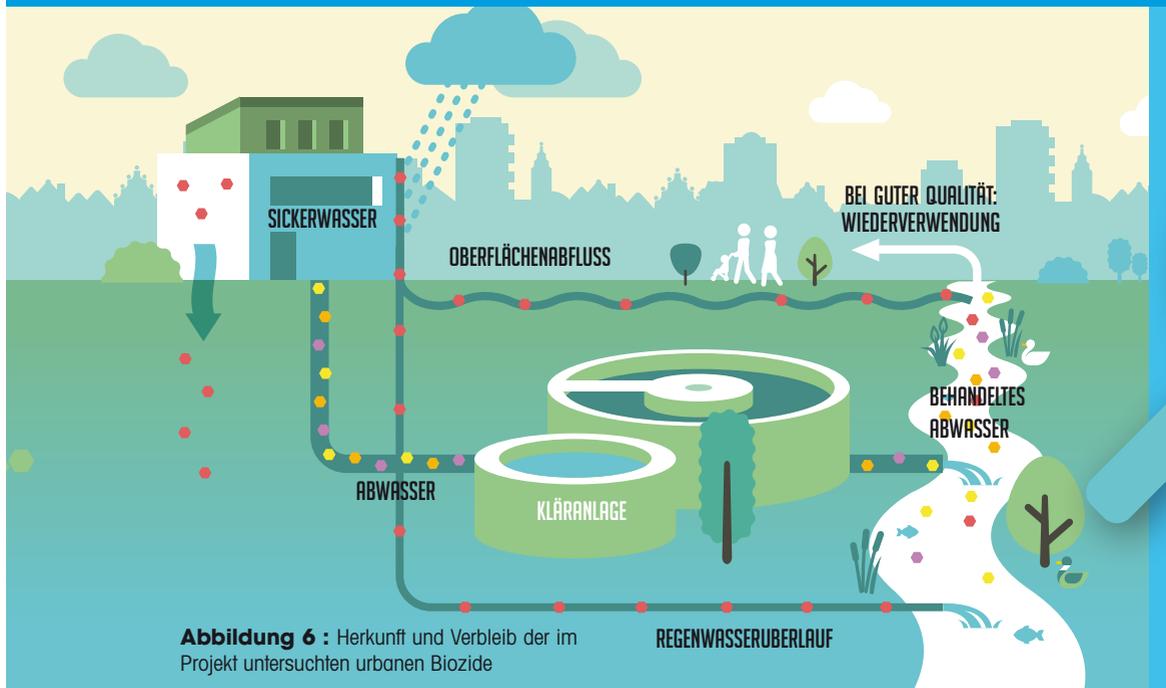


Abbildung 6 : Herkunft und Verbleib der im Projekt untersuchten urbanen Biozide

➔ 3. DAS PROJEKT REACTIVECITY: PERSPEKTIVWECHSEL FÜR EINE BIOZIDFREIE STADT

Die Erstellung von Referenzen zum Verbleib von Fassadenbioziden wurde im ersten Jahr des INTERREG VI-Projekts ReactiveCity (2023-2027) von der Stadtviertelebene (NAVEBGO-Projekt) auf die Ebene der Städte ausgeweitet. Das Projekt ReactiveCity zielt darauf ab, eine Methode zur Diagnose der Persistenz und der Umweltauswirkungen auf Ebene der Kläranlagen, aber auch in städtischen Fließgewässern im Bereich der Regenwassereinleitungen

zu entwickeln und einzusetzen (Abbildung 6).

Ähnlich wie Biozide in Baustoffen werden auch durch andere Aspekte unseres Lebensstils Spurenstoffe freigesetzt, die zum „urbanen Metabolismus“ beitragen und die die Gesundheit von Mensch und Umwelt gefährden können. Das INTERREG VI-Projekt ReactiveCity (2023-2027) verfolgt eine ähnliche Strategie wie NAVEBGO, um politische Entscheidungen auf



→ DIE VIER GROSSEN KLASSEN NEUARTIGER SPURENSTOFFE, DIE MIT UNSEREM LEBENSSTIL ZUSAMMENHÄNGEN



TIER- UND HUMANANTIBIOTIKA



IM HAUSHALT EINGESetzte BAKTERIZIDE



PFAS UND PFOS

(Endabbauprodukt von PFAS)

Textilien, Lebensmittelverpackungen, Löschschaum, Antihafbeschichtungen, Kosmetika, Pflanzenschutzmittel



MIT BAUSTOFFEN VERBUNDENE BIOZIDE

Putze, Farben, Holzbehandlungsmittel, Abdichtungen, Dachziegelbeschichtungen

Stadtebene zu beeinflussen, erweitert die Analyse jedoch auf drei weitere Spurenstofffamilien (Abbildung 4): Arzneimittel, einschließlich Antibiotika, per- und polyfluorierte Alkylsubstanzen (PFAS) und Haushaltsbakterizide. ReactiveCity zielt auf die Akteurskette ab, die mit diesen vier Spurenstofffamilien in Verbindung stehen, und deckt den kompletten städtischen Bereich bis hin zu den Einleitungen von Kläranlagen ab. Die Instrumente zur Vorhersage des Transports von Bioziden von Fassaden auf Stadtebene werden entsprechend auf diese Spurenstofffamilien ausgeweitet, um eine systemische Sicht des urbanen Metabolismus zu erhalten. Dieser kombinierte Ansatz aus Messungen und Modellierung wird es, auf der Ebene der Partnerstädte Straßburg, Landau und Freiburg, ermöglichen,

die Kontamination in den wichtigsten Umweltkompartimenten zu bewerten: Böden und städtische Fließgewässer ober- und unterhalb von Kläranlagen. ReactiveCity wird außerdem moderne analytische Ansätze einsetzen, um die Persistenz der Umwandlungsprodukte von Bioziden besser zu verstehen, die zu den Umweltauswirkungen der vier Familien von Mikroverunreinigungen in Städten beitragen.

Die Gruppe der polyfluorierten Alkylsubstanzen (PFAS) umfasst mehr als 10.000 verschiedene Stoffe, die nicht natürlich vorkommen. ReactiveCity konzentriert sich auf das kleinste PFAS, das das End-Abbauprodukt der gesamten PFAS-Familie darstellt: TFA (Trifluoressigsäure). Diese Verbindung ist hoch mobil und in der Umwelt nicht

abbaubar. TFA-Konzentrationen steigen weltweit an und die ökotoxikologischen Auswirkungen sowie die Risiken für den Menschen sind noch weitgehend unbekannt. So besteht dringender Handlungsbedarf. ReactiveCity untersucht die wichtigsten Eintragspfade im städtischen Umfeld, auch um die effektivsten Handlungsoptionen auszuloten. Im Stadtgebiet von Freiburg konnten signifikante Einträge über abfließendes Niederschlagswasser weitgehend ausgeschlossen werden. Der Abwasserpfad dominiert also den urbanen TFA-Eintrag, weswegen hierauf ein Hauptaugenmerk gerichtet wurde. Eine hochaufgelöste Beprobungskampagne an vier Stellen im Kanalnetzwerk von Freiburg und Umgebung ergab, dass durch den menschlichen Wassergebrauch hohe zusätzliche TFA-Frachten in das Abwasser gelangen. Diese konnten auf die Einwohnerzahl normiert werden und lassen erkennen, dass TFA nicht nur durch den Trinkwassergenuß, sondern vor allem durch anderen Quellen (Nahrungsmittel, Arzneistoffe, etc.) in das Abwasser gelangt. Weitere Untersuchungen innerhalb der Verbandskläranlage Breisgauer Bucht ergaben, dass TFA-Konzentrationen bei der Abwasserbehandlung weiter steigen, dies vor allem in der biologischen Reinigungsstufe. Dies zeigt, dass sich zusätzlich zu TFA noch verschiedene TFA-Vorläufersubstanzen im Abwasser befinden. So werden von ReactiveCity auch Arzneistoffe analysiert. Dabei erfolgt auch ein systematisches Screening, welche fluorierten Arzneistoffe durch solche ohne Fluor ersetzbar sind.

ReactiveCity ist voll und ganz Teil eines Ansatzes zur städtischen Nachhaltigkeit, mit dem doppelten Ziel, die menschliche Gesundheit und die Umwelt zu schützen. Das Projekt zielt darauf ab, die Städte am Oberrhein auf dem Weg zu einem Null-Biozid-Ziel zu begleiten, sowohl an der Quelle als auch am Auslass der Kläranlagen, und auf eine Reduzierung der nicht substituierbaren Moleküle wie z.B. Medikamente, deren Einsatz durch Öko-Verschreibungen optimiert werden soll. ReactiveCity unterstützt Pläne zur städtischen Anpassung an den Klimawandel, im Einklang mit der New European Bauhaus Initiative und dem Europäischen Green Deal, die darauf abzielen, urbane Lebensräume zu überdenken, um sie nachhaltiger, widerstandsfähiger und integrativer zu machen.

Die Ergebnisse werden nach und nach auf der ReactiveCity-Website online gestellt. Sie werden 1) Referenzen zur Persistenz und zum Abbau von "Modell"-Verbindungen aus diesen Familien, 2) Kommunikations- und Schulungsressourcen für die verschiedenen Akteure und 3) Werkzeuge zur Vorhersage verschiedener Ausstiegsszenarien von Bioziden liefern.

→ 4. LITERATURVERZEICHNIS

ASTEÉ, 2024. Solutions de Gestion durable des Eau Pluviales - Gestion patrimonial. 194 S. <https://www.astee.org/publications/guide-solutions-de-gestion-durable-des-eaux-pluviales-gestion-patrimoniale/>

Bork M., Engel J., Krämer A., Lange J., 2022. FReWaB-PLUS (Freiburger Regenwasserbewirtschaftung plus Stofftransport). FReWaB-PLUS: Mobilisierung von Bioziden in Stadtgebieten. <https://www.biozidauswaschung.de>

Burkhardt M., Junghans M., Zuleeg S., Boller M., Schoknecht U., Lamani X., Bester K., Vonbank R., Simmler H., 2009. Biozide in Gebäudefassaden - okotoxikologische Effekte, Auswaschung und Belastungsabschätzung für Gewässer. *Environmental Science Eur.* 21, 36-47. <https://doi.org/10.1007/s12302-008-0033-1>

Burkhardt M., Engelke D., Gehrig S., Hochstrasser F., Rohr M., Tietje O., 2020. COMLEAM - Manual Version 3.0. https://www.comleam.ch/de/home/_comleam-benutzen/COMLEAM_Manual_V3.pdf

Elrayies G.M., 2018. Microalgae: Prospects for greener future buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81 (1), 1175-1191. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.08.032>.

Gerecke A.C., Schärer M., Singer H.P., Müller S.R., Schwarzenbach R.P., Sägesser M., Ochsenbein U., Popow G., 2002. Sources of pesticides in surface waters in Switzerland: pesticide load through waste water treatment plants--current situation and reduction potential. *Chemosphere*, 48(3): 307-15. [https://doi.org/10.1016/S0045-6535\(02\)00080-2](https://doi.org/10.1016/S0045-6535(02)00080-2)

Grant C., Dobbs A.J., 1977. The Growth and metal content of plants grows in soil contaminated by a copper/chrome/arsenic wood preservative. *Environmental Pollution*, 14, 213-226. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0013932777901215>

Hensen B., Lange J., Jackisch N., Zieger F., Olsson O., Kümmerer K., 2018. Entry of biocides and their transformation products into groundwater via urban stormwater infiltration systems, *Water Research*, 144, 413-423. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.07.046>.

Junginger T., 2023. Transport and Degradation of Urban Biocides From Facades to Groundwater (PhD Thesis). Universität Straßburg.

Junginger T., Payraudeau S., Imfeld G., 2022. Transformation and stable isotope fractionation of the urban biocide terbutryn during biodegradation, photodegradation and abiotic hydrolysis. *Chemosphere*, 135329. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.135329>

Junginger T., Payraudeau S., Imfeld G., 2023. Emissions of the Urban Biocide Terbutryn from Facades: The Contribution of Transformation Products. *Environmental Science & Technology*. <https://doi.org/10.1021/acs.est.2c08192>

NAVEBGO, 2022. Kurzdarstellungen des NAVEBGO-Projekts, im Internet verfügbar. <https://www.navebgo.uni-freiburg.de/fr/navebgo-1>

Pajjens C., 2019. Biocides émis par les bâtiments dans les rejets urbains de temps de pluie et transfert vers la Seine. *Ecologie, Environnement*. Université Paris-Est, 2019. 298 p. https://theses.hal.science/tel-03394385v1/file/83809_PAJJENS_2019_archivage.pdf

Europäisches Parlament, 1998. Richtlinie 98/8/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 16. Februar 1998 über das Inverkehrbringen von Biozid-Produkten. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/HTML/?uri=CELEX:31998L0008>

Europäisches Parlament und Rat, 2012. Verordnung (EU) Nr. 528/2012 vom 22. Mai 2012 über die Bereitstellung auf dem Markt und die Verwendung von Biozidprodukten. <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2012:167:0001:0123:fr:PDF>

Sereni L., Junginger T., Payraudeau S., Imfeld G., 2024. Emissions and transport of urban biocides from facades to topsoil at the district-scale. *Science of the Total Environment*, 954, 176269. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.176269>

/// BIOZIDHALTIGE BAUSTOFFE IN URBANEN GEBIETEN WAS SIND DIE ALTERNATIVEN AUF STADTEBENE?

Interreg



Cofinancé par
l'Union Européenne
Kofinanziert von
der Europäischen Union

Rhin Supérieur | Oberrhein

wissenschaftliche Partner:



universität freiburg

Städte:

Stadt Landau in der Pfalz



Verbundpartner:



Graphic design : Pierre Wisson

 www.wisson.fr



