

Autoclaved aerated concrete with sulphate content: an environmentally friendly, durable and recyclable building material

Sulfathaltiger Porenbeton: Ein umweltfreundlicher, langlebiger und recyclingfähiger Baustoff

Autoclaved aerated concrete (AAC) contains a small quantity of sulphate. For example, a modern quality class PP2-0,35 AAC ($\lambda = 0.09 \text{ W/(mK)}$) from Xella contains about five per cent by mass of sulphate in the form of gypsum or anhydrite. The addition of sulphate reduces shrinkage and enhances compressive strength and durability. AAC thus has an almost unrestricted lifetime. Regarding the environmental acceptability of sulphate, dogmatic discussions have been held for years. What is certain: sulphate is not a hazardous substance. Calcium sulphate (gypsum) has been categorised according to the Directive (EC) No. 1272/2008 (CLP) as not hazardous. Xella's voluntary environmental declarations for AAC confirm not only the excellent ecological balance of this product but also the absence of hazardous substances. For construction and demolition (C&D) waste from AAC, disposal is ensured in Germany with landfill class I ("Non-hazardous waste, domestic waste"). In order to save disposal costs, Xella offers to take back unmixed cutting waste, which arises in the course of new building or refurbishment, without charge at the Ytong-factories. Xella's long-term aim is a closed recycling loop for AAC. A collaborative pilot project between Xella and the Otto Dörner Entsorgung GmbH has shown that from the point of view of process and materials technology, production of high-quality AAC is even possible under utilization of crushed AAC from demolition.

Keywords: sustainability; resource efficiency; autoclaved aerated concrete, AAC; sulphate; environmental impact; compressive strength; durability; recycling; environmental product declaration; Cradle-to-Cradle®, natureplus®

1 The building material autoclaved aerated concrete 1.1 Raw materials and production process

Autoclaved aerated concrete (AAC) has been a well-known and proven ecological building material for almost a century [1], [2]. It is made of locally available materials and has the almost unlimited durability of a massive building material. It is a highly thermally insulating building material, which thanks to its pore structure can undertake both structural and building physical functions – normally without additional measures and supplementary building materials.

The raw materials for AAC are quartz sand, cement, quicklime, the aerating agent aluminium powder/paste and water. The raw materials mix contains a sulphate me-

Porenbeton enthält eine Mindermenge Sulfat. So enthält beispielsweise ein moderner Porenbeton der Güteklasse PP2-0,35 ($\lambda = 0,09 \text{ W/(mK)}$) von Xella etwa fünf Masseprozent Sulfat in Form von Gips oder Anhydrit. Durch die Sulfatzugabe werden Druckfestigkeit, Schwindung und Beständigkeit gegenüber Verwitterung optimiert. Dadurch hat Porenbeton eine nahezu unbegrenzte Lebensdauer. Hinsichtlich der Umweltverträglichkeit von Sulfat werden seit Jahren stark dogmatisch geprägte Diskussionen geführt. Festzuhalten ist: Sulfat ist kein Gefahrstoff. Calciumsulfat (Gips) wurde nach Verordnung (EG) Nr. 1272/2008 (CLP) als nicht gefährlich eingestuft. Xella's freiwillige Umweltdeklarationen für Porenbeton bestätigen nicht nur die ausgezeichnete Ökobilanz dieser Produkte, sondern auch deren Freiheit von Schadstoffen.

Für Porenbetonabfälle aus Abbruch und Rückbau ist in Deutschland die Deponierfähigkeit in Deponieklasse I („Nicht gefährliche Abfälle, Hausmüll“) gewährleistet. Um Deponierungskosten zu vermeiden, bietet Xella die Möglichkeit, sortenreine Verschnittreste, die beim Neubau oder bei der Sanierung anfallen, kostenlos an das Ytong-Werk zurückzugeben. Xella's Fernziel ist ein geschlossener Recycling-Kreislauf für Porenbeton. Ein gemeinsames Pilotprojekt zwischen Xella und der Otto Dörner Entsorgung GmbH zeigte, dass aus prozess- und materialtechnischer Sicht die Produktion von hochwertigem Porenbeton sogar mit Splitt aus Altporenbeton aus Abbruch und Rückbau mühelos möglich ist.

Stichworte: Nachhaltigkeit; Ressourceneffizienz; Porenbeton; Sulfat; Umwelteinwirkung; Druckfestigkeit; Dauerhaftigkeit; Recycling; Umweltproduktdeklaration; Cradle-to-Cradle®, natureplus®

1 Der Baustoff Porenbeton 1.1 Rohstoffe und Herstellprozess

Porenbeton ist ein seit fast einhundert Jahren bekannter und bewährter ökologischer Baustoff [1], [2]. Er wird aus heimischen Rohstoffen hergestellt und besitzt die für Massivbaustoffe charakteristische nahezu unbegrenzte Lebensdauer. Es handelt sich um ein hochwärmedämmendes Bauprodukt, das aufgrund seiner Porenstruktur sowohl statische als auch bauphysikalische Eigenschaften übernehmen kann – in der Regel ohne Zusatzmaßnahmen und Ergänzungsbaustoffe.

Die Rohstoffbasis für Porenbeton bilden Quarzsand, Zement, Branntkalk, das Treibmittel Aluminiumpulver/-paste und Wasser. Die Rohstoffmischung enthält einen

dium in the form of anhydrite of gypsum [3]. The raw material components are mixed with water to a aqueous suspension. The aerating agent is added at the end of the mixing process, finally the ready mix is poured into moulds. The lime slakes with the development of heat and creates an alkaline environment, in which the aluminium powder forms gaseous hydrogen. This forms pores in the slurry, leading to a volume expansion. The hydrogen escapes at the end of the aerating process without residues and leaves behind air-filled pores. Hydration of the cement produces air-cured solid blocks, which are cut to the intended formats with cutting wires [4] and given their tongue and groove profiles. The final AAC properties are a result of a steam curing treatment in an autoclave. After the production process, the AAC consists mineralogically mostly of the good crystalline calcium-silicate-hydrate (C-S-H) phase tobermorite, X-ray amorphous C-S-H phases, unreacted quartz and the sulphate medium anhydrite/gypsum [5].

1.2 Resource efficiency

The building material AAC consists of mineral raw materials. Since there is no shortage of these resources in Europe, the raw materials situation is unproblematic: the starting materials for lime and cement manufacture are available in sufficient quantities, as are sand and water. The aluminium that is used in small quantities as an air entraining agent is largely recycled material. The main raw material, sand, comes from sand pits in the immediate vicinity of the AAC-factories, which means that the delivery routes and the resulting costs and environmental impacts are reduced to a minimum. All further raw materials come from a distance of normally not more than 200 km from the production plants. In order to keep the quantity of waste as small as possible, AAC production involves several material cycles: just like the residual quantities from the production, clean AAC residues from construction sites can be fed back into the production or used in other application areas. A closed raw materials cycle is possible for AAC from raw material extraction through production and use and on to building materials recycling after the demolition of a building. For this reason, Xella was the first building materials producer to gain a Cradle-to-Cradle® certificate in 2011 for the product Ytong Energy+. In 2013, the products Ytong and Multipor were also certified. Cradle-to-Cradle (C2C) is a design concept, which takes nature as an example. This means that products are developed according to the principle of a closed and potentially endless recycling economy – without any production of waste. C2C thus differs quite significantly from conventional building material recycling: according to statistics, almost 90% of mineral building materials were indeed recycled, but mostly as low-quality and one-off downcycling in road building [6].

1.3 Sulphate

1.3.1 What is sulphate?

Sulphate is an anion consisting of one sulphur and four oxygen atoms. Sources of sulphate in soil and rocks are for example gypsum ($\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$) and anhydrite

Sulfatträger in Form von Anhydrit oder Gips [3]. Die Rohstoffkomponenten werden mit Wasser zu einer wässrigen Suspension gemischt. Die Zugabe des Treibmittels erfolgt am Ende des Mischprozesses, anschließend wird die fertige Mischung in Gießformen gegossen. Der Kalk löst sich unter Wärmeentwicklung ab und erzeugt ein alkalisches Milieu, in dem das Aluminium gasförmigen Wasserstoff bildet. Dadurch werden die Poren in der Masse erzeugt und diese treibt auf. Der Wasserstoff entweicht am Ende des Treibprozesses ohne Rückstände und hinterlässt mit Luft gefüllte Poren. Durch die Zementhydratation entstehen sogenannte grünste Blöcke, die mittels Schneiddrähten in die gewünschten Steinformate geschnitten werden [4] und die Nut- und Federprofilierung erhalten. Die Ausbildung der endgültigen Poreneigenschaften findet während einer Dampfhärtung in einem Autoklaven statt. Nach dem Herstellungsprozess besteht der Porenbeton aus mineralogischer Sicht hauptsächlich aus der gut kristallinen Calcium-Silikat-Hydrat (C-S-H)-Phase Tobermorit, röntgenamorphem C-S-H-Phasen, noch nicht reagiertem Quarz sowie dem Sulfatträger Anhydrit/Gips [5].

1.2 Ressourceneffizienz

Das Bauprodukt Porenbeton besteht aus mineralischen Rohstoffen. Da für diese heute in Europa keine Ressourcenknappheit besteht, stellt sich die Rohstoffsituation unproblematisch dar: Ausgangsstoffe für die Kalk- und Zementherstellung sind ebenso wie Sand und Wasser in ausreichendem Maße vorhanden. Das in geringen Mengen als porenbildender Zusatz verwendete Aluminium ist größtenteils wiederverwertetes Material. Der Hauptrohstoff Sand stammt aus Sandgruben in unmittelbarer Umgebung der Porenbetonwerke. Dadurch werden die Transportwege und die daraus resultierenden Kosten und Umwelteinwirkungen auf ein Minimum reduziert. Alle weiteren Rohstoffe stammen aus einem Umkreis von in der Regel nicht mehr als 200 km Entfernung zum Werk. Um die Abfallmenge möglichst gering zu halten, beinhaltet die Porenbetonherstellung mehrere Stoffkreisläufe: Ebenso wie die bei der Produktion entstehenden Restmengen können sortenreine Porenbetonreste von Baustellen wieder der Produktion zugeführt bzw. in anderen Anwendungsbereichen eingesetzt werden. Von der Rohstoffgewinnung über die Herstellung und Nutzung bis hin zum Baustoffrecycling nach der Rückbauphase von Gebäuden ist für Porenbeton ein geschlossener Rohstoffkreislauf möglich. Deshalb hat Xella bereits 2011 als erster Baustoffhersteller ein Cradle-to-Cradle®-Zertifikat erhalten, und zwar für den Ytong Energy+. Im Jahr 2013 wurden zusätzlich die Produkte Ytong und Multipor zertifiziert. Cradle-to-Cradle (C2C) ist ein Designkonzept, das die Natur zum Vorbild hat. Das bedeutet, dass Produkte nach dem Prinzip einer geschlossenen und potenziell unendlichen Kreislaufwirtschaft entwickelt werden – ohne Abfallentstehung. Damit unterscheidet sich C2C wesentlich von herkömmlichem Baustoffrecycling: Laut Statistik wurden 2014 zwar knapp 90% der mineralischen Bauabfälle wiederverwertet, allerdings meist als niedrigwertiges und einmaliges Downcycling im Straßenbau [6].

(CaSO₄), but biological sulphate compounds from sulphide or sulphurous biomass (e.g. proteins) can also contribute to the entry of sulphates into soil and groundwater. Gypsum as a raw material is primarily mined from rock gypsum but today it is also often obtained as a side-product of various chemical processes, for example synthetic gypsum from flue gas desulphurisation plants. Synthetic gypsum is chemically identical with naturally occurring gypsum. It is used, like natural gypsum, above all in the gypsum and cement industries for the production of building materials like gypsum plaster, plasterboard or gypsum screeds. Gypsum is also used as a fertiliser and for soil improvement. Synthetic gypsum is also used in the production of AAC.

Sulphate occurs naturally in groundwater. Seawater and deep groundwater can also sometimes contain considerable sulphate concentrations, which can enter adjoining groundwater. Natural contents fluctuate between about 10 mg/l and several 100 mg/l [7]. Increased sulphate concentrations can also be found in groundwater with high humus content from contact with turf or bogs [8]. Water from rocks with sulphate content (e.g. Upper Permian, shell lime, Keuper) can also have sulphate contents of several 100 mg/l. The Federal Institute for Geosciences and Natural Resources (BGR) of the Federal Ministry for Economic Affairs and Energy (BMWi) publishes maps of sulphate background values, which show that the upper groundwater in large parts of North and Central Germany as well as along the Upper Rhine Rift show concentrations of up to 240 mg/l and more [9], [10]. The groundwater report for Niedersachsen of the Niedersachsen Ministry for Environment, Energy and Climate Protection shows that the annual average concentration of sulphate in groundwater in the south eastern districts of Niedersachsen and on the North Sea coast sometimes reach figures of more than 3000 mg/l [11]. Sulphate water is accessible through springs or deep wells and due to its healthy properties is often used as mineral or spa water [12]. Sulphate spa waters normally contain at least 1200 mg/l of sulphate [13]. Human activity has also brought sulphates into the groundwater and surface water: sulphate can enter the surface water from active or closed open-cast coal mines. Fertilisers with sulphate content like ammonium sulphate, nitrous ammonium sulphate, ammonium thiosulphate (24, 13 and 26% by weight of sulphur respectively) or also pure elementary sulphur can lead to high sulphur contents in groundwater. The burning of fossil fuels with the associated emissions of sulfate-containing dusts and sulphur oxides can lead to sulphur ingress by precipitation. Sulphate can also get into the soil from building rubble and from buildings themselves, depending on their chemical composition.

1.3.2 Dangers from sulphate?

Sulphate is not considered toxic. Very high quantities, as are found in spa waters, have a good effect on digestion and thus have a therapeutic effect when used. However, sulphate in large quantities can affect the taste of drinking water. The sulphate threshold according to the drinking water regulations is 240 mg/l and thus near to the natural background level of some surface water bodies. This upper

1.3 Sulfat

1.3.1 Was ist Sulfat?

Sulfat ist ein Anion, das aus einem Schwefel- und vier Sauerstoffatomen besteht. Sulfatquellen im Bodengestein sind beispielsweise Gips (CaSO₄ · 2 H₂O) und Anhydrit (CaSO₄), aber auch biologische Sulfatbildungen aus Sulfid oder schwefelhaltiger Biomasse (z. B. Proteine) können zum Sulfateintrag in Boden und Grundwasser beitragen. Gips als Rohstoff wird vorwiegend bergmännisch als Gipsstein gewonnen, fällt aber heute auch häufig als Nebenprodukt verschiedener chemischer großtechnischer Verfahren an, wie zum Beispiel REA-Gips, der aus den Abgasen von Rauchgasentschwefelungsanlagen („REA“) gewonnen wird. REA-Gips ist chemisch identisch mit dem in der Natur vorkommenden Gips. Er wird – wie Naturgips – vor allem in der Gips- und Zementindustrie zur Herstellung von Baustoffen wie Gipsputz, Gipskartonplatten oder Gips-Estrich verarbeitet. Gips wird auch als Düngemittel und zur Bodenverbesserung eingesetzt. Auch bei der Herstellung von Porenbeton kommt REA-Gips zum Einsatz.

Sulfat ist von Natur aus im Grundwasser zu finden. Auch Meerwasser und Tiefenwässer enthalten zum Teil erhebliche Sulfatkonzentrationen, die in angrenzende Grundwasservorkommen gelangen können. Die natürlichen Gehalte schwanken dabei zwischen etwa 10 mg/l und mehreren 100 mg/l [7]. Erhöhte Sulfatkonzentrationen finden sich auch in huminstoffhaltigem Grundwasser bei Kontakt mit Torfen und Mooren [8]. Wasser aus sulfathaltigen Gesteinen (z. B. Zechstein, Muschelkalk, Keuper) kann ebenfalls Sulfatgehalte von bis zu mehreren 100 mg/l enthalten. Die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi) weist an Hand von Karten Sulfat-Hintergrundwerte im Grundwasser aus, die zeigen, dass die oberen Grundwasserleiter in weiten Bereichen Nord- und Mitteldeutschlands sowie entlang des Oberrheingrabens Konzentrationen von bis zu 240 mg/l und darüber aufweisen [9], [10]. Der Grundwasserbericht Niedersachsen des Niedersächsisches Ministeriums für Umwelt, Energie und Klimaschutz zeigt, dass die Jahresmittelwerte der Konzentration von Sulfat im Grundwasser in den südöstlichen Landkreisen Niedersachsens und an der Nordseeküste Werte von zum Teil von bis zu über 3000 mg/l aufweisen [11]. Sulfathaltige Wasser sind über Quellen oder Tiefbrunnen zugänglich und werden aufgrund ihrer als gesundheitsfördernd wahrgenommenen Eigenschaften oft als Mineral- oder Heilwasser genutzt [12]. Sulfathaltige Heilwasser enthalten in der Regel mindestens 1200 mg/l Sulfat [13]. Auch durch menschliche Tätigkeiten gelangt Sulfat in das Grund- und Oberflächenwasser: Aus aktiven oder stillgelegten Braunkohletagebauen kann Sulfat in Oberflächenwasser eindringen. Schwefelhaltige Dünger wie Ammoniumsulfat, Ammonsulfatsalpeter, Ammoniumthiosulfat (24, 13 bzw. 26 Masseprozent Schwefel) oder auch reiner, elementarer Schwefel führen speziell im oberen Grundwasserstockwerk zu erhöhten Sulfatkonzentrationen. Auch über sulfathaltige Niederschläge mit Stäuben und Schwefeloxiden aus der Verbrennung fossiler Brennstoffe kann Sulfateintrag erfolgen. Aus Bauschutt sowie aus Bauwerken selbst kann – in Abhängigkeit von deren

limit is not grounded in toxicity but essentially serves to prevent bacterially caused corrosion to the drinking water network.

1.3.3 Sulphate in autoclaved aerated concrete

AAC contains small quantities of sulphate. The sulphate in AAC mostly comes from the cement, in the form of gypsum, hemihydrate and anhydrite or as a mixture of these added to regulate the hardening behaviour. AAC recipes from most producers have an additional source of sulphate. For example, a modern quality class PP2-0,35 ($\lambda = 0,09 \text{ W/(mK)}$) AAC from Xella has a sulphate content of about five per cent by mass in the form of gypsum or anhydrite. Sulphate in AAC acts as a catalyser for the formation of good crystalline tobermorite from C-S-H(I) [14]. This optimises the physical and mechanical properties, primarily leading to higher compressive strength. The small quantity of C-S-H gel also leads to reduced shrinkage and increased resistance to weathering. This means that AAC has an almost unlimited lifetime.

The combination of low raw density with high strength is a particular property of AAC. It leads to advantages during application: supplementary measures which are often necessary in order to achieve thermal or sound insulation or fire protection, are largely unnecessary with monolithic wall constructions of AAC, a significant advantage not just for economy but also for safe, error-free building. Modern AAC products, which can achieve current and future energy-related requirements for the building envelope, are only possible against a background of grounded understanding of the chemical and mineralogical interactions between raw materials, process technology and the completed product. Only in this way is it possible, for example, to provide a high-end quality class P1,6-250 AAC with a design value of the thermal conductivity of $0,07 \text{ W/(mK)}$ [15]. The precise function and effect of the sulphate is the subject of fundamental research at Xella. Sulphate-free mixes for modern and durable high-performance AAC products are however still not available today.

2 Building use phase

The ecological properties of a product are only reliable in objective comparison. In order that customers can simply and transparently compare AAC with other materials, Xella publishes the contents, environmental- and health-related information from the production path, effects in the built-in condition on interior air, soil and groundwater in an Environmental Product Declaration (EPD). The EPD is a worldwide recognised and accepted environmental label (Type III) according to ISO 14025 [16]. It has been developed by CEN/TC 350 with the collaboration of the Federal Environment Agency and is issued in Germany by the *Institut für Bauen und Umwelt e.V. (IBU)*. Verifications and certificates presented for certification demonstrate that no substance that could be potentially hazardous to water can wash out under the action of water. The Multi-por mineral insulation board has furthermore been recognised by the *German Eco-Institut* with the natureplus® quality label as a sustainable, future-viable product. This certification also confirms that the product is free of haz-

chemischer Zusammensetzung – ebenfalls Sulfat in Boden und Grundwasser gelangen.

1.3.2 Gefahren durch Sulfat?

Sulfate gelten als nicht toxisch. Sehr hohe Mengen, wie sie in Heilwässern vorkommen, weisen eine verdauungsfördernde Wirkung auf und haben somit bei Anwendung einen gewünschten therapeutischen Effekt. Allerdings kann Sulfat in hohen Konzentrationen den Geschmack von Trinkwasser beeinträchtigen. Der Sulfatgrenzwert der Trinkwasserverordnung liegt bei 240 mg/l und damit nahe an den natürlichen Hintergrundgehalten einiger Grundwassereinheiten. Die gesetzte Obergrenze ist dabei nicht toxikologisch begründet, sondern dient in erster Linie der Vermeidung von bakteriell bedingten Korrosionsschäden im Leitungsnetz.

1.3.3 Sulfat im Porenbeton

Porenbeton enthält eine Mindermenge Sulfat. Sulfatträger im Porenbeton sind zunächst der Zement, dem Sulfate in Form von Gips, Halbhydrat und Anhydrit oder als Mischung davon zur Regelung des Erstarrungsverhaltens dazugegeben werden. Darüber hinaus wird einer Porenbetonrezeptur von den meisten Herstellern ein zusätzlicher Sulfatträger beigemischt. So enthält beispielsweise ein moderner Porenbeton der Güteklasse PP2-0,35 ($\lambda = 0,09 \text{ W/(mK)}$) von Xella einen Sulfatanteil von etwa fünf Masseprozent Sulfat in Form von Gips oder Anhydrit. Sulfat im Porenbeton fungiert als Katalysator für die Bildung von gut kristallinem Tobermorit aus C-S-H(I) [14]. Dadurch werden die physiko-mechanischen Eigenschaften optimiert, wobei daraus primär eine höhere Druckfestigkeit resultiert. Der geringe Anteil von C-S-H-Gel führt darüber hinaus zu verringerter Schwindung und einer steigenden Beständigkeit gegenüber Verwitterung. Dadurch hat Porenbeton als Baustoff eine nahezu unbegrenzte Lebensdauer.

Die Kombination von niedriger Rohdichte und hoher Festigkeit ist die besondere Eigenschaft von Porenbeton. Daraus ergeben sich wichtige Vorteile in der Anwendung: Auf ergänzende Maßnahmen, die sonst häufig für den Wärme-, Schall- oder Brandschutz erforderlich werden, kann bei monolithischen Wandkonstruktionen aus Porenbeton weitgehend verzichtet werden – ein wesentlicher Vorteil sowohl für die Wirtschaftlichkeit als auch für eine sichere, fehlerfreie Bauausführung. Zeitgemäßer Porenbeton, mit dem sich aktuelle und zukünftige energetische Anforderungen an die Gebäudehülle erfüllen lassen, sind nur mit fundierter Kenntnis der chemisch-mineralogischen Zusammenhänge zwischen Rohstoffen, Prozesstechnik und fertigem Produkt möglich. Nur so ist beispielsweise ein High-End-Porenbeton der Güteklasse P1,6-250 mit einem Bemessungswert der Wärmeleitfähigkeit von $0,07 \text{ W/(mK)}$ überhaupt zugänglich [15]. Die genaue Wirkungsweise des Sulfatträgers ist bei Xella Gegenstand der Grundlagenforschung. Sulfatfreie Rezepturen für moderne und langlebige Hochleistungsporenbetone stehen allerdings heute noch nicht zur Verfügung.

2 Gebäudenutzungsphase

Nur im objektiven Vergleich sind ökologische Produkteigenschaften aussagekräftig. Damit Kunden einfach und trans-

ardous materials and releases no emissions that could impair health.

3 After-use phase

3.1 Recycling, downcycling or landfilling of autoclaved aerated concrete?

At the Xella Technologie- und Forschungsgesellschaft (Xella T+F), several series of spot-check samples with altogether 54 individual samples were taken from secondary AAC sorted from mixed building rubble over a period of 14 months and mineralogically tested. Since it cannot be ruled out that, after decades of use, hazardous materials have entered the building substance, the samples were also chemically analysed. The evaluation criteria here were the requirements of *Mitteilung 20* of the *Länderarbeitsgemeinschaft Abfall LAGA* (German states working group on waste) [17]. This document gives assignment criteria in the form of grading of substance contents and eluates in recycling building materials, which have direct or indirect contact with the ground as technical building structures. Table 1 shows the average values from the chemical analyses, their minimum and maximum values in comparison with the assignment figures of the LAGA and the landfill regulations (DepV [18]). The table shows both solid matter and eluate analysis values. The maximum assignment criteria Z 2 is only exceeded by sulphate, although the range of 25 mg/l (Z 1) extends to the typical value for AAC of 2315 mg/l (> Z 2) [19]. Nickel and the heavy metals arsenic, lead, cadmium, thallium and mercury could not be verified at the verification threshold of the X-ray fluorescence analysis of about 1 microgramme per gramme dry matter. The average values for chromium, zinc and chloride also clearly fulfil the strictest assignment criteria of category Z 0. The average value for copper is only slightly above it. The (higher) threshold values for filling category 2 are, with the exception of sulphate, not exceeded even by the highest individual figures. No other impurities or contamination were detected.

3.2 Downcycling

Low-quality reuse of AAC, for example in technical built structures (noise barriers, screen walls, road, path and paving) would only be possible under the criteria of the LAGA [17] if AAC is part of otherwise sulphate-free mixed building waste due to the sulphate content. According to the thresholds of the LAGA (see Table 1), the use of such a mixed waste according to categories Z 1.1 (limited open filling) and Z 1.2 (filling only in hydrogeologically favourable areas with erosion protection) is practically impossible. With a content of max. 10% by mass, use according to LAGA category Z 2 (restricted filling with defined technical safeguarding measures) is at least mathematically permitted. With the ever more elaborate and cost-intensive requirements of landfill operators regarding technical safeguarding measures, testing, quality monitoring and certification of recycling materials, the question has to be raised here whether this is economically attractive for the recycling business and finally also their customers. Another consideration is that filling in category Z 2 is often no longer permitted in many localities and the material

parent Porenbeton mit anderen Werkstoffen vergleichen können, weist Xella Inhaltsstoffe, umwelt- und gesundheitsbezogene Informationen aus dem Produktlebensweg, Auswirkungen im eingebauten Zustand auf Innenraumluft, Boden und Grundwasser mit Hilfe einer Environmental Product Declaration (EPD/Umwelt-Produktdeklaration) aus. Die EPD ist ein weltweit anerkanntes und akzeptiertes Öko-Label (Typ III) gemäß ISO 14025 [16]. Sie wurde vom CEN/TC 350 unter Mitarbeit des Umweltbundesamtes entwickelt und wird in Deutschland durch das Institut Bauen und Umwelt e. V. (IBU) vergeben. Für die Zertifizierung vorgelegte Nachweise und Prüfzeugnisse belegen, dass unter Wassereinwirkung keine Stoffe ausgewaschen werden, die wassergefährdend sein können. Die Multipor Mineraldämmplatte wurde darüber hinaus vom eco-Institut mit dem natureplus®-Qualitätszeichen und als nachhaltiges, zukunftsfähiges Produkt ausgezeichnet. Auch diese Zertifizierung bestätigt, dass das Produkt schadstofffrei ist und keine gesundheitsschädlichen Emissionen freisetzt.

3 Nachnutzungphase

3.1 Recycling, Downcycling oder Deponierung von Porenbeton?

Bei der Xella Technologie- und Forschungsgesellschaft (Xella T+F) wurden in einem Zeitraum von 14 Monaten mehrere Stichprobenserien mit insgesamt 54 Einzelproben an aus gemischtem Bauschutt sortiertem Sekundärporenbeton entnommen und mineralogisch untersucht. Da nach jahrzehntelanger Nutzungsphase nicht ausgeschlossen werden kann, dass Schadstoffe in die Gebäudesubstanz gelangt sind, wurden die Proben zusätzlich einer chemischen Untersuchung unterzogen. Bewertungskriterien waren hier die Anforderungen der *Mitteilung 20* der *Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA)* [17]. Hier sind in abgestufter Form Zuordnungswerte für Feststoffgehalte und Eluate in Recycling-Baustoffen aufgeführt, die als technische Bauwerke direkten oder indirekten Boden-/Grundwasserkontakt haben. In Tabelle 1 sind die Mittelwerte der chemischen Analysen, deren Minima und Maxima im Vergleich zu den Zuordnungswerten der LAGA und der Deponieverordnung (DepV [18]) dargestellt. Die Tabelle weist sowohl Feststoff- als auch die Eluat-Analysewerte aus. Der maximale Zuordnungswert Z 2 wird nur bei Sulfat überschritten, wobei sich die Bandbreite von 25 mg/l (Z 1) bis hin zu – durchaus porenbetontypischen – 2315 mg/l (> Z 2) erstreckt [19]. Nickel sowie die Schwermetalle Arsen, Blei, Cadmium, Thallium und Quecksilber waren im Rahmen der Nachweisgrenze der Röntgenfluoreszenzanalyse von etwa einem Mikrogramm pro Gramm Trockensubstanz nicht nachzuweisen. Die Mittelwerte für Chrom, Zink und Chlorid erfüllen klar auch die strengsten Zuordnungswerte der Kategorie Z 0. Der Mittelwert für Kupfer liegt hier nur knapp darüber. Die (höheren) Grenzwerte der Einbauklasse 2 werden – mit Ausnahme von Sulfat – selbst von den höchsten Einzelwerten nicht überschritten. Sonstige Störstoffe oder Verunreinigungen waren nicht erkennbar.

3.2 Downcycling

Eine niedrigwertige Wiederverwendung von Porenbeton beispielsweise in technischen Bauwerken (Lärm-, Sicht-

Table 1. Solid matter and eluate criteria according to LAGA Mitteilung 20 (Tables II.1.2-2, II.1.2-3, II.1.2-4 and II.1.2-5 [17]) or the landfill regulations (Appendix 3, Table 2[18]) and the minimum, maximum and average figures in spot checks on old AAC

Tabelle 1. Feststoff- und Eluatkriterien gemäß LAGA Mitteilung 20 (Tabellen II.1.2-2, II.1.2-3, II.1.2-4 und II.1.2-5 [17]) bzw. DepV (Anhang 3, Tabelle 2[18]) und in Altporenbeton-Stichproben gemessene Minimal-, Maximal- und Durchschnittswerte

| Parameter / Parameter | Dimension / Dimension | Spot checks Otto Dörner / Stichproben Otto Dörner | | | LAGA assignment values [17] / LAGA-Zuordnungswerte [17] | | | Assignment values according to landfill regulations [18] / Zuordnungswerte nach DepV [18] | | | |
|--|-----------------------|---|-----------------------|----------------------|---|---|--------|---|--------|--------|--------|
| | | minimum / Minimalwert | maximum / Maximalwert | average / Mittelwert | Z 0 | Z 1 | Z 2 | DK 0 | DK I | DK II | DK III |
| Arsenic / Arsen | mg/kg TS (dry matter) | < 1* | < 1* | < 1* | ≤ 10 | ≤ 45 | ≤ 150 | no solid material criteria specified / keine Feststoffkriterien ausgewiesen | | | |
| Lead / Blei | mg/kg TS (dry matter) | < 1* | < 1* | < 1* | ≤ 40 | ≤ 210 | ≤ 700 | | | | |
| Cadmium / Cadmium | mg/kg TS (dry matter) | < 1* | < 1* | < 1* | ≤ 0.4 | ≤ 3 | ≤ 10 | | | | |
| Chrome (total) / Chrom (ges.) | mg/kg TS (dry matter) | < 1* | 400 | 7.4 | ≤ 30 | ≤ 180 | ≤ 600 | | | | |
| Copper / Kupfer | mg/kg TS (dry matter) | < 1* | 300 | 22.6 | ≤ 20 | ≤ 120 | ≤ 400 | | | | |
| Nickel / Nickel | mg/kg TS (dry matter) | < 1* | < 1* | < 1* | ≤ 15 | ≤ 150 | ≤ 500 | | | | |
| Thallium / Thallium | mg/kg TS (dry matter) | < 1* | < 1* | < 1* | ≤ 0.4 | ≤ 2.1 | ≤ 7.0 | | | | |
| Mercury / Quecksilber | mg/kg TS (dry matter) | < 1* | < 1* | < 1* | ≤ 0.1 | ≤ 1,5 | ≤ 5.0 | | | | |
| Zinc / Zink | mg/kg TS (dry matter) | < 1* | 500 | 55.8 | ≤ 60 | ≤ 450 | ≤ 1500 | | | | |
| Chloride ^{2*} / Chlorid ^{2*} | mg/l | 8 | 73 | 22 | ≤ 30 | ≤ 30 ^{3*} / ≤ 50 ^{4*} | ≤ 100 | | | | |
| Sulphate ^{2*} / Sulfat ^{2*} | mg/l | 25 | 2315 | 1147 | ≤ 60 | ≤ 20 ^{3*} / ≤ 50 ^{4*} | ≤ 1500 | ≤ 100 | ≤ 2000 | ≤ 2000 | ≤ 5000 |

* Concentration less than the verification threshold of one microgramme per gramme (1 ppm), ^{2*}Eluate criteria and values according to DEV-S4 [20], ^{3*}Assignment criteria for filling category 1.1, ^{4*}Assignment criteria for filling category 1.2 / * Konzentration unterhalb der Nachweisgrenze von einem Mikrogramm pro Gramm (1 ppm), ^{2*}Eluatkriterien und -werte nach DEV-S4 [20], ^{3*}Zuordnungswerte für Einbauklasse 1.1, ^{4*}Zuordnungswerte für Einbauklasse 1.2, TS = Trockensubstanz

has to be disposed of to landfill due to the exceeding of the assignment criteria. The consequence is that AAC waste are normally deposited in landfill, where tipping is allowed due to its categorisation under the landfill regulations in *Deponieklasse* (landfill class) I (non-hazardous wastes, domestic waste) [18] (Fig. 1).

It should be pointed out once more here that many groundwater samples show a higher sulphate concentration, solely of geogenic origin, than is permitted by the assignment criteria for the extreme filling category Z 2. It should perhaps be questioned whether it is sensible to set a threshold for recycling materials that is less than the known background values for sulphate in groundwater in many parts of the Federal Republic of Germany. The setting of this threshold is also hard to comprehend with regard to the practice in other EU member states, where sulphate content is not restricted to such an extent in many cases. Apparently no negative effects are known at such low sulphate inputs.

schutzwälle, Straßen-, Wege- und Verkehrsflächenbau) wäre nach den Kriterien der LAGA (Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall) [17] aufgrund des Sulfatgehaltes nur dann möglich, wenn Porenbeton Teil eines ansonsten sulfatfreien Baustellenmischabfalls ist. Gemäß den Grenzwertsetzungen der LAGA (s. Tabelle 1) ist die Verwendung eines solchen Gemisches gemäß Klassen Z 1.1 (Eingeschränkt offener Einbau) und Z 1.2 (Einbau nur in hydrogeologisch günstigen Gebieten mit Erosionsschutz) praktisch unmöglich. Bei einem Anteil von maximal 10 Massenprozent ist die Verwendung gemäß der LAGA-Klasse Z 2 (Eingeschränkter Einbau mit definierten, technischen Sicherungsmaßnahmen) zumindest rechnerisch erlaubt. Mit den immer aufwändigeren und kostenintensiven Anforderungen an die Verfüllbetriebe hinsichtlich technischer Sicherungsmaßnahmen, Prüfung, Güteüberwachung und Zertifizierung von Recyclingbaustoffen stellt sich hier allerdings die Frage nach der wirtschaftlichen Attraktivität für die Aufbereiter und letztendlich auch deren Kunden.

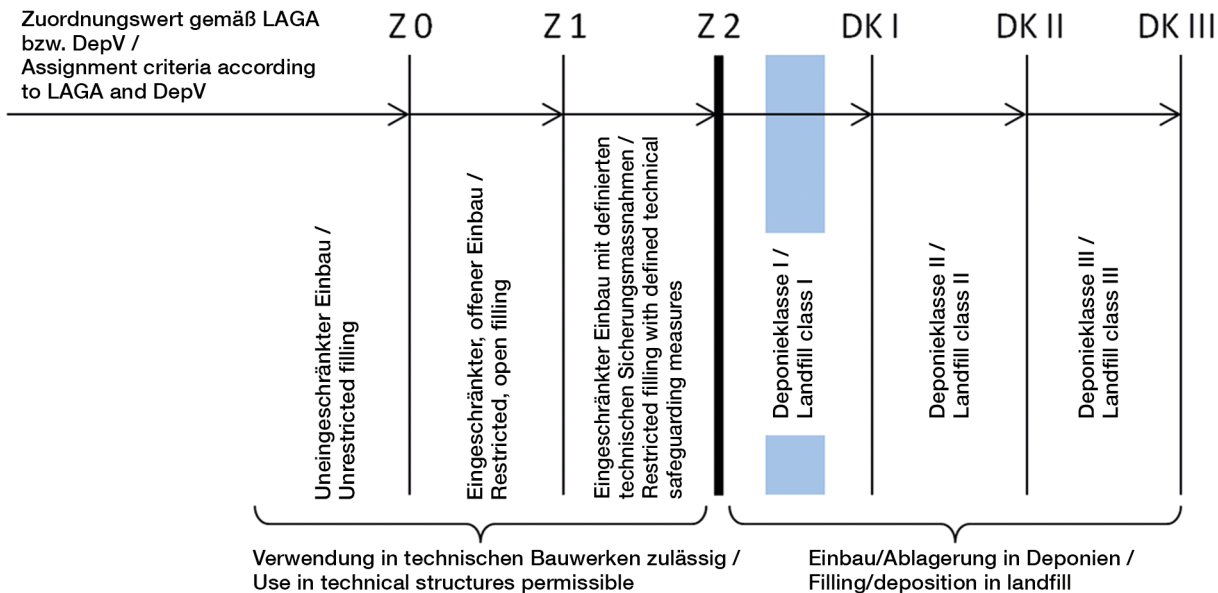


Fig. 1. Diagram of the individual filling categories and the associated assignment criteria; due to the typical sulphate content of 500 mg/l to 1500 mg/l [19] in the DEV-S4 eluate [20], AAC (blue) is in landfill class I

Bild 1. Darstellung der einzelnen Einbauklassen und der dazugehörigen Zuordnungswerte; aufgrund typischer Sulfatgehalte von 500 mg/l bis 1500 mg/l [19] im DEV-S4 Eluat [20] fällt Porenbeton (blau) in Deponieklasse I

3.3 Recycling: a closed materials cycle for autoclaved aerated concrete

If waste materials are used in building products, they have to fulfil the basic requirements of the LAGA regulations. For the assessment of such recycling projects, it can be stated that the use of unsorted waste does not lead to any enrichment of contaminants in building products and thus not to an increase of their concentration. The substance concentration in the eluate has to comply with at least the assignment criteria for Z 2; if exceeded, then the wastes must be transported to landfill sites [21]. There is, however, the following exception: “The assignment criteria in the eluate and in the solid material may be exceeded in unthinned and in mixed waste if the substance concentrations/contents are higher in the primary raw material formerly used for the production of the product but substituted by the waste (in this case, the upper threshold, considering the ban on enrichment, corresponds to the substance concentration/content of the substituted primary raw material)” [17]. The enrichment of sulphate in the intended closed material cycle is fundamentally ruled out. With other words: the exceeding of the assignment criteria is not an exclusion criterion in this case. The recycling of AAC in technical structures (downcycling) is prohibited, while its recycling within the product cycle is permitted.

For equivalent quality reuse, i.e. recycling instead of downcycling, of AAC wastes, its purity is a decisive precondition [22].

In a pilot study carried out in collaboration with the Hamburg disposal company Otto Dörner GmbH and the Ytong-factory Wedel, Germany, the Xella T+F is investigating how and in what quantities AAC residues from demolished houses or from landfill can be reused for new AAC production (Fig. 2). The old material is prepared at Otto Dörner in a multi-stage process: firstly, lightweight impuri-

Dazu kommt, dass ortsnah häufig Verfüllungen in Kategorie Z 2 nicht mehr genehmigt werden oder das Material wegen Überschreitung der Zuordnungswerte auf Deponien entsorgt werden muss. Die Folge ist, dass Porenbetonabfälle in der Regel auf Deponien verbracht werden. Hier ist die Deponierfähigkeit gemäß Deponie-Verordnung in Deponieklasse I (nicht gefährliche Abfälle, Hausmüll) gewährleistet [18] (Bild 1).

Es sei an dieser Stelle nochmals darauf verwiesen, dass viele Grundwässer eine höhere, aber ausschließlich geogen bedingte Sulfatkonzentration aufweisen als die Zuordnungswerte der äußersten Einbaukategorie Z 2 zulässt. Es stellt sich also die Frage nach der Sinnhaftigkeit einer Grenzwertsetzung für Recycling-Baustoffe, die sich in weiten Teilen der Bundesrepublik Deutschland unterhalb der bekannten Sulfat-Hintergrundwerte des Grundwassers befindet. Die Grenzwertsetzung ist auch im Vergleich zur Praxis in anderen Mitgliedstaaten der EU schwer nachvollziehbar, da dort keine enge Reglementierung des Sulfatgehalts erfolgt und offensichtlich keine negativen Folgen derartig niedriger Sulfateinträge festzustellen sind.

3.3 Recycling: Ein geschlossener Stoffkreislauf für Porenbeton

Werden Abfälle in Bauprodukten eingesetzt, müssen diese die grundsätzlichen Anforderungen des LAGA-Regelwerkes erfüllen. Bei der Bewertung derartiger Verwertungsvorhaben ist sicherzustellen, dass es durch den Einsatz schadstoffbelasteter Abfälle nicht zu einer Verschleppung von Schadstoffen in Bauprodukte und damit zu einer Schadstoffanreicherung kommt. Die Stoffkonzentrationen im Eluat müssen mindestens die Zuordnungswerte Z 2 einhalten; bei Überschreitung müssen Abfälle auf Deponien verbracht werden [21]. Dabei gilt folgende Ausnahme: „Die Zuordnungswerte im Eluat und im Feststoff dürfen im unverdünnten und unvermischten Abfall dann überschritten



Fig. 2. Quality maintenance in the closed material cycle for AAC: sorted old AAC (1) is subjected to chemical and mineralogical spot checks by Xella T+F (2); old AAC, which fulfils our requirements, is delivered to an Ytong-factory (3), crushed (4) and fed back as granulate (5) into the production of AAC (6)

Bild 2. Werterhaltung im geschlossenen Stoffkreislauf für Porenbeton: Sortierter Altporenbeton (1) wird stichprobenartig chemisch/mineralogisch durch die Xella T+F untersucht (2); Altporenbeton, der unserem Anforderungsprofil entspricht, wird an ein Ytong-Werk geliefert (3), gebrochen (4) und als Splitt (5) in die laufende Produktion von Porenbeton zurückgeführt (6)

ties are removed from mixed building rubble by airstream sorting. Then ferrous metals are removed with an overbelt magnet. Plastics are sorted out with the assistance of sensors. What cannot be sorted then passes through a sink-swim process: materials with higher density than water sink to the bottom of a water bath. Materials with lower density (for example AAC) remain floating on the surface and are separated with rakes. This process has a higher separation accuracy than other density sorting processes.

It turns out that the purity achieved at Otto Dörner is adequate for reuse in AAC production. In the pilot plant of the Xella T+F, old AAC prepared in this way could be used without problems for up to 15% (in a few cases to over 20%) of the raw materials for the production of quality class PP4-0,55 Ytong [23]. Subsequent trial production at the Ytong-factory in Wedel with granulated old AAC was successful [24], [25]. For what other products could crushed old AAC be considered? Due to the very low chloride content measured so far in returned AAC, reinforced assembly elements of AAC seem to represent a possible product group for AAC recycling. AAC slabs and panels for non-load bearing internal walls and calcium silicate units with crushed AAC as aggregate are also conceivable product fields.

3.4 Taking back AAC-residues at Ytong-factories

The use of AAC leads to an average of 4 to 5% cutting waste. Landfill costs per tonne of building rubble differ greatly between regions. The disposal of 0.8 m³ of Ytong cutting waste costs for example about 34 € in parts of South Germany; a skip with 2.5 m³ of mixed building rubble costs about 175 €. Instead of filling, Xella therefore offers the option of collecting cutting waste in special bulk goods containers ("big bags") and sending it back to the

werden, wenn die Stoffkonzentrationen/-gehalte im durch den Abfall substituierten, bisher für die Herstellung des Produktes verwendeten Primärrohstoff höher liegen (in diesem Fall entspricht die Obergrenze unter Berücksichtigung des Verschlechterungsverbot der Stoffkonzentration/dem Stoffgehalt des substituierten Primärrohstoffes)" [17]. Eine Sulfat-Anreicherung ist im beabsichtigten geschlossenen Stoffkreislauf grundsätzlich ausgeschlossen. Mit anderen Worten: Die Überschreitung des Zuordnungswertes stellt im hier vorliegenden Fall kein Ausschlusskriterium dar. Die Wiederverwertung von Porenbeton in technischen Bauwerken (Downcycling) ist zwar untersagt, dessen Recycling innerhalb des Produktkreislaufs aber zulässig.

Für die gleichwertige Wiederverwertung – also Recycling anstelle von Downcycling – von Porenbeton-Abbruchabfällen stellt die Sortenreinheit die entscheidende Voraussetzung dar [22].

In einer gemeinsam mit dem Hamburger Entsorgungsunternehmen Otto Dörner GmbH und dem Ytong-Werk Wedel durchgeführten Pilotstudie überprüft die Xella T&F, wie und in welchen Mengen sich Porenbetonreste aus Abbruchhäusern oder von Deponien für die erneute Porenbetonproduktion wiederverwenden lassen (Bild 2). Die Aufbereitung des Altmaterials erfolgt bei Otto Dörner in einem mehrstufigen Prozess: Aus gemischtem Bauschutt werden mittels Windsichtung zunächst leichte Störstoffe entfernt. Eisenmetalle werden mit Überbandmagneten aussortiert. Für Kunststoffe erfolgt eine sensorunterstützte Nachsortierung. Was nicht sortiert werden kann, durchläuft ein Sink-Schwimm-Trennverfahren: In einem Wasserbad sinken Stoffe mit höherer Dichte als Wasser zu Boden. Stoffe mit geringerer Dichte (beispielsweise Porenbeton) bleiben an der Oberfläche und werden mit Rechen abgetrennt. Dieses Verfahren zeichnet sich im Vergleich zu anderen Dichtesortierprozessen durch eine hohe Trennschärfe aus.

Es zeigte sich, dass die bei Otto Dörner erreichte Sortenreinheit für eine Wiederverwertung in der Porenbeton-Produktion ausreichend ist. Im Technikum der Xella T+F konnte derartig aufbereiteter Altporenbeton ohne Mühe zu bis zu 15% (in Einzelfällen bis über 20%) für die Herstellung von Ytong der Güteklasse PP 4-0,55 [23] eingesetzt werden. Eine anschließende Probeproduktion im Ytong-Werk Wedel mit granuliertem Altporenbeton verlief erfolgreich [24], [25]. Für welche anderen Produktgruppen kommt Splitt aus Altporenbeton in Frage? Aufgrund der bisher festgestellten sehr niedrigen Chloridgehalte in Porenbetonrückläufern stellen auch bewehrte Montagebauteile aus Porenbeton eine mögliche Produktgruppe für das Porenbetonrecycling dar. Auch Planbauplatten für nichttragende Innenwände und Kalksandstein mit Porenbeton-splitt als Zuschlagstoff sind denkbare Produktfelder.

3.4 Rücknahme von Porenbetonrestmengen in Ytong-Werken

Bei der Verarbeitung von Porenbeton fallen durchschnittlich 4 bis 5% an Verschnittresten an. Die Deponierungskosten pro Tonne Bauschutt sind regional sehr unterschiedlich. Für 0,8 m³ Ytong-Verschnittreste fallen in Teilen Süddeutschlands zum Beispiel ca. 34 € an. Ein Container mit 2,5 m³ gemischtem Bauschutt kostet etwa

producing factory at no cost, or have it collected. The returned residues are either processed into AAC granulate or crushed and used as a substitute for sand in the production of AAC. The return is simple and can be undertaken in just a few steps. The big bags on a pallet are picked up from the roadside within a few days of notification. It is important that the material residues are pure and not contaminated with other wastes like foil or building rubble. In 2015, when this scheme was introduced, 500 big bags or 200 to 250 tonnes of AAC were sent back to the Ytong-factories in Southern Germany alone. In 2016, almost 2750 returns have already been counted, which corresponds to more than 1000 t of AAC residue. This very successful disposal concept will be extended to all German from the middle of 2017.

4 Concluding comments

The subject of the environmental acceptability of sulphate has been very dogmatically and sometimes also unobjectively discussed for years. After the Technosan environmental scandal, a waste disposal problem has developed in Bavaria since 2013, which noticeably affects building rubble and thus also AAC. While in the past the use of building materials with gypsum content, AAC products, composite materials and demolition materials with a high brick content was condoned for the backfilling of excavations, quarries and open-cast mines, disposal according to the landfill regulations is now obligatory and is consistently supervised by district council and water board offices. AAC is categorised into landfill class I "Non-hazardous waste" according to the landfill regulations. This procedure also corresponds to the German standard for the disposal of AAC, but in Bavaria understandably leads to uncertainty in the building industry: is AAC an ecological building material?

It can be stated: sulphate is not a hazardous substance. Calcium sulphate (gypsum) is classed as non-hazardous according to the CLP regulations [26]. Also the registration dossier for gypsum according to REACH does not show any hazard potential to people or environment [27]. Blocks, building panels, elements and reinforced assembly elements of AAC are to be considered as products and thus do not have to be registered under REACH. Xella AAC does not contain any substances, which count as troublesome under the terms of REACH (Substances of Very High Concern, SVHC) [28]. The voluntary environmental declaration, the natureplus® and the Cradle-to-Cradle® certifications confirm not only the excellent ecological balance of Ytong AAC but also that the block is free of hazardous materials and that unhealthy emissions can be ruled out.

Regarding the threshold for sulphate, it has to be assumed that much demolition waste will still not be able to comply with the outermost assignment criteria (filling category Z 2) in the future. In the next few decades, 1960s and 1970s buildings, in which increased quantities of gypsum building materials such as plaster panels, fibre-reinforced gypsum panels, plasterboard and gypsum screed were used, will increasingly be demolished. If attempts are unsuccessful to isolate gypsum-based mineral waste quantitatively from their sulphates, then high concentrations of sulphate

175 €. Anstelle zu deponieren, bietet Xella deshalb die Möglichkeit, Verschnittreste in speziellen Schüttgutbehältern („Big Bags“) zu sammeln und kostenlos an das Lieferwerk abzuliefern oder abholen zu lassen. Die zurückgeführten Reste werden entweder zu Porenbetongranulat veredelt, oder in gebrochener Form als Sandersatz in die laufende Produktion von Porenbeton zurückgeführt. Die Rückgabe ist einfach und ohne großen Zeitaufwand in nur wenigen Schritten möglich. Die Big Bags auf einer Palette werden innerhalb weniger Werkstage nach Anmeldung ab Bordsteinkante abgeholt. Wichtig ist, dass die Materialreste sortenrein und nicht mit Abfällen wie Folien oder Bauschutt verunreinigt sind. Im Einführungsjahr 2015 wurden allein in Süddeutschland über 500 Big Bags oder 200 bis 250 t Porenbeton an die Lieferwerke zurückgeführt. 2016 wurden bereits knapp 2750 Rückläufer gezählt; das sind deutlich mehr als 1000 t Porenbetonrestmaterial. Das sehr erfolgreiche Entsorgungskonzept wird seit Mitte 2017 deutschlandweit ausgebaut.

4 Abschließende Bemerkungen

Hinsichtlich der Umweltverträglichkeit von Sulfat werden seit Jahren stark dogmatisch geprägte und zum Teil auch unsachliche Diskussionen geführt. Vor dem Hintergrund des Technosan-Umweltskandals entwickelte sich in Bayern ab 2013 eine Entsorgungsproblematik, die zusehends auch Bauschutt und ergo Porenbeton betrifft. Während in der Vergangenheit die Nutzung gipshaltiger Baustoffe, Porenbetonprodukte, Verbundbaustoffe und ziegelreicher Abbruchmaterialien zur Verfüllung von Gruben, Steinbrüchen und Tagebauen geduldet war, ist heute die Deponierung nach Deponie-Verordnung obligatorisch und wird durch die Landrats- und Wasserwirtschaftsämter konsequent überwacht. Porenbeton ist dabei gemäß Deponieverordnung der Deponieklasse I „Nicht gefährliche Abfälle“ zuzuordnen. Diese Vorgehensweise entspricht dem bundesdeutschen Standard für die Entsorgung von Porenbeton, führte aber in Bayern verständlicherweise zur Verunsicherung innerhalb der Bauwirtschaft: Handelt es sich bei Porenbeton um einen ökologischen Baustoff?

Festzuhalten ist: Sulfat ist kein Gefahrstoff. Calciumsulfat (Gips) ist gemäß CLP-Verordnung [26] als nicht gefährlich eingestuft. Auch nach den Erkenntnissen der Registrierungsdossiers von Gips nach REACH liegt kein Gefährdungspotential für Mensch und Umwelt vor [27]. Steine, Bauplatten, Elemente und bewehrte Montagebauteile aus Porenbeton sind gemäß REACH als Erzeugnisse zu betrachten und somit nicht registrierungspflichtig. Denn: Xella-Porenbeton enthält keine Stoffe, die im Sinne von REACH als besonders besorgniserregend gelten (Substances of Very High Concern, SVHC) [28]. Die freiwillige Umweltdeklaration, die natureplus®- und die Cradle-to-Cradle®-Zertifizierung bestätigt nicht nur die ausgezeichnete Ökobilanz von Ytong-Porenbeton, sondern auch, dass der Stein schadstofffrei ist und gesundheitsschädliche Emissionen ausgeschlossen sind.

Im Hinblick auf die Sulfatgrenzwerte ist anzunehmen, dass viele Abbruchabfälle künftig auch den äußers-ten Zuordnungswert (Einbaukategorie Z 2) nicht mehr einhalten können: In den nächsten Jahrzehnten werden immer häufiger Gebäude der 1960er- und 1970er-Jahre

in the eluate are inevitable. If the thresholds for sulphate remain unchanged, then the filling of large quantities of building waste in landfill sites will be the only solution.

References – Literatur

- [1] *Kitsch, A.*: YTONG – Der Porenbeton. Eine Marke macht Geschichte, 1. Aufl. Mai 2012, Xella International.
- [2] Porenbeton – Chronik einer Entwicklung (http://www.bv-porenbeton.de/images/bvp/Menu/Bauen_mit_Porenbeton/Der_Baustoff/BS_Chronik-Entwicklung.pdf), Zugriff am 5.7.2017.
- [3] DIN EN 771-4:2011-07, Festlegungen für Mauersteine – Teil 4: Porenbetonsteine. Berlin: Beuth-Verlag GmbH.
- [4] Patent 1026679: Verfahren zum Herstellen von Leichtbetonformlingen, 16. November 1943.
- [5] *Homann, M.*: Porenbeton Handbuch – Planen und Bauen mit System, 6. Aufl. Gütersloh: Bauverlag Juni 2008.
- [6] Bundesverband Baustoffe – Steine und Erden e.V., 2017, Kreislaufwirtschaft Bau – Mineralische Bauabfälle Monitoring 2014. <http://www.kreislaufwirtschaft-bau.de/Arge/Bericht-10.pdf>, letzter Zugriff am 5.7.2017.
- [7] <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/3642.pdf>, letzter Zugriff am 5.7.2017.
- [8] <http://www.umwelt.niedersachsen.de/themen/wasser/grundwasser/grundwasserbericht/grundwasserbeschaffenheit/gueteparameter/grundprogramm/sulfat/sulfat-137612.html>, letzter Zugriff am 5.7.2017.
- [9] https://www.bgr.bund.de/EN/Themen/Wasser/Veranstaltungen/workshop_ihme_2013/presentation_15_wagner.html, letzter Zugriff am 4.7.2017.
- [10] https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Wasser/Bilder/Was_aktuelles_hgw_2015_g.html?nn=1542268, letzter Zugriff am 4.7.2017.
- [11] <http://www.umweltkarten-niedersachsen.de/umweltkarten/?topic=Hydrologie&lang=de&bgLayer=TopographieGrau&X=5809903.80&Y=584768.29&zoom=1&catalogNodes=810,812&layers=Sulfat>, letzter Zugriff am 4.7.2017.
- [12] http://deutsche-heilbrunnen.de/deutsch/inhaltsstoffe_die_gut_tun/sulfat.html, letzter Zugriff am 4.7.2017.
- [13] http://deutsche-heilbrunnen.de/media/pdf/Brunnenliste_Juli_2016.pdf, letzter Zugriff am 4.7.2017.
- [14] *Walk-Laufer, B.*: Untersuchung des Einflusses von Sulfaten auf das System $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-K}_2\text{O-H}_2\text{O}$ mittels Wärmeflusskalorimetrie und in-situ Neutronenbeugung unter hydrothermalen Bedingungen, Dissertation an der Universität Siegen, 2002.
- [15] Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Z-17.1-1064, Ytong Porenbeton-Plansteine mit einer Trocken-Rohdichte von $0,25 \text{ kg/m}^3$ und einem Mittelwert der Druckfestigkeit von mindestens $2,3 \text{ N/mm}^2$.
- [16] DIN EN ISO 14025:2011-10: Umweltkennzeichnungen und -deklarationen – Typ III Umweltdeklarationen – Grundsätze und Verfahren. Berlin: Beuth-Verlag GmbH.
- [17] Mitteilung 20 der Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA). Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Abfällen, Teil II: Technische Regeln für die Verwertung (Bodenmaterial und sonstige mineralische Bau- und Abbruchabfälle), Stand: 05.11.2004.
- [18] Verordnung über Deponien und Langzeitlager (Deponieverordnung – DepV) vom 27.4.2009 (BGBl. I S. 900), zuletzt geändert durch Art. 2 V vom 4.3.2016.
- [19] *Walther, H.*: Elution Behaviour of Sand-based AAC. In: Proceedings of the 5th International Conference of Autoclaved Aerated Concrete (5ICAAC), 14-17 September 2011, Bydgoszcz, Polen.
- [20] DIN 38409-1:1987-01: Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung; Summarische Wirkungs- und Stoffkenngrößen (Gruppe H); Bestimmung des Gesamttrockenrückstandes, des Filtrat-trockenrückstandes und des Glührückstandes (H 1). Berlin: Beuth-Verlag GmbH.
- [21] Richtlinie 2008/98/EG über Abfälle und zur Aufhebung bestimmter Richtlinien, Abfallrahmenrichtlinie (AbfRRL) vom 19. November 2008.
- [22] *Boehme, L.*: Chap-Yt – Recycled aerated concrete aggregates in traditional screed for flooring. In: Proceedings of the CESB13 Conference (Central Europe towards Sustainable Building 2013), 26–28 Juni, 2013, Prag, Tschechien.
- [23] Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Z-17.1-540, Mauerwerk aus Porenbeton-Plansteinen der Rohdichteklassen 0,50 und 0,55 in der Festigkeitsklasse 4 und der Rohdichteklassen 0,60 und 0,65 in der Festigkeitsklasse 6. Geltungsdauer bis 14.4.2020.
- [24] *Krefl, O.*: Recycling of Autoclaved Aerated Concrete. In: Hauser, G., Lützkendorf, T. Eßig, N. (Hrsg.), sb13: Implementing Sustainability – Barriers and Chances, München (Sustainable Buildings Conference), 22.–24.4.2013, Fraunhofer IRB-Verlag, 2013, S. 1507–1512.
- [25] *Krefl, O.*: Geschlossener Recyclingkreislauf für Porenbeton/Closed-loop recycling of autoclaved aerated concrete, Mauerwerk 20 (2016), H. 3, S. 183–190. DOI: 10.1002/dama.201600695
- [26] Verordnung (EG) Nr. 1272/2008 (CLP) vom 16. Dezember 2008 über die Einstufung, Kennzeichnung und Verpackung von Stoffen und Gemischen, zur Änderung und Aufhebung der Richtlinien 67/548/EWG und 1999/45/EG und zur Änderung der Verordnung (EG) Nr. 1907/2006.
- [27] <https://echa.europa.eu/de/substance-information/-/substanceinfo/100.029.000>, letzter Zugriff am 3.7.2017.
- [28] <https://echa.europa.eu/de/candidate-list-table>, letzter Zugriff am 3.7.2017.

Author – Autor:

Dr. rer. nat. Oliver Krefl
Xella Technologie- und Forschungsgesellschaft mbH
D-14797 Kloster Lehnin
Hohes Steinfeld 1
oliver.krefl@xella.com