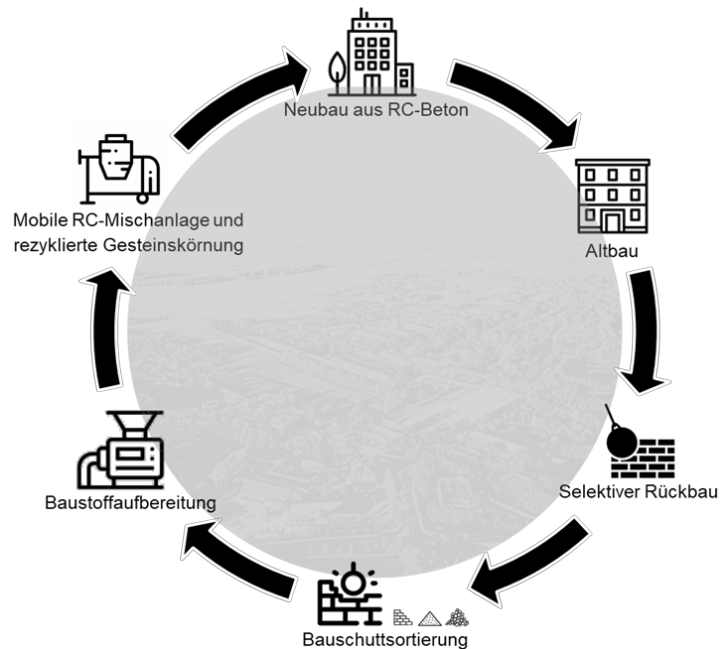


# Erstellung einer Recycling-Strategie am Beispiel der Konversion des Fliegerhorsts Erding



Wissenschaftliche Arbeit zur Erlangung des Grades  
Master of Science (M.Sc.) Bauingenieurwesen  
an der TUM School of Engineering and Design  
der Technischen Universität München

**Betreut von** Prof. Dr. Werner Lang und M.Sc. Iryna Takser  
Lehrstuhl für energieeffizientes und nachhaltiges Planen und Bauen

**Eingereicht von** Thomas Javier Rojas Sonderegger  
Oskar-von-Miller-Ring 25  
80333, München  
+49 152 59190177

**Eingereicht am** München, den 07.12.2022



# Vereinbarung

zwischen

der Technischen Universität München, vertreten durch ihren Präsidenten,  
Arcisstraße 21, 80290 München

hier handelnd der Lehrstuhl für Energieeffizientes und Nachhaltiges Planen und Bauen  
(Univ.-Prof. Dr.-Ing. W. Lang), Arcisstr. 21, 80333 München

– nachfolgend TUM –

und

Herrn .....

Oskar-von-Miller-Ring 25  
80333, München

– nachfolgend Autorin/Autor –

Die Autorin / der Autor wünscht, dass die von ihr/ihm an der TUM erstellte Masterarbeit mit dem Titel

## **Erstellung einer Recycling-Strategie am Beispiel der Konversion des Fliegerhorsts Erding**

.....

auf mediaTUM und der Webseite des Lehrstuhls für Energieeffizientes und Nachhaltiges Planen und Bauen mit dem Namen der/des Verfasserin/s, dem Titel der Arbeit, den Betreuer/innen und dem Erscheinungsjahr genannt werden darf.

in Bibliotheken der TUM, einschließlich mediaTUM und die Präsenzbibliothek des Lehrstuhls für Energieeffizientes und Nachhaltiges Planen und Bauen, Studenten und Besuchern zugänglich gemacht und veröffentlicht werden darf. Dies schließt auch Inhalte von Abschlusspräsentationen ein.

mit einem Sperrvermerk versehen und nicht an Dritte weitergegeben wird.

(Zutreffendes bitte ankreuzen)

Zu diesem Zweck überträgt die Autorin / der Autor der TUM zeitlich und örtlich unbefristet das nichtausschließliche Nutzungs- und Veröffentlichungsrecht an der Masterarbeit.

Die Autorin / der Autor versichert, dass sie/er alleinige(r) Inhaber(in) aller Rechte an der Masterarbeit ist und der weltweiten Veröffentlichung keine Rechte Dritter

entgegenstehen, bspw. an Abbildungen, beschränkende Absprachen mit Verlagen, Arbeitgebern oder Unterstützern der Masterarbeit. Die Autorin / der Autor stellt die TUM und deren Beschäftigte insofern von Ansprüchen und Forderungen Dritter sowie den damit verbundenen Kosten frei.

Eine elektronische Fassung der Masterarbeit als pdf-Datei hat die Autorin / der Autor dieser Vereinbarung beigefügt. Die TUM ist berechtigt, ggf. notwendig werdende Konvertierungen der Datei in andere Formate vorzunehmen.

Vergütungen werden nicht gewährt.

Eine Verpflichtung der TUM zur Veröffentlichung für eine bestimmte Dauer besteht nicht.

Die Autorin / der Autor hat jederzeit das Recht, die mit dieser Vereinbarung eingeräumten Rechte schriftlich zu widerrufen. Die TUM wird die Veröffentlichung nach dem Widerruf in einer angemessenen Frist und auf etwaige Kosten der Autorin / des Autors rückgängig machen, soweit rechtlich und tatsächlich möglich und zumutbar.

Die TUM haftet nur für vorsätzlich oder grob fahrlässig verursachte Schäden. Im Falle grober Fahrlässigkeit ist die Haftung auf den vorhersehbaren Schaden begrenzt; für mittelbare Schäden, Folgeschäden sowie unbefugte nachträgliche Veränderungen der veröffentlichten Masterarbeit ist die Haftung bei grober Fahrlässigkeit ausgeschlossen.

Die vorstehenden Haftungsbeschränkungen gelten nicht für Verletzungen des Lebens, des Körpers oder der Gesundheit.

Meinungsverschiedenheiten im Zusammenhang mit dieser Vereinbarung bemühen sich die TUM und die Autorin / der Autor einvernehmlich zu klären. Auf diese Vereinbarung findet deutsches Recht unter Ausschluss kollisionsrechtlicher Regelungen Anwendung. Ausschließlicher Gerichtsstand ist München.

München, den 07.12.2022

München, den 07.12.2022

.....

.....

(TUM)

(Autorin/Autor)



# Erklärung

Ich versichere hiermit, dass ich die von mir eingereichte Abschlussarbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe.

---

Ort, Datum, Unterschrift



# Kurzzusammenfassung

Diese Masterarbeit befasst sich mit der Entwicklung eines Stoffstrommodells mit recycelten Materialien. So werden in frühen Projektphasen Strategien konzipiert, die das Recycling hochwertiger Materialien auf der Baustelle ermöglichen und unterstützen. Die Arbeit beginnt mit einer Darstellung des aktuellen Standes der Forschung und Technik bei der Herstellung und Verwendung von RC-Baustoffen. Dieser Abschnitt beschreibt die technologischen Fortschritte im Bereich des Baustoffrecyclings und fasst die verschiedenen Verfahren zusammen, die derzeit die Aufbereitung von Sekundärrohstoffen ermöglichen. Nach der Beschreibung der Einsatzmöglichkeiten von RC-Materialien werden die Richtlinien auf lokaler, nationaler und europäischer Ebene erläutert und analysiert, um zu verstehen, inwieweit Vorschriften die Anwendung dieser Sekundärbaustoffe fördern oder auch einschränken. Weiterhin werden drei Case Studies als konkrete Beispiele dargestellt, bei denen nachgewiesen wurde, dass die technischen Eigenschaften von RC-Beton für den Hochbau geeignet sind.

Die entwickelte Methodik zeigt auf, wie ein holistischer Plan zum Aufbereiten und zum Verwenden von Sekundärmaterialien erstellt werden kann. Dieser berücksichtigt verschiedene Aspekte wie die Zeit, die Lagerflächen sowie die technischen Verfahren des Recyclings. Um abschätzen zu können, wie viel anfallendes Material während der Baufeldfreimachung für den Neubau zur Verfügung stehen kann, ist es wichtig, sowohl die Geschichte und den aktuellen Zustand des Baufeldes zu kennen als auch Entwürfe, Baujahr, baulichen Gegebenheiten und die Ist-Situation der abzureißenden Gebäude zu verstehen. So kann die stoffliche Zusammensetzung abgeschätzt und die Belastungssituation analysiert werden. Sind diese Daten erhoben, können durch die Überlagerung des Neubaus mit der Baufeldfreimachung Recyclingpotenziale vor Ort identifiziert und Strategien zur Herstellung hochwertiger RC-Materialien entwickelt werden.

Das entwickelte Stoffstrommodell wird dann am Beispiel der Konversion des Fliegerhorsts Erding angewendet, der derzeit ein 413 Hektar großer Militärstützpunkt ist und ab 2025 zu einem Wohn-, Misch- und Gewerbegebiet, sowie Freiflächen entwickelt werden soll (Moritz 2021). Die Konversion des Fliegerhorsts zielt auf die nachhaltige Entwicklung des Areals und hat großes Potenzial, ein Pilotprojekt für den zirkulären Umgang mit Materialien zu werden, um umweltgerechtes Bauen und eine Kreislaufwirtschaft zu fördern. Abschließend erfolgt ein wirtschaftlicher Vergleich von Primär- und Sekundärmaterialien, um die ökonomische Sinnhaftigkeit der hochwertigen RC-Bauweise aufzuzeigen.



# Summary

## **Creation of a recycling strategy using the example of the conversion of the Erding Air Base**

### **1. Abstract**

This master thesis deals with developing a material flow model with recycled materials. Thus, strategies are designed in early project phases to enable and support the repurposing of high-value materials on the construction site. The paper begins with a presentation of the current state of research and technology in Recycled Building Materials (RBM) production and use. This section describes the technological advances in recycled construction materials and summarizes the various processes that currently enable the processing of secondary raw materials. After describing the possible applications of recycled materials, the guidelines at the local, national, and European levels are explained and analyzed to understand to what extent regulations promote or restrict the application of these secondary building materials. Furthermore, three case studies are presented as concrete examples where it has been demonstrated that the technical properties of recycled concrete are suitable for building construction.

The developed methodology shows how a holistic plan preparing and using secondary materials can be created. It considers different aspects such as time, storage areas, and technical recycling processes. To estimate how much material can be made available for new construction during site clearance, it is crucial to know the history and current condition of the site as well as to understand the designs, year of construction, structural constraints, and the actual situation of the buildings to be demolished. On this wise, the material composition can be estimated, and the pollution situation can be analyzed. Once this data has been collected, recycling potentials can be identified on-site by overlaying the new construction with the site clearance, and strategies to produce high-quality RBM can be developed.

The material flow model developed is then applied to the Erding air base, which is currently a 413-hectare military base and is to be developed into a residential, mixed-use, and commercial area, as well as open spaces, from 2025 (Moritz 2021). The conversion of the air base aims at the sustainable development of the site and has great potential to become a pilot project for the circular use of materials to promote environmentally friendly construction and a circular economy. Thus, it seeks to establish a leading standard for future developments that seek to absorb the proposed methodology. Finally, the economic comparison of primary and secondary materials demonstrates the economic sense of the high-quality RBM construction method.

## 2. Introduction and aim of the paper

The use of recycled building materials promotes ecological development in many ways. For example, limited natural, mineral and non-renewable resources are protected by recycling construction and demolition waste and using it economically and ecologically. This means that finite primary raw materials can be replaced to a considerable extent. In addition, implementing recycled building materials contributes to preserving nature and the landscape, reducing soil extraction and land use for natural gravel and sand extraction. (Bavarian State Office for the Environment 2018). The main problems of the construction industry which this research paper deals with, are the exploitation of finite resources such as mineral raw materials and the production of large quantities of construction waste and their management. In many cases, recycling materials on the construction site fails or is not implemented due to a lack of planning. To carry out on-site recycling in a project, dealing with all the challenges that this construction method poses in the early project phases is essential. Both the logistical aspect and the required permits, the recycling of materials encounters more legal hurdles, which is why many projects still build with primary resources instead of secondary building materials.

The objective of this work is based on three main points: First, developing a material flow model for general use to increase the recycling rate on construction sites. At the same time, the aim is to promote RBM construction through the quantitative analysis of the material flows in the preliminary planning phase. Finally, the ecological and economic advantages of RBM are examined.

The focus is on the possible uses of RBM, mainly recycled concrete. In addition to an overview of the regulations applicable at the European, federal, and state levels and a review and recommendation of the possible uses of existing materials, this work should help to initiate the necessary measures in the early project phase to ensure high-quality materials to prepare.

The study aims to ensure that construction and demolition waste and excavated soil generated on the site are recycled as efficiently as possible. The central research question of this master's thesis results from this objective:

*With which pre-planning strategies can large quantities of high-quality recycled materials, primarily recycled concrete, be produced on site and used in new construction?*

This paper hypothesizes that it is possible to create and use large quantities of high-quality RBM through proper material flow planning in the early stages of a construction project.

### **3. State of the art**

#### **a. Preparation of the Recycled Building Materials (RBM)**

In recent years, recycling building materials have been intensively examined and products have continuously developed to achieve the same results as primary raw materials in terms of compressive strength, elasticity, and water conductivity (Kantonales Hochbauamt Thurgau 2021). In the production of recycled building materials, mineral residues from construction and demolition work, as well as excavated soil, are used as raw materials, which means that they can be used again in civil engineering and building construction, as well as in other building products. In material recycling, recycled construction and demolition waste is processed and turned into new products. This enables a reduction in resource exploitation and thus protects the fluctuating capacities of landfills. (Bavarian State Office for the Environment 2018)

The construction sector is the most significant waste stream in Germany and Bavaria. This includes mineral waste such as excavation and stones, rubble (concrete, brick, tiles, ceramics), and road debris. (Bavarian State Office for the Environment 2018)

The following secondary raw materials are primarily used as input for recycling materials: recycled concrete granules, RBM mix, recycled brick sand and chippings, and other mineral materials, such as gravel, sand, and other excavated soil materials.

RBM must meet specific ecological and building physics requirements standardized in European and National DIN standards to ensure safe recycling and long-term harmlessness. Furthermore, the permissible pollutant limit values and installation options in Bavaria have been specified in the "Requirements for the use of building rubble in technical structures" (RBM Directive) guideline. Therefore, RBM are more strictly monitored and examined than primary raw materials (Bavarian State Ministry for the Environment and Consumer Protection 2017).

To produce high-quality recycled building materials, controlled dismantling or selective demolition of structures (buildings, roads) is required. To dismantle as cleanly as possible, preparatory work such as detailed analysis and studies of the site must be carried out early. According to the Commercial Waste Ordinance, the removal of pollutants and the pure separation of material fractions creates the prerequisite for quality processing into quality-assured RBM (Bavarian State Ministry for the Environment and Consumer Protection 2017).

Mobile or stationary recycling systems are used to process the materials. These machines are responsible for crushing, screening, and removing impurities (e.g., wood,

plastic, and metal) from the mineral waste fractions. (Bavarian State Office for the Environment 2018)

Preparing recycling materials starts with a two-stage crushing (impact crusher following a jaw crusher) and continues with sorting extraneous matter on the sorting belt. The production of grain groups follows by vibratory screening and ends with the separation of light impurities by wind classification.



**Abbildung 4: Brechanlage Rockster R1000S (Rockster Austria International 2020 (Rockster Austria International 2020))**

#### **b. General conditions and guidelines for the use of recycled building materials**

Resource protection is a central ecological, political, and social issue that demands attention and gains relevance by the day. The Closed Sub-stance Cycle Waste Management Act (KrWG) is particularly relevant for material recycling, as it is a central federal law of national waste legislation. This came into force in 2012 and is intended to ensure the conservation of natural resources and the protection of people and the environment by promoting the circular economy (bmuv 2012). Section 6 of the Waste Management Act (KrWG 2012) regulates the waste management hierarchy. If waste cannot be avoided or reused, it must always be evaluated in terms of material. The Waste Act does not provide a separate approval procedure for waste recycling. According to Section 7 Paragraph 3 of the KrWG, waste must be recycled properly and without causing damage. In addition, according to § 8 KrWG, the highest possible recycling of high-quality materials should be aimed at (Federal Ministry of Justice 2012).

The Federal Government adopted the German resource efficiency program (ProgRess2012) for the first time in 2012, and its update (ProgRess II 2016) emphasizes the accelerated expansion of a resource-efficient circular economy (FRG 2015). The waste



hierarchy is crucial for the proper management of construction waste. In this way, RBM products (e.g., as components) can be directly reused at the end of their useful life. The application takes place e.g., via the so-called material and component exchanges (Bavarian State Ministry for the Environment and Consumer Protection 2017).

The new version of the Commercial Waste Ordinance (GewAbfV) came into force in August 2017; Section 8 Paragraph 1 stipulates the fundamental obligation to separate construction and demolition waste into ten fractions. These are the following mineral fractions: concrete, brick, tiles, and ceramics (17 01), soil (17 05), and gypsum-based building materials (17 08). (Federal Ministry of Justice 2017)

#### **4. Methodology**

First and foremost, the work overviews the extraction and management of primary and secondary raw materials, considering their historical development and the relationships and overlaps of everyday use. Here, state of the art is analyzed, and the current extraction and processing methods are examined. This is shown by research into the processing of mineral construction waste. The following chapter gives an overview of the current regulations with RBM at the European, national, and Bavarian levels and shows essential steps in dealing with recycled building materials in the last 20 years. For this purpose, the current legal situation regarding recycling building materials is examined, with the standards for the implementation of secondary building materials being analyzed. This is followed by a chapter with best-practice examples of recycled concrete construction to give an overview of the possible uses of RBM in building construction through successful pilot projects in Europe.

After the description of state of the art, the legal challenges, and the current situation with the implementation of RBM in the construction industry, a material flow model is developed that shows the materials present on the construction site, their processing, the logistical challenges, and strategies for preparing and recycling them on site, to use these RBM again as high-quality building materials for new buildings. This model is based on three steps: a surface model that describes the physical properties and material compositions of the construction site, a quantity model that shows the material flows, their origin, and their development into building materials, and a material flow model over time that shows the phases of the construction site project into the models already mentioned.

After developing the model and finding synergies between the important factors to achieve high-quality recycling on-site, the work aims to validate the hypothesis through the study and methodology of material management in the Erding Air Base (FHE)

project. Furthermore, the project will be used as a reference for developing the material flow model and identifying key points for designing an implementation strategy for secondary building materials at an early stage. The FHE project aims the development of the current military base of 413 hectares in Erding into a residential, mixed, and commercial area for civilian purposes (Moritz 2021). From 2025, a new residential area will be built on around 190 hectares in the southern part (Schlichenmayer 2021).

For developing a recycling-oriented material flow model, it is necessary to analyze the draft, the year of construction, the structural conditions, and the actual situation of the building to be demolished. By creating AutoCAD layers and using building material composition tables, the material mass of each building and road structure can be estimated to calculate the amount of material that can be recycled on-site (Gruhler & Böhm 2011). In addition, a subsoil study will be carried out to understand the area's geology and to consider a possible use of gravel soil as a building aggregate. Finally, cost and profitability studies compare scenarios with and without material recycling on site.

## 5. Conduction of the Material Flow Model with Recycled-Materials

The material flow model is made up of the following models:

- **Surface model:** Explaining the physical and geographic situation of the construction site.

To achieve a structured and organized processing of the RBM on site with the material flow model, a surface model that analyzes the geographical and physical parameters of the construction site is developed. In this way, a terrain model is created that considers the elevation profile, the geotechnical situation, the distribution and uses of the area, and the structural condition. This creates a grid square with different uses of the plots of land on the site, with which a construction plan can be developed that considers both the material to be processed and the logistical storage areas. With this area model, a table of the area use is created, which shows, among other things, the area consumption of the built-up area, the roads, the green areas, and the trees in the total area.

- **Quantity model:** The various material flows are analyzed; the quantities of available material are calculated, and a quantity balance is created.

After the surface model has been developed and the spatial situation of the construction site has been understood, the development of a quantity model begins. A quantity determination must be carried out beforehand to understand the available material. It is then examined how much material will be disposed of from the construction site according to its pollution. In addition, it is analyzed which aggregates, from which material, and

in which quality, can be processed and recycled on-site. Recipes are created with these values to develop RBM on-site with a mixing plant. The materials that must be imported to the construction site are also calculated. The quality of the soil and the treatment mechanisms are crucial to be able to achieve high-quality RBM. The primary sources of the material flows are rubble from building demolitions, debris from asphalted traffic areas, and material from excavated soil. The relevant material flows from the demolition are considered when determining the quantity of the construction site clearance. In this chapter, the average weight and gross volume tables for residential and non-residential buildings published by the Leibniz Institute for Spatial Development and Information System for the Built Environment were used to create Sankey diagrams for the respective material composition of the buildings (IÖR 2022). The existing tables show the standard size of buildings, their average weight, and the material composition depending on the use of the building and the year of construction.

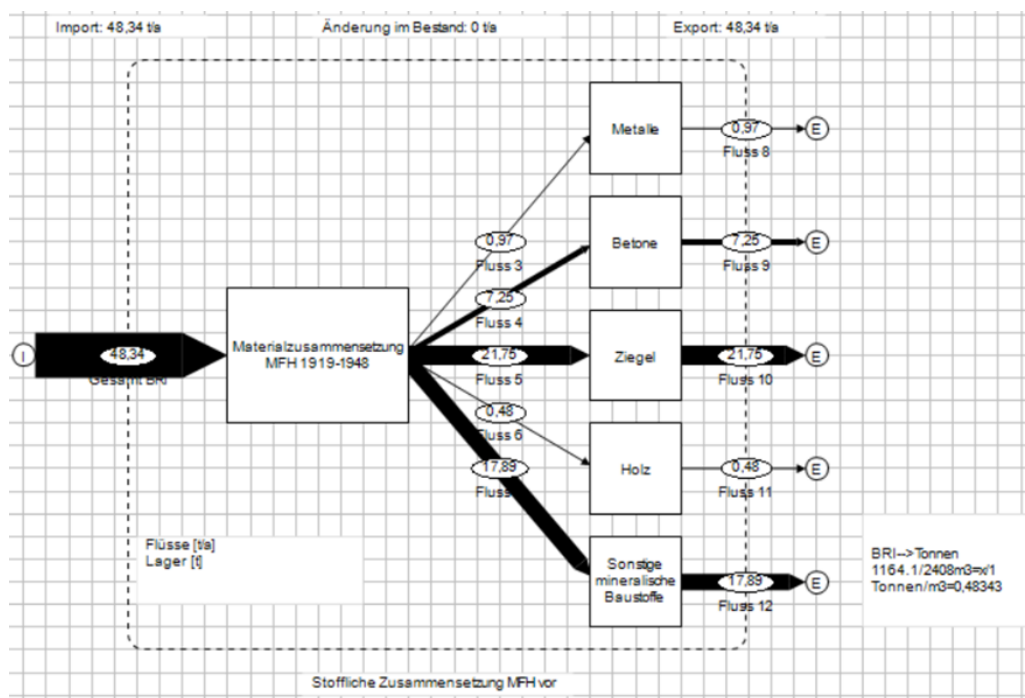


Figure 19: Sankey Diagramm Materialzusammensetzung MFH 1919-1949 (Eigene Darstellung mit der STAN-Software)

- **Material balance over time:** Considers the time and phases of the project to close the material flow model.

After the surface and quantity models have been developed, the information is coordinated with the project's time frame to develop the material flow model. This allows the amount of material to be produced to be overlapped with the quarters of the year in the schedule. This way, comprehensive material line is formed to understand the synergies between the required and available logistics areas and the existing material. A

cumulative material line is created from a cumulative amount of material, which considers the material from demolition and the built-in material in the new building per quarter. Thus, it is known how much material will be stored in each quarter simultaneously.

This chapter ends with a possible outcome, with proper recycling planning, in which a model recycled concrete building is developed. The case study is just a project in the planning stage, following guidelines and maximizing recycling without jeopardizing the project's feasibility (Figure 27).

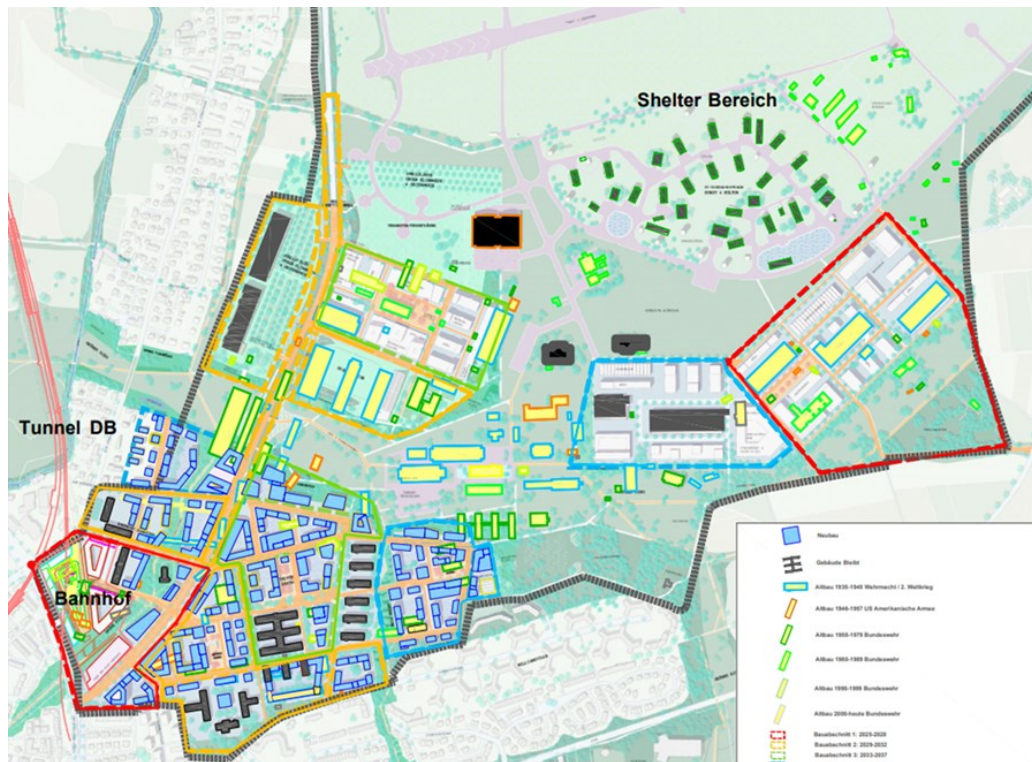
## **6. Results of the Material Flow Model in the Erding Air Base**

In the Erding district, northeast of Munich, a major urban development project is underway to convert the Erding air base to civilian use. With the conversion from military to civilian use, the area falls back under the municipal planning authority of the city of Erding (Stadt Erding 2020). The project aims to become one of the most sustainable urban developments in the country through the application of recycling strategies and the integration of green and blue infrastructure into the built environment. The military base has a total size of about 413 ha, while the deepening area considered in the architectural competition and this paper is about 190 ha. With its total area, the Erding Air Base is currently the largest conversion area in Bavaria and one of the largest in Germany. (City of Erding 2019). Furthermore, the project can contribute to sustainable development by recycling construction and demolition material into recycled aggregate. Therefore, the material flow model developed in the previous chapter is used for this project. All development plans for the new project have a total area of 90.8 hectares on which the development is to take place.

The nearest concrete plant is 5 km away, the nearest landfill is 46 km away and the nearest recycling plant is 34 km away. If the material is transported to the construction site for the new building and dumped after its service life or taken to a recycling plant, each cubic meter of material must be driven around 40 km. For this reason, it is proposed to set up a recycling center within the FHE area to produce the secondary raw materials on-site and reduce the import and export of materials from outside.

A digital project model is created to apply the quantity model. The CAD layers provided by the city of Erding, in which the buildings are represented as line bodies, are the basis of the model. Since the four development plans in the deepening area are the only areas with specific information about the constructive measures to be taken, these areas are used to calculate the soil excavation. The four development plans result in a total green area of 38.2 hectares. Since there is still no information about which areas will be preserved and in which complete disposal of explosive ordnance will be carried out, it is

assumed that 30% of the green spaces in these development areas will be preserved without any intervention. This way, within the development plans, an area of 26.7 ha of green space is calculated, where explosive ordnance disposal and soil excavation will be carried out. Due to the significant presence of bomb craters and the highly contaminated areas, an excavation depth of 2 m is recommended for complete explosive ordnance disposal (category 5 of the BFR ordnance clearance leaflet). This results in a quantity of soil from the excavation of around 535,000 m<sup>3</sup>, corresponding to a total mass of around 1,070,000 tons of soil.



**Figure 30: Baustellenleitplan FHE (eigene Darstellung nach Stadt Erding)**

From the rubble, it is estimated that around 7,000 tons are metal, 42,000 tons of recycled concrete granules, 76,000 tons of bricks, 3,000 tons of wood, and 109,000 tons of other mineral building materials. To approximate the determination of the quantity of rubble from the basement, it is assumed that only residential and office buildings (administration) have an underground basement (a total of 27 buildings that will be demolished). A layer is created for this by AutoCAD with a basement height of 3 m and concrete walls are added. This results in a gross volume of 41,000 m<sup>3</sup> in the basement. This results in a total gross volume of the buildings of 1,006,000 m<sup>3</sup>. Multiplied by the factor 0.394 tons per m<sup>3</sup> gross volume, this results in 16,000 tons of rubble, concrete broken concrete. This increases the proportion of concrete granules that can be used on-site from 42,000 tons to 58,000 tons.

To calculate the amount of asphalt, all existing traffic areas south of the runway in the FHE (depression area) are considered. Using a layer created in AutoCAD, an area of 190,000 m<sup>2</sup> is calculated for the roadways in the area. Assuming an asphalt layer thickness of 22 cm, the volume of road material is 42,000 m<sup>3</sup>. Based on a density of 2.2 t/m<sup>3</sup>, a total of 92,000 t of asphalt is calculated. In this case, the roads are assumed to consist of a bituminous, possibly tarry, base and surface course. For the new construction of the traffic area, a total of 110,000 m<sup>2</sup> is needed. With a 22 cm thick layer of asphalt (RStO 12 - Bk 3.2 main shopping streets), the asphalt volume is 24,000 m<sup>3</sup>. With a density of 2.2 t/m<sup>3</sup>, a total of 53,313 t of asphalt is calculated for the new roads. The total length of the routes is 10,850 m.

The quantity model estimates a total of 1.55 million t of raw materials accrue from clearing the construction site (350,000 t of rubble and 1.1 million t of soil and 100,000 t of asphalt). Of this, 600,000 t have to be disposed on landfills due to various types of pollution and 750,000 t of material has to be imported as aggregate for the new building. This is how the RBM for the new building can be produced.

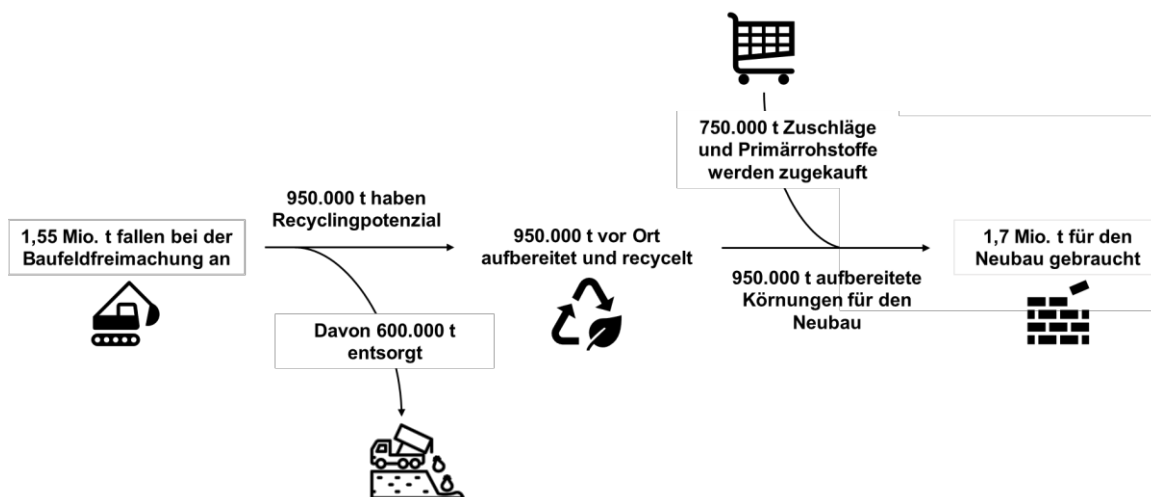


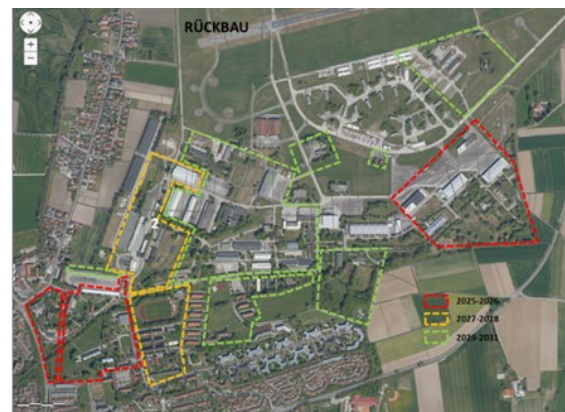
Figure 39: Mengenzbilanz FHE

Due to its central location and good connection to the entire Erding Air Base, the Shelter area (approx. 21 ha) is suitable for constructing a recycling center (gravel processing, crushing, and screening plants, storage areas, mixing plant, and recycling hall). In addition, the shelters could also be used as covered storage areas for secondary raw materials, thereby avoiding weather-related hazards to the material (see Figure 44). It is essential to put the material and the recycling systems together as compactly as possible to avoid long transport routes and reduce the logistics effort. Since the approval process for this recycling center, as already described, is carried out following the Federal Immission Control Act, the relevant documents must be prepared for the application to be made under the BImSchG.



The demolition phases are divided into three sections. The first (red phase) starts in 2025 and ends in 2026, the second (yellow phase) starts in 2027 and ends in 2028 and the last (green phase) starts in 2029 and ends in 2031 (See Figure 44). The red phase must be completed on schedule, as this is the project area on which the new Erding central station will be built. The following calculations were made from various layers in AutoCAD, overlaying the buildings, the underground structures, and the demolition phases to calculate how much volume the buildings occupy in each demolition area. The buildings and the underground structures in the red demolition phase (2025-2026) have a total GRI of 317,000 m<sup>3</sup>. The yellow demolition phase (2027-2028) has a total gross volume of 171,000 m<sup>3</sup>. Finally, the green demolition phase (2029-2031) has the most significant gross volume, with a total of 517,000 m<sup>3</sup>. Therefore, a total gross volume of 1,005,000 m<sup>3</sup> is calculated, so the red demolition phase has 31.5% of the gross volume, the yellow demolition phase 17.1% and the green demolition phase 51.4%. In this way, the estimated total material quantity of 331,000 t (see Table 5) results in a total quantity of 104,000 t for the first dismantling phase (red), 57,000 t for the second dismantling phase (yellow), and 170,300 t for the last dismantling phase (green).

	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031
Rückbauphase 1							
Rückbauphase 2							
Rückbauphase 3							



**Figure 55: Rückbauphasen am FHE (Stadt Erding)**

On-site material recycling could save up to 1.68 million kilometers in truck journeys. For comparison: the earth's circumference at the equator is 40,000 km (Schüttler 2014). The saving of 1.68 million travel kilometers saves around 42 "circumnavigations of the world." The recycling potential of the 950,000 tons of material can save up to 48 km of transport per truck by processing the material "on-site". This way, up to 45,600,000 ton-kilometers (tkm) can be saved. According to Statista, the level of greenhouse gas emissions in German freight transport in 2019 for trucks was 113 g/tkm (0.000113 t/tkm) (Statista 2019), resulting in a total reduction in greenhouse gas emissions (CO<sub>2</sub> equivalent) of 5,152.8 tons through on-site recycling. The German average for 2021 shows that one person produces 11.17 t of greenhouse gases in CO<sub>2</sub> equivalents per year (Statista

2022). Thus, on-site recycling in the FHE project compensates for the annual CO<sub>2</sub> emissions of 462 people through the reduced transport of materials.

## **7. Discussion**

As shown in this paper, using a material flow model in the early stages of the project is an effective and relevant tool for designing sustainable strategies for its development. Therefore, this work develops a material flow model from a surface model, a quantity model, and a material balance over time to find synergies and possible difficulties that may arise in the project as early as the planning phase. This way, solutions can be sought at an early stage and corrections can be made in the on-site planning and operation of recycling.

It should be noted that demolition waste recycling is still in the early stages of development, so changes must be made in how projects are planned and managed. On-site recycling needs to be considered from the start, and it is important in project management that a recycling team is established from the planning phase to manage the material flows. In this way, this work offers a solution to enforce recycling on-site. However, this material flow model is only an initial recommendation, which should be supplemented with further information and ideas on-site as the recycling rate continues to increase. In this thesis, there are gaps between the theoretical part of how the material flow model can be integrated into a project to recover large amounts of recycling material on site and the realization of the project itself. This is just a recommendation to develop circular projects.

In validating the Erding Air Base model, gaps still need to be filled due to missing data. However, the more information is given about the project, the more specific the material flow model can be, so this model should be extended as soon as more specific information is available.

As can be seen from the geological profile of the Deutsche Bahn tunnel for the project "Lückenschluss Erding - Munich Airport," there is a "uniform horizontality of the Tertiary-Layer," where gravel predominates. This opens the possibility of processing and recycling the material produced during tunneling in the recycling center of the FHE. For this purpose, however, it is necessary to analyze the material quality and grain size distribution so that the excavated material, if it meets the requirements, can be used as RBM both in the FHE conversion project and in adjacent projects.

The question of control and planning is of crucial importance for the implementation of material recycling. It is important that the client is committed to applying this recycling



concept from the outset and that the project manager is aware that material recycling must be implemented. The project-specific framework conditions must be defined and clarified in the project's initial phase. Material properties must also be defined at the beginning of the project to implement project planning properly. To achieve an optimal result when using RBM, all those involved in construction should support recycling. Above all, the builder must be willing to incorporate these RBM into his property. In addition, all planners must take the specific properties of the material into account in their work steps. After all, you need a material supplier who fulfills the concrete properties required by the standards and a master builder who carries out the concrete work with the necessary care. However, these requirements must be met for all concrete structures (Kantonales Hoch-bau-amt Thurgau 2021).

RBM can also have an advantage over primary raw materials from an economic point of view. However, more detailed analyses must be conducted here to show the actual percentage advantage. Nevertheless, landfill fees, gasoline prices, and primary raw materials prices increase continuously, making RBM more competitive. Here lies a great opportunity for recycled materials since the project developer is often predominantly economically oriented. However, this shows that sustainable building can make sense not only from an ecological but also from an economic point of view.

Finally, knowledge about recycled building materials' properties and possible uses must be further developed. Projects often fail due to a lack of knowledge and understanding about recycled materials. In addition, the fear of procuring contaminated material from projects with secondary raw materials continues to restrict implementation. However, according to the state of the art, a proper investigation must be carried out before the material is processed. Then the contaminated materials must be separated and disposed of according to the guidelines to ensure that only non-contaminated material is introduced into the recycling loop. In the future, it will also be necessary to check which building materials are available on-site before planning the new building. In this way, the design of the new building can be based on existing materials.

This paper shows a sizeable environmental footprint left by using and exploiting of primary resources. Both in terms of emissions and energy consumption for the preparation and transportation of primary materials, as well as in the exploitation of finite resources, recycled materials are more environmentally friendly and promote more sustainable development. Therefore, it is crucial to make a shift to more environmental materials that are resource-saving and with a lower carbon footprint.

An important finding of this work is that there is a need for action in Germany regarding the regulations and standards for recycling materials. In Germany, there are legal

restrictions on recycled concrete. For this reason, it is important to consider the regulations of other countries, such as Switzerland, where the implementation of recycled concrete is prioritized and facilitated. In this way, the recycling process can be optimized and simplified. Thus, adapting the regulations and guidelines to current challenges, while promoting sustainable building.

Finally, this work shows that with the proper planning of a material flow model in the early phases of a project, large quantities of high-quality RBM can be processed, recycled, and used for the new building. In this way, the initial hypothesis is verified. However, a new research question arises that aims to produce a high-quality material based on the starting material of the existing building and the requirements and objectives of the new building. To process high-quality material, it is necessary to understand which material is produced from the dismantling and which material is required for the new building to be able to plan from the outset which grain fractions are processed on-site and which are imported. This question is of decisive importance for the operation of on-site material recycling. Taking the raw materials into account, more in-depth investigations are to be carried out to create a concept based on the temporal and spatial requirements to increase and optimize the recycling rate.

## **8. Conclusion**

This work shows the importance of developing a material flow model in the early phase of a project to increase the proportion of high-quality recycling materials and thus reduce the project's ecological footprint. In this way, an attempt is made to show the importance of the buildings and construction sites as raw material warehouses, as they contain valuable resources. During material recycling, these secondary raw materials are crushed, processed, sorted, and returned to the building materials cycle, such as recycled concrete, recycled substrates, or even liquid soil. As shown here, projects that recycle the material on-site lead to a significant reduction in environmental impact by significantly reducing the depletion of primary resources, promote the circular economy by closing the material loop, reduce land use by avoiding material mining and reduce CO<sub>2</sub> emissions by reducing truck rides to deliver primary materials and dispose of construction waste, which indirectly also reduces traffic, air pollution, and noise emissions. In addition, implementing material recycling is also in the public eye, promoting social participation in such projects. It is also shown that these projects make economic and ecological sense.

This work guides developing strategies for material recycling projects by developing a material flow model. First, a surface model must be created that analyzes all the physical factors of the construction site to make a spatial evaluation and identify possible

synergies and physical and logistical obstacles to the recycling of materials. Then a quantity model is developed to analyze the material sources, and the material flows during the project are calculated. For this purpose, tables from the Leibniz Institute for Spatial Development on the material composition of buildings according to the year of construction and use are used to calculate the material flows of the buildings from their gross volume. This information is presented using Sankey diagrams. Next, the material flow of the ground is calculated from the composition of the soils, the pollution in the soils, and the depth of the excavations. Finally, this model is supplemented by the time factor to analyze the accumulated material and the RBM needed for the new building depending on the time phase of the project. In this way, it can be determined whether sufficient storage and logistics space are available for recycling to assess the feasibility of material recycling on-site in the specific project. This model is complemented by creating a recycling center, which is crucial for closing the material loop. For this purpose, the Federal Immission Control Act (BImSchG) was examined to understand both the recycling center's approval process and its operating model.

This model is validated by the Erding Air Base project, which envisages the conversion of the current military base into a residential, mixed-use, and commercial area as well as open spaces from 2025. The project aims to be a pilot project for sustainable urban development through the appropriate use of recycled building materials. The surface model in the FHE shows the processing of the available surface information but reveals the missing specific information on the soil composition and the existing building cross-sections. The construction site master plan shows some possible points of conflict in the project, such as tree population vs. disposal of explosive ordnance, pipeline situation vs. clearing the construction site, and polluted material vs. material recycling. The volume model shows a rough estimate of the material accumulated when the building site is cleared: approx. 330,000 t of rubble (approx. 230,000 t with recycling potential), approx. 75,000 t of asphalt (recyclable) and approx. 1.1 million t of excavated soil (approximately 650,000 t with recycling potential). In addition, the material requirements for the new building are estimated, for which 630,000 tons of building material and around 55,000 tons of asphalt are expected. In addition, approx. 450,000 t for recycled substrates, 350,000 t for liquid soil, and 550,000 t for fill are expected. The material balance over time shows that approx. 104,000 t of rubble accumulates in the first phase of demolition, approx. 57,000 t in the second phase and approx. 170,000 t in the third and final phase of demolition. Based on a material transport balance sheet for the Erding Air Base project, it is assumed that by recycling and reusing a total of 950,000 t of material on site, 1,680,000 km of truck journeys can be saved, which corresponds to 42 journeys around the world. This way, up to 5.152 tons of CO<sub>2</sub>-eq can be saved only in transporting materials.

## **9. References**

See Chapter 8: Literaturverzeichnis

# Inhaltsverzeichnis

1.	Einführung .....	1
1.1.	Hintergrund, Problemstellung und Motivation .....	1
1.2.	Zielsetzung, Forschungsfrage und Hypothese .....	4
1.3.	Aufbau der Arbeit und Methodische Vorgehensweise .....	5
2.	Stand der Technik und Forschung zu Sekundärrohstoffe.....	7
2.1.	Aufbereitung und Herstellung von Sekundärrohstoffen .....	7
2.1.1.	Historische Entwicklung .....	7
2.1.2.	Stand der Forschung und der Technik zum Aufbereitungsprozess .....	8
2.1.3.	Allgemeine Einsatz- und Verwertungsmöglichkeiten für RC-Baustoffen .....	15
2.1.4.	Mischanlagen zur Aufbereitung von RC-Materialien .....	19
2.2.	Rahmenbedingungen und Richtlinien für die Verwendung von RC-Baustoffen .....	21
2.2.1.	Politische Ziele und rechtliche Vorgaben .....	21
2.2.2.	Umweltpolitische Rahmenbedingungen .....	22
2.2.3.	Ausschreibungen zur Implementierung von RC-Baustoffen .....	27
2.2.4.	Zustimmungen im Einzelfall (ZiE) .....	27
2.3.	Case Studies zur hochwertigen RC-Betonbauweise .....	29
3.	Stoffstrommodell unter Verwendung von RC-Materialien .....	33
3.1.	Flächenmodell .....	33
3.1.1.	Wichtige Faktoren der Baustelleneinrichtung .....	33
3.1.2.	Lagerflächen und Logistik .....	35
3.1.3.	Routen und Logistik des Materialtransports .....	35
3.1.4.	Erstellung eines Baustellenleitplans .....	36
3.2.	Mengenmodell (Aufbereitung und Wiederverwendung von RC-Materialien) .....	36
3.2.1.	Stoffströme durch Gebäuderückbau .....	38
3.2.2.	Schadstoffproblem .....	38
3.2.3.	Stoffmengen für Wohngebäude .....	39
3.2.4.	Stoffmengen für Nichtwohngebäude .....	41
3.2.5.	Mengenermittlung Boden .....	41
3.2.6.	Mengenermittlung Asphalt .....	42
3.2.7.	Aufbereitung von RC-Materialien und Prozessoptimierung .....	42
3.3.	Stoffbilanz im zeitlichen Verlauf .....	46
3.4.	Recycling-Zentrum .....	48
3.4.1.	Flächenbedarf .....	49
3.4.2.	Erforderliche Anlagen und Betriebsmodell .....	49
3.4.3.	Genehmigungsverfahren .....	49
3.5.	Erstellung eines Gesamtmodells .....	50
3.6.	Mögliches Ergebnis bei ordnungsgemäße Recyclingplanung: Musterhaus aus RC-Beton .....	52

4.	Anwendung des Stoffstrommodells am Beispiel des Fliegerhorsts Erding.....	55
4.1.	Projektbeschreibung Fliegerhorst Erding (FHE) und Ziele.....	55
4.2.	Flächenmodell .....	57
4.2.1.	Bestandsbeschreibung .....	57
4.2.2.	Erstellung eines Baustellenleitplans.....	58
4.2.3.	Leitungssituation.....	59
4.2.4.	Baumbestand und Grünflächen .....	60
4.2.5.	Routen und Logistik des Materialimports - Transportwege Rohstoffe....	61
4.2.6.	Fazit Flächenmodell.....	62
4.3.	Mengenmodell mit Mengenbilanz.....	62
4.3.1.	Boden .....	63
4.3.2.	Bauschutt.....	64
4.3.3.	Asphaltschutt .....	66
4.3.4.	Mengenmodell .....	68
4.4.	Recyclingkonzeption Fliegerhorst Erding .....	68
4.4.1.	Übersicht .....	68
4.4.2.	Überlagerung Baufeldfreimachung und Neubau .....	69
4.5.	Recycling-Zentrum Erding.....	70
4.6.	Stoffbilanz im zeitlichen Verlauf des Fliegerhorsts Erding .....	71
4.7.	Gesamtstoffstrommodell .....	73
5.	Wirtschaftlicher Vergleich von Primär- und Sekundärbaustoffen .....	75
6.	Zusammenfassung der Ergebnisse.....	79
7.	Fazit und Ausblick.....	81
8.	Literaturverzeichnis .....	I
9.	Abbildungsverzeichnis .....	VII
10.	Tabellenverzeichnis.....	IX
	Anhang .....	XI
	Kapitel 2.2. Rahmenbedingungen und Richtlinien für die Verwendung von RC- Baustoffen .....	XI
	Kapitel 2.3. Case Studies zur hochwertigen RC-Betonbauweise .....	XII
	Kapitel 3.2. Stoffströme durch Gebäuderückbau .....	XIII
	Kapitel 4. ....	XV
	Kapitel 4.6. Stoffbilanz im zeitlichen Verlauf des Fliegerhorsts Erding .....	XVIII

# Abkürzungsverzeichnis

BImSchG	Bundesimmissionsschutzgesetz
BImSchV	Bundesimmissionsschutzverordnung
B-Plan	Bebauungsplan
CO <sub>2</sub> -eq	CO <sub>2</sub> -Äquivalente
DBU	Deutsche Bundesstiftung Umwelt
DIN	Deutsches Institut für Normung
EN	Europäische Norm
FHE	Fliegerhorst Erding
m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>	Quadratmeter/Kubikmeter
Mio.	Millionen
PHTG	Pädagogische Hochschule Thurgau
R-Beton	Ressourcenschonender Beton
RC-Beton	Recyclingbeton
RC-GK	RC-Gesteinskörnungen
RGK	rezyklierte Gesteinskörnung
RW	Richtwerte
SDG	Sustainable Development Goals
THG	Treibhausgas
t	Tonnen
ZiE	Zustimmung im Einzelfall
ZTV	Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen





# 1. Einführung

## 1.1. Hintergrund, Problemstellung und Motivation

Die Baubranche ist der größte Verbraucher von Ressourcen weltweit. Eine UNEP-Studie zeigt, dass diese Industrie weltweit für den Verbrauch von mehr als einem Drittel aller Ressourcen verantwortlich ist (UNEP 2020). Der Bausektor ist für 40 % der Treibhausgasemissionen verantwortlich. Allein die Zementherstellung verursacht 7 % der THG-Emissionen. (Bergmeister 2021)

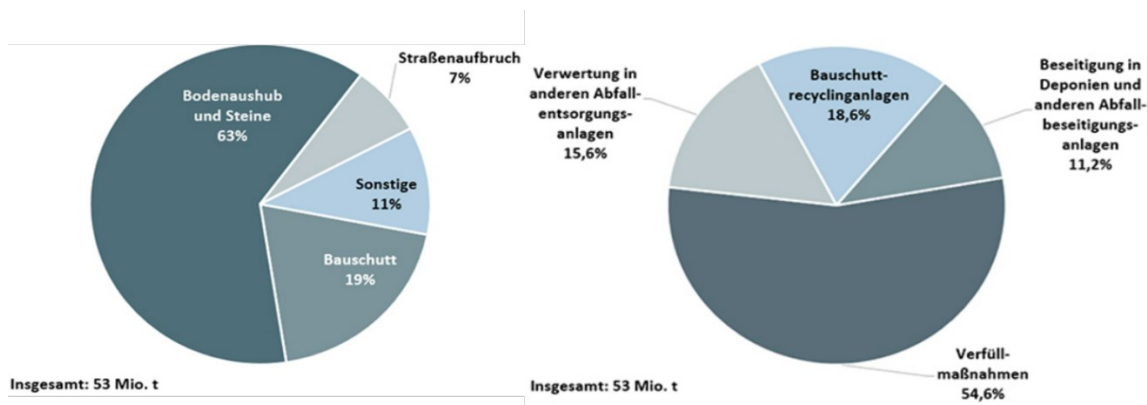
In Deutschland entfallen mehr als 35 % des Endenergieverbrauchs auf den Gebäudesektor (dena 2021). Etwa 50 % der Rohstoffe werden in diese Branche verbraucht, wobei der Bausektor in Deutschland für die Nutzung von 60 Hektar pro Tag verantwortlich ist (NABU 2019). Auf diese Branche entfiel 2019 der größte Anteil am gesamten Abfallaufkommen in Deutschland (55,4 %), rund 231 Millionen Tonnen (Umwelt Bundesamt 2021a).

Laut einer Siemens-Studie aus dem Jahr 2011 werden im europäischen Schnitt für jeden Euro Bruttoinlandsprodukt 326 Gramm CO<sub>2</sub> emittiert; für München liegt der Wert bei 147 Gramm. (Siemens AG 2011). Damit bekennt sich die Stadt München zu einer nachhaltigen und klimafreundlichen Zukunft. Die Position der Stadt wird durch ihre Verpflichtung im Jahr 2019 unterstrichen, sich aktiv an der nachhaltigen Zukunft der Stadt zu beteiligen und einen Plan zur Klimaneutralität bis 2035 zu erarbeiten (Landeshauptamt München 2017).

Eine wichtige Maßnahme auf regionaler Ebene zur Förderung des Klimaschutzes ist die Verringerung der Ausbeutung mineralischer Rohstoffe. Durch den Beschluss des Bayerischen Landtags von 2017 wird der Einsatz von Sekundärmaterialien gefördert, indem die Landesregierung aufgefordert wird, bei Landesbauvorhaben mehr Recyclingbaustoffe einzusetzen (Bayerischer Landtag 2017). Aufbereitete mineralische Baustoffe, die für eine Wiederverwendung geeignet sind, werden als Recycling-Baustoffe (RC-Baustoffe) bezeichnet (Bayerisches Landesamt für Umwelt 2005).

Sowohl lokal als auch global gewinnt die Forderung nach einem ressourceneffizienten Systemwechsel an Dynamik und Verbindlichkeit, z.B. mit der Einführung der europäischen Abfallrahmenrichtlinie 2008 und der Änderung des Kreislaufwirtschaftsgesetzes (KrWG) 2012 sowie der Aktualisierung des Deutschen Ressourceneffizienzprogramms (ProgRess II) 2016.

Der größte Abfallstrom in Deutschland und Bayern sind Bau- und Abbruchabfälle (btu 2020). Laut dem Bayerischem Landesamt für Umwelt wurden im Jahr 2018 in Deutschland 228 Mio. t (davon 53 Mio. in Bayern) Bau- und Abbruchabfälle entsorgt (Bayerisches Landesamt für Umwelt 2018). Von den Bau- und Abbruchabfällen entfielen 33,4 Mio. t auf die Fraktion Boden, Steine und Baggergut, 10,1 Mio. t auf die Kategorie Bauschutt, 3,7 Mio. t auf Straßenschutt und 5,8 Mio. t auf Bauholz, -glas und sonstige Bauabfällen (Bayerisches Landesamt für Umwelt 2018).



**Abbildung 1: Prozentuale Zusammensetzung der Bauabfälle in Bayern 2018 (links) und Prozentuale Verteilung über die verschiedenen Entsorgungswege für Bauabfälle in Bayern 2018 (rechts) (Bayerisches Landesamt für Umwelt 2018)**

Von diesen 53 Mio. t Bauschutt wurden laut Bayerischem Landesamt für Umwelt im Jahr 2018 28,9 Mio. t Abfall in Straßenbau oder andere Bauwerke verfüllt, 8,3 Mio. t in sonstigen Entsorgungsanlagen verwertet, rund 5,9 Millionen Tonnen wurden auf Deponien entsorgt, und nur 9,86 Mio. t in Bauschuttverwertungsanlagen recycelt (Umwelt Bundesamt 2021b). Die Bauschuttverfüllung in Bauwerken gilt als stoffliche Verwertung, wird jedoch dem Rohstoffpotential nicht gerecht (Downcycling). Dies ist keine nachhaltige Strategie, da durch Downcycling bei der Wiederverwendung eines Produkts Qualitätsverluste entstehen. Dies zeigt das große Problem der Abfallerzeugung durch den Bausektor und die Herausforderung, der diese Industrie gegenübersteht, diese Materialien zu verwerten.

Auch die Frage der Gewinnung von Primärrohstoffen in Deutschland ist eine große Herausforderung für die nachhaltige Zukunft des Landes. In Bayern werden jährlich rund 150 Millionen Tonnen mineralische Rohstoffe abgebaut. Etwa 90 % werden im Bausektor verwendet, darunter 85 Millionen Tonnen Sand und Kies und etwa 35 Millionen Tonnen Naturstein. Der jährliche Flächenverbrauch in Bayern für die oberirdische Gewinnung von Baumineralien beträgt ca. 900 ha, was einer Fläche von etwa 1.260 Fußballfeldern pro Jahr entspricht. (LfU Bayern 2017)

Die Hauptprobleme der Bauindustrie, mit denen sich diese Arbeit auseinandersetzt, sind die Ausbeutung endlicher Ressourcen wie mineralischer Rohstoffe und die Produktion großer Mengen von Bauabfällen und deren Bewirtschaftung.

Die stoffliche Materialverwertung vor Ort bedeutet auch einen Mehraufwand in der Planung der Ausführung des Projektes, da diese Materialien bis zur Wiederverwendung auf dem Grundstück gelagert und aufbereitet werden müssen. Dies führt zu großen Haufwerken auf der Baustelle und zu einem logistischen Problem, da im Voraus geplant werden muss, was und wann mit den Materialien zu tun ist. Eine ständige Herausforderung für Projektentwickler bei der Umsetzung des Materialrecyclings vor Ort ist das Fehlen eines strukturierten Plans von den frühesten Phasen des Projekts an, wie die Materialien gelagert und wann und wohin sie innerhalb des Projekts bewegt werden.

Dies zeigt die Notwendigkeit, den Bau-/Rückbauprozess zu überdenken und neue Techniken zu entwickeln, um die Ressourcenverknappung und damit die Umweltbelastung zu reduzieren.

Im Dezember 2019 beschloss der Münchner Stadtrat, die Stadt bis 2035 und die Stadtverwaltung sogar bis 2030 zur klimaneutralen Stadt umzubauen. (Landeshauptamt München 2017). Damit sollen die THG-Emissionen bis 2030 auf 3 t CO<sub>2</sub>-Äquivalente pro Kopf reduziert werden (btu 2020). Zum Vergleich: laut einer Studie lag dieser Wert in Deutschland im Jahr 2021 bei 11,17 t CO<sub>2</sub>-Äquivalente pro Kopf (Statista 2022).

Die Verwendung von RC-Baustoffen fördert die ökologische Entwicklung in vielerlei Hinsicht. So werden beispielsweise die begrenzten natürlichen, mineralischen und nicht erneuerbaren Ressourcen geschont, indem Bau- und Abbruchabfälle wieder einem Lebenszyklus zugeführt und wirtschaftlich genutzt werden. Dadurch können endliche Primärrohstoffe in erheblichem Umfang ersetzt werden. Darüber hinaus trägt die Verwendung von RC-Baustoffen zur Erhaltung von Natur und Landschaft bei, da der Bodenabbau und Flächennutzung für die Gewinnung von natürlichem Kies und Sand reduziert werden. (Bayerisches Landesamt für Umwelt 2018)

Beim Recycling von Beton werden Gesteinskörnungen gewonnen, die als Zuschlagstoff im Neubeton eingesetzt werden kann, was es erlaubt, den Einsatz von limitierte Primärrohstoffen zu reduzieren. Das Umweltamt des Kantons Thurgau bringt es auf den Punkt: Durch den vermehrten Einsatz von Recyclingbeton sollen knappe Kiesressourcen geschont, die Landschaft geschützt, Stoffkreisläufe geschlossen und Deponien entlastet werden (Kantonales Hochbauamt Thurgau 2021).

Weitere Vorteile des Recyclings von Materialien vor Ort sind die Verringerung des Transportaufwands. Dadurch werden der Kraftstoffverbrauch und die CO<sub>2</sub>-Emissionen reduziert. (Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz 2017).

Die Motivation dieser Arbeit ergibt sich aus den oben beschriebenen Problemen. Durch das Recycling von Baumaterialien vor Ort soll nachhaltiges Bauen und damit die Entwicklung zu einer lebenswerten Zukunft gefördert werden.

## 1.2. Zielsetzung, Forschungsfrage und Hypothese

In vielen Fällen scheitert der Einsatz von Recyclingmaterialien auf der Baustelle oder wird aufgrund mangelnder Planung nicht umgesetzt. Um das Recycling vor Ort in einem Projekt auszuführen, ist es unerlässlich, sich in frühen Projektphasen mit all den Herausforderungen auseinanderzusetzen, die diese Bauweise mit sich bringt. Sowohl beim logistischen Aspekt als auch bei den erforderlichen Genehmigungen stößt das Recycling von Materialien auf mehr rechtliche Hürden, weshalb viele Projekte nicht mit Sekundärbaustoffen bauen und weiterhin Primärmaterialien verwenden.

Die Zielsetzung dieser Arbeit basiert auf 3 Hauptpunkten: Erstens, die Entwicklung eines Stoffstrommodells zur allgemeinen Verwendung, um die Recyclingquote auf Baustellen zu erhöhen. Gleichzeitig wird die Förderung der RC-Bauweise durch die quantitative Analyse der Stoffströme in der Vorplanungsphase angestrebt. Schließlich wird die Prüfung der ökologischen und ökonomischen Vorteile von RC-Baustoffen durchgeführt.

Im Fokus stehen dabei die Einsatzmöglichkeiten von RC-Baustoffen, insbesondere RC-Beton. Neben einem Überblick über die auf europäischer, Bundes- und Landesebene geltenden Regelungen sowie einer Überprüfung und Empfehlung der Verwendungsmöglichkeiten vorhandener Materialien soll diese Arbeit dazu beitragen, die notwendigen Maßnahmen bereits in der frühen Projektphase in die Wege zu leiten, um Material mit hoher Qualität vorzubereiten.

Zudem soll im Zuge der Arbeit die Wirtschaftlichkeit von vor Ort hergestelltem RC-Beton herausgearbeitet werden. Die Studie soll sicherstellen, dass die auf dem Gelände anfallenden Bau- und Abbruchabfälle sowie Bodenaushube so effizient wie möglich recycelt werden.

Aus dieser Zielsetzung ergibt sich die zentrale Forschungsfrage dieser Masterarbeit:

*Mit welchen Vorplanungsstrategien lassen sich große Mengen hochwertiger RC-Materialien, insbesondere RC-Beton, vor Ort herstellen und im Neubau verwenden?*

So wird in dieser Arbeit die Hypothese aufgestellt, dass durch eine geeignete Planung des Stoffstroms in frühen Phasen eines Bauprojekts die Schaffung und der Einsatz großer Mengen an hochwertigen RC-Materialien möglich ist.

### 1.3. Aufbau der Arbeit und Methodische Vorgehensweise

In erster Linie gibt die Arbeit einen Überblick über die Gewinnung und Bewirtschaftung von Primär- und Sekundärrohstoffen unter Berücksichtigung ihrer historischen Entwicklung sowie der Beziehungen und Überschneidungen der gemeinsamen Nutzung. Hier wird der Stand der Technik analysiert und die aktuell angewandten Gewinnungs- und Aufbereitungsverfahren untersucht. Dies wird durch die Recherche der Aufbereitung von mineralischen Baurestmassen gezeigt. Kapitel 2.2 gibt einen Überblick über die aktuellen Vorschriften mit RC-Materialien auf europäischer, nationaler und bayerischer Ebene und zeigt wichtige Schritte mit dem Umgang mit RC-Baustoffen in den letzten 20 Jahren. Hierfür werden lokale, nationale und internationale Richtlinien analysiert. Dazu wird die aktuelle rechtliche Situation zum Recycling von Baustoffen untersucht, wobei die Normen für die Umsetzung von Sekundärbaustoffen analysiert werden. Daran schließt sich ein Kapitel mit Best-Practice-Beispielen zu RC-Betonbau an, um einen Überblick über die Einsatzmöglichkeiten von RC-Baustoffen im Hochbau durch erfolgreiche Pilotprojekte in Europa zu geben.

Nach der Beschreibung des Standes der Technik, der rechtlichen Herausforderungen und der aktuellen Situation bei der Einführung von RC-Materialien im Bauwesen wird ein Stoffstrommodell entwickelt, das die bei der Baustelle anfallenden Materialien, deren Aufbereitung, die logistischen Herausforderungen und Strategien zur Aufbereitung und Verwertung vor Ort berücksichtigt, um diese RC-Materialien wieder als hochwertige Baustoffe für den Neubau einzusetzen. Dieses Modell basiert auf 3 Schritten: einem **Flächenmodell**, das die physikalischen Eigenschaften und Materialzusammensetzungen der Baustelle beschreibt, einem **Mengenmodell**, das Material-Stoffströme, ihre Herkunft und ihre Entwicklung zu Baustoffen zeigt, und einem **zeitlichen Stoffstrommodell**, das die Zeitphasen des Projekts in die bereits erwähnten Modelle einbezieht.

Nachdem das Modell entwickelt wurde und Synergien zwischen den wichtigen Themen gefunden wurden, um ein hochwertiges Recycling vor Ort zu erreichen, zielt die Arbeit darauf ab, die Hypothese durch die Untersuchung und Methodik des Materialmanagements im Projekt Fliegerhorst Erding (FHE) zu validieren. Das Projekt wird als Referenz für die Entwicklung des Stoffstrommodells und die Ermittlung von Schlüsselpunkten für die Konzeption einer Einführungsstrategie für Sekundärbaustoffe in einer frühen Phase verwendet. Es handelt sich bei dem Projekt FHE um die Entwicklung des derzeitigen

Militärstützpunkts von 413 Hektar in Erding in ein Wohn-, Misch- und Gewerbegebiet für zivile Zwecke (Moritz 2021). Ab 2025 entsteht hier zunächst auf ca. 200 Hektar im Südteil ein neues Wohnquartier. (Schlichenmayer 2021).

Für die Entwicklung eines RC-orientierten Stoffstrommodells ist es erforderlich, die Entwürfe, das Baujahr, die baulichen Gegebenheiten und die Ist-Situation der abzureißenden Gebäude zu analysieren. Durch die Erstellung von AutoCAD-Layern und die Verwendung von Baustoffzusammensetzungstabellen kann die Materialmasse jedes Gebäudes und des Straßenbaus geschätzt werden, um die Materialmenge zu berechnen, die vor Ort recycelt werden kann (Gruhler und Böhm 2011). Darüber hinaus wird eine Studie über den Baugrund erstellt, um die Geologie des Gebiets zu verstehen und eine mögliche Verwendung des Kiesbodens als Bauzuschlagstoff zu erwägen. Abschließend werden Kosten- und Wirtschaftlichkeitsstudien durchgeführt, in denen Szenarien mit und ohne Materialrecycling verglichen werden.

## 2. Stand der Technik und Forschung zu Sekundärrohstoffe

### 2.1. Aufbereitung und Herstellung von Sekundärrohstoffen

#### 2.1.1. Historische Entwicklung

Geschichte des Recyclings reicht bis in die Antike zurück, wo, wie Archäologen gezeigt haben, gesammeltes Glas und Metall eingeschmolzen und wiederverwendet wurden. "Die Antike war eine starke Recyclinggesellschaft", sagt Sabine Ladstätter, Leiterin des Österreichischen Archäologischen Instituts. (Brumme 2016)

Die große Wende in Deutschland für die stoffliche Verwertung begann nach dem Zweiten Weltkrieg. Aufgrund der schweren Zerstörungen in den Großstädten und der dadurch verursachten großen Menge an Trümmern sowie der Notwendigkeit, Städte schnell und effizient wieder aufzubauen, begann eine großflächige Wiederverwertung von Materialien, insbesondere von Trümmerschutt aus Ziegel. In diesen Jahren entstand eine Bewegung, in der sogenannte „Trümmerfrauen“ unbeschädigten Ziegel für die direkte Wiederverwendung sortierten und säuberten, beschädigte Ziegel zu Ziegelbruch und dann zu Ziegelbruchbeton verarbeiteten. Es wurde auch Mischbruch für Aufschüttungen und Füllstoffe verwendet. (Müller 2018)

Das „moderne“ Recycling von Baustoffen beginnt etwa in den 1980er Jahren, beispielsweise wurde in einer Recyclinganlage im Jahr 1984 ein „Aquamator“ eingesetzt (Krüger 1984), eine Maschine zum effektiven Auswaschen der in Mineralkörnern wie Sand, Kies und anderem Bauschutt enthaltenen Verunreinigungen.

Recycling ist heute ökonomisch und ökologisch sinnvoll und steht unter gesellschaftspolitischem Druck. Die Verwendung von recycelten Bauabfällen hängt vom Verhältnis zwischen der Nachfrage nach bestimmten Materialien und dem Angebot ab. Wenn die Nachfrage das Angebot übersteigt, wird Recycling zur Notwendigkeit. So sind beispielsweise der aktuelle Bedarf an Deponieflächen für die Abfallentsorgung, die regional benötigten und verfügbaren Mengen an Baumineralien sowie die benötigten und verfügbaren Transportkapazitäten wichtige Faktoren, die das Recycling vor Ort zunehmend fördern. (Müller 2018)

Die derzeitige Bedeutung des Recyclings geht über die Nachhaltigkeit eines Projekts hinaus, bis hin zu einer Notwendigkeit aufgrund der Knappheit von Primärrohstoffen und der Nachfrage nach diesen Materialien für Neubauten. Aus diesem Grund wird der

Bestandsbau nicht mehr nur als zu zerstörendes Gebäude betrachtet, sondern als Quelle für Sekundärrohstoffe analysiert. So entstand das Konzept, die Stadt als Rohstofflager zu sehen, das auf der Mentalität basiert, Gebäude als „Baustoffminen“ zu nutzen, um diese Materialien zu recyceln. Laut einer Veröffentlichung des Umweltbundesamtes aus dem Jahr 2010 beträgt die Gesamtmasse der Stofflager im Hochbau in Deutschland, allein im Bereich „Wohnen“ mehr als 10.128 Mio. t. (Schiller und Deilmann 2010)

### **2.1.2. Stand der Forschung und der Technik zum Aufbereitungsprozess**

In den letzten Jahren wurden Recyclingbaustoffe intensiv untersucht und Produkte kontinuierlich weiterentwickelt, um hinsichtlich Druckfestigkeit, Elastizität und Wasserleitfähigkeit die gleichen Ergebnisse wie Primärrohstoffe zu erzielen (Kantonales Hochbauamt Thurgau 2021).

Bei der Herstellung von Recyclingbaustoffen werden mineralische Reststoffe aus Bau- und Abbrucharbeiten sowie Bodenaushube als Rohstoffe verwendet, wodurch diese im Tief- und Hochbau sowie bei sonstigen Bauprodukten erneut zum Einsatz kommen können. Beim stofflichen Recycling werden recycelte Bau- und Abbruchabfälle zu neuen Produkten verarbeitet. Dies ermöglicht eine Entlastung der Ressourcenausbeutung und schont damit die schwankenden Kapazitäten von Deponien. (Bayerisches Landesamt für Umwelt 2018)

Sowohl in Deutschland als auch in Bayern ist der Bausektor der größte Abfallerzeuger. Dazu gehören mineralische Abfälle wie Aushub und Steine, Bauschutt (Beton, Ziegel, Fliesen, Keramik) und Straßenschutt. (Bayerisches Landesamt für Umwelt 2018)

Als Input für Recyclingmaterialien werden meistens folgende Sekundärrohstoffe verwendet:

- **RC-Betongranulat:** enthält hauptsächlich Betonbruch, Kies und Festgestein
- **RC-Mix:** Bauschuttgemisch, bestehend aus mehreren mineralischen Materialien, z. B. Ziegel, Fliesen, Beton usw.
- **RC-Ziegelsand und -splitt:** hauptsächlich Ziegel
- **Andere mineralische Werkstoffe:** Kies, Sand und andere Bodenaushubmaterialien

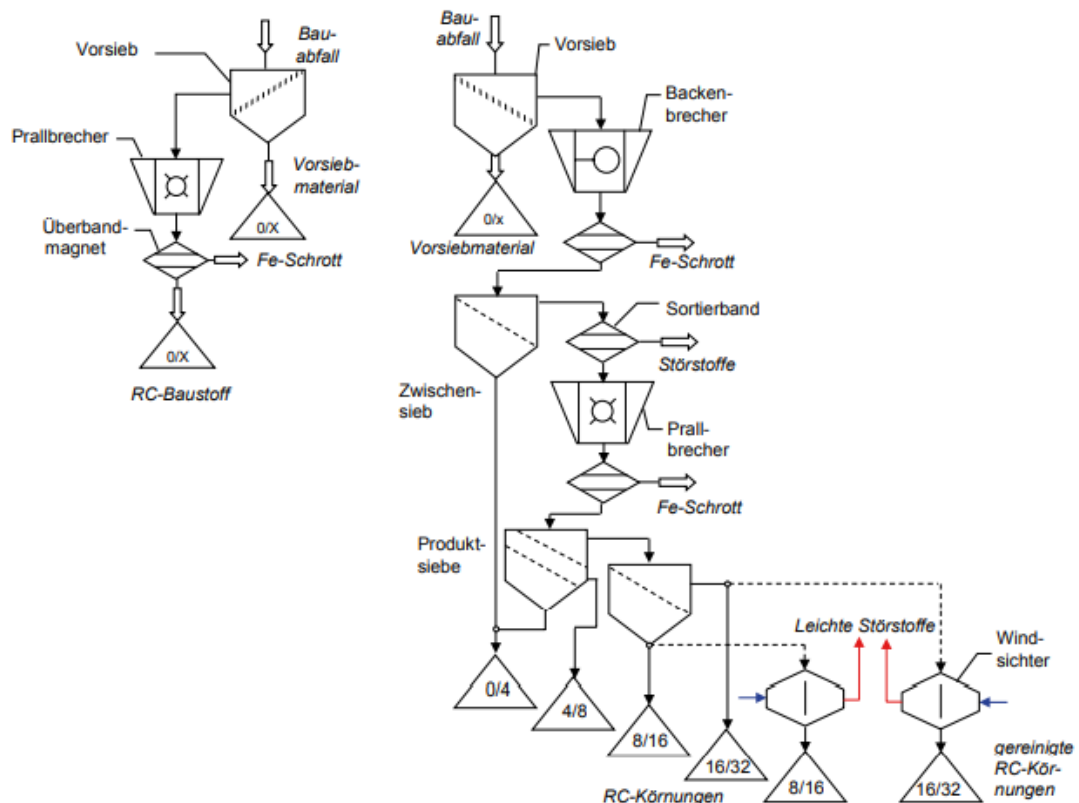
RC-Baustoffe müssen bestimmte ökologische und bauphysikalische Anforderungen erfüllen, die in DIN-Normen standardisiert sind, um eine sichere Verwertung und



langfristige Unbedenklichkeit zu gewährleisten. Die zulässigen Schadstoffgrenzwerte und Einbaumöglichkeiten in Bayern sind in der Richtlinie "Anforderungen an die Verwendung von Bauschutt in technischen Bauwerken" (RC-Baustoffrichtlinie) festgelegt. Daher werden RC-Baustoffe strenger überwacht und untersucht als Primärrohstoffe (Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz 2017).

Um hochwertige RC-Baustoffe herstellen zu können, ist ein kontrollierter Abbau oder ein selektiver Rückbau von Bauwerken (Gebäude, Straßen) erforderlich. Um einen möglichst sortenreinen Rückbau schaffen zu können, müssen in der Baustelle frühzeitig Vorarbeiten geleistet werden. Durch die Entfernung von Schadstoffen und die sortenreine Trennung von Materialfraktionen nach der Gewerbeabfallverordnung wird die Voraussetzung für eine qualitätsgerechte Aufbereitung zu qualitätsgesicherten RC-Baustoffen geschaffen (Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz 2017).

Zur Aufbereitung der Materialien kommen mobile oder stationäre Recyclinganlagen zum Einsatz, die für die Zerkleinerung, Siebung und Beseitigung von Störstoffen (z.B. Holz, Kunststoff und Metall) aus den mineralischen Abfallfraktionen zuständig sind. (Bayerisches Landesamt für Umwelt 2018)



**Abbildung 2: Vereinfachte Verfahrensfliessbilder einer mobilen Aufbereitungsanlage für mineralische Bauabfälle (links) und einer stationären Aufbereitungsanlage (rechts) (Müller 2018)**

Wie in Abbildung 2 zu sehen ist, beginnt der Prozess der Aufbereitung von Recyclingmaterialien mit einer zweistufigen Zerkleinerung (Prallbrecher, der einem

Backenbrecher nachgeschaltet ist), geht weiter mit der Störstoffsartierung auf dem Sortierband, dann folgt die Produktion von Korngruppen durch Vibrationssiebung und endet mit der Abtrennung leichter Verunreinigungen durch Windklassierung.

### **Materialgewinnung durch selektiven Rückbau**

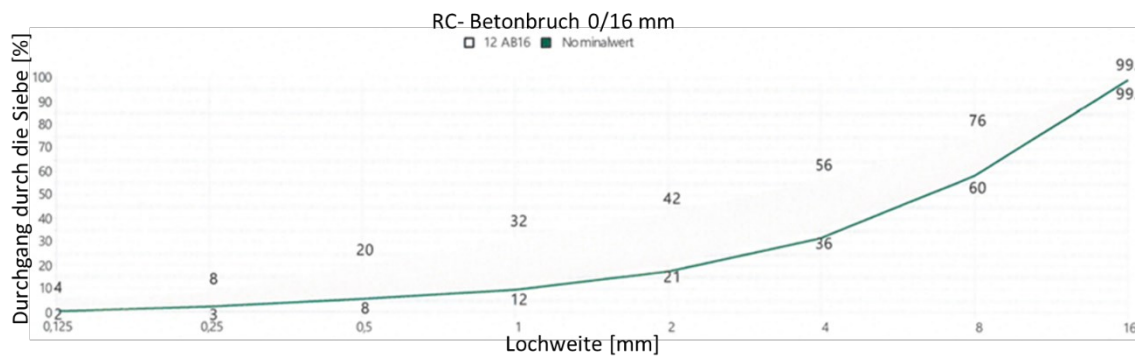
Selektiver Rückbau, auch systematischer, überwachter oder recyclinggerechter Rückbau genannt, ist der schrittweise Abriss eines Gebäudes mit dem Ziel, möglichst wenig Mischmaterialien zu erhalten. Beim Rückbau von Gebäuden werden zunächst alle Schad- und Störstoffe sowie Wertstoffe kontrolliert entfernt, um die Rohbaustruktur zu enthüllen (Müller 2018). Während des gesamten Prozesses wird angestrebt, das Gebäude so weit wie möglich zu demontieren. Nach diesem Schritt beginnt der Abriss des Gebäudes.

Auch beim selektiven Rückbau verbleiben Verunreinigungen im Abbruchmaterial, entweder weil sie so groß sind, dass sie von den Abbruchwerkzeugen nicht erfasst werden können, oder weil sie Teil der Verbundbaustoffe sind. Diese werden bei den nachfolgenden Sortiervorgängen entfernt. Der selektive Abbruch ermöglicht es, die Reinheit der Materialtypen wiederherzustellen, was die Herstellung von RC-Gesteinskörnungen mit den folgenden Verfahren erleichtert. (Müller 2018)

### **Zerkleinerung**

Zerkleinern ist das Zerschneiden eines Festkörpers in Bruchstücke durch die Einwirkung mechanischer Kräfte. Die Zug- oder Scherspannung muss größer sein als die Bindungskraft, um einen Bruchvorgang auszulösen. Bei der Zerkleinerung von Bauschutt entsteht ein Gemisch aus Partikeln unterschiedlicher Korngrößen (polydispers) im Mikro- bis Dezimeterbereich. Die Gemische werden durch die Partikelgrößenverteilung charakterisiert. Durch Zerkleinerung werden die Körner oder Kornfraktionen für die Verwendung als Basismaterial im Straßenbau oder als Zuschlagstoff in RC-Beton sortiert. (Müller 2018)

Als Beispiel zeigt die folgende Sieblinie die Laborergebnisse der Probe von gebrochenem 0/16 mm RC-Zuschlagstoff für eine bestimmte Betonrezeptur. Wie das Ergebnis zeigt, entspricht 0/4 mm 36 % der Gesamtmenge, 4/8 mm entspricht 24 % und 8/16 mm entspricht den restlichen 40 %.



**Abbildung 3: Gesteinskörnung DIN EN 12620/13043 - Siebung des Materials 0/16 (DMU Consult 2020)**

Die Energieflusskette der Brecharbeit beginnt mit der Energiezufuhr zur Antriebsmaschine (Motor), dann zu den Übertragungselementen (z. B. Getriebe und Kupplungen) und schließlich zur Arbeitsmaschine (Brecher). Backenbrecher und Prallbrecher werden hauptsächlich zur Zerkleinerung eingesetzt, bei der das Material einem Druck oder Schlag ausgesetzt ist. Backenbrecher können große Mengen an Material zu einem groben Endprodukt zerkleinern, während Prallbrecher ein feineres Produkt erzeugen. Für die einstufige Zerkleinerung werden beide Brechprozesse benötigt; der Vorbrecher ist der Backenbrecher und der Prallbrecher ist der Nachbrecher. Je nach Bauweise können auch Prallwalzenbrecher, Kegembrecher oder Mühlenbrecher für Sonderkonstruktionen eingesetzt werden. (Müller 2018)



**Abbildung 4: Brechanlage Rockster R1000S (Rockster Austria International 2020 (Rockster Austria International 2020))**

### Siebklassierung

Bei der Siebklassierung werden die Fraktionen der Mischungen Partikel unterschiedlicher Korngröße nach ihren geometrischen Eigenschaften getrennt. Die Trennung erfolgt

über Siebschalen mit geometrisch gleichen Öffnungen. Die Siebung erfolgt separat für den Bauschutt nach dem Zerkleinerer in grobes und feines Material.

Die Siebmaschine wird entsprechend den Feinheitsanforderungen des Siebmaterials ausgewählt. Die Begrenzung des Korngehalts, der Oberflächenfeuchtigkeit, der Kornform und der Schüttdichte sind weitere Faktoren, die eine wichtige Rolle spielen. Siebmaschinen werden dem technologischen Prozess der Aufbereitung von Bauabfällen vor oder nach der Zerkleinerung zugeordnet. Die Siebmaschinen können entsprechend der beabsichtigten Anwendungen ausgewählt werden. Gitter sind Siebe, die für das Vorsieben verwendet werden, bevor das Material in den Zerkleinerer gelangt. Nach der Zerkleinerung sind die Schwing- und Trommelsiebe im Prozessablauf geschaltet, um bestimmte Produkte mit unterschiedlichen Korngrößen herzustellen und zu sortieren. Für die Aufbereitung von Schutt werden Gitter, Trommeln und Schiesssiebe (eine Art von Schwingsieb) verwendet. Siebschnitte werden im Bereich von 2 bis 80 mm ausgeführt. (Müller 2018)

### **Sortierung**

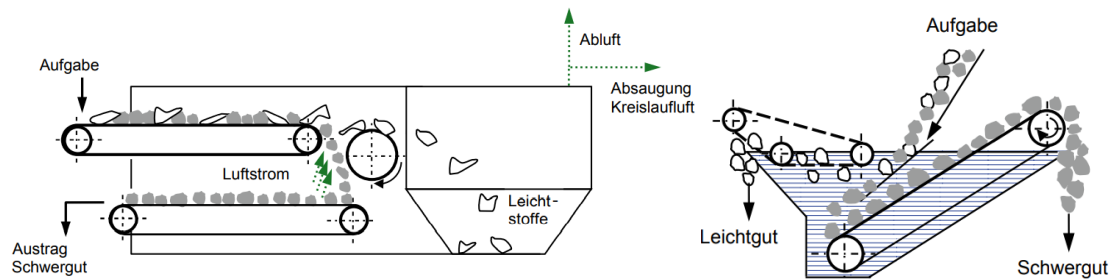
Die Sortierung ist die Trennung von Stoffgemischen nach Stoffarten anhand der typischen Eigenschaften der Stoffmerkmale durch Strömungskräfte, Schwerkraft oder Konstruktionselemente der Maschine. Beim Durchgang durch die Maschine werden Bauteile mit besonderen Sortiermerkmalen getrennt und entleert (Schadstoffe).

Sortiermerkmale sind Materialeigenschaften, die durch das technische Klassifizierungsverfahren zur Entfernung von Schadstoffen anerkannt werden. Bei nichtmetallischen Bauteilen ist die Schüttdichte die wichtigste Einstufungseigenschaft. Darüber hinaus sind Kornform, Farbe und Korngröße wichtige Eigenschaften.

Die erste Sortierstufe beginnt mit dem selektiven Rückbau, bei dem die zugänglichen Fremdstoffe bereits mit Baggern sortiert und separat gelagert werden. Während der Verarbeitung erfolgt die Sortierung vor und nach der Zerkleinerung. Vor der Zerkleinerung werden Fremdstoffe manuell oder mechanisch entfernt. Der anschließende Prozess erfolgt nach der Zerkleinerung durch mechanische Sortierprozesse in Massen- oder einzelne Körner.

Die Integration von Sortiertechniken in den Prozessablauf ist für die Herstellung von kontaminationsfreien Recyclingbaustoffen unerlässlich. Zur Entfernung metallischer Bestandteile befinden sich Überbandmagnete an verschiedenen Stellen. Windsichter und Nasssortierverfahren benötigen ein vorsortiertes Eingangsmaterial und sind daher der Produktsiebung immer nachgeschaltet. Die Windsichtung wird durch die Klassifizierung der Dichte von Materialien mit Luft als gasförmigem Medium gegeben, während die

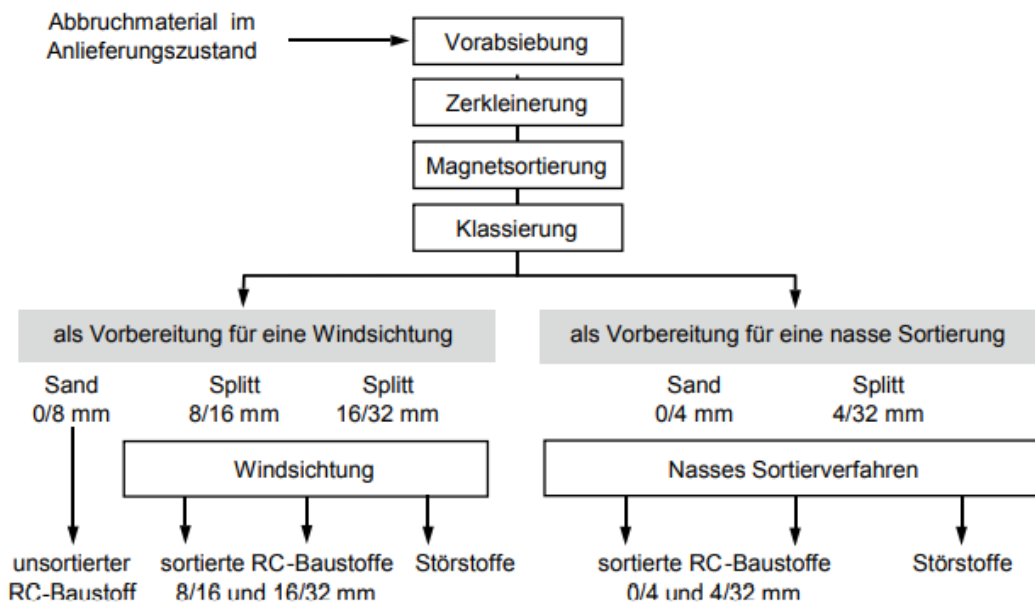
Nassklassifizierung auf der Schwerkraft und dem Auftrieb basiert, die auf Partikel in einer Flüssigkeit wirken.



**Abbildung 5: Prinzipskizzen von Windsichtern (links) und Prinzipskizzen von Leichtstoffabscheider mit Schwergutförderband (rechts) (Müller 2018)**

Dabei werden Partikel aus mineralischen Baustoffen von Leichtstoffen wie organischen und mineralischen Dämmstoffen und flächigen Störstoffen wie Papier und Folie getrennt. Beim nassen Sortierverfahren können feinere Partikel sortiert werden als mit der Windsichtung. (Müller 2018)

Diese Klassierverfahren (Klassierung nach Luft- und Nassverfahren) sind jedoch oft zeitaufwändig und teuer, was den Recyclingprozess vor Ort erschwert, und müssen durchgeführt werden, wenn bei der Baufeldfreimachung keine genaue selektive Entfernung der kontaminierenden Schichten durchgeführt wurde. Aus diesem Grund wird vorgeschlagen, bei der Baufeldfreimachung verstärkt auf den selektiven Rückbau Wert zu legen, um diese aufwändigen Prozesse zu erleichtern und eine optimale stoffliche Verwertung vor Ort zu fördern.



**Abbildung 6: Einordnung der Sortierung in den Ablauf der Aufbereitung von Bauabfällen (Müller 2018)**

Metallische Komponenten werden nach ihrer magnetischen oder elektrischen Leitfähigkeit klassifiziert. Mit der magnetischen Sortierung können die Kleinteile aus Eisen und Bewehrungsstahl sortiert werden. Die Effektivität der Sortierung hängt von der Stärke des Magnetfeldes im Bereich des Materialflusses ab. (Müller 2018)

Für den Fall, dass eine Kampfmittelbeseitigung im Gebiet stattfinden muss, muss durch Magnete sichergestellt werden, dass eventuelle Munitionsreste und Metallschrott abgetrennt werden. Diese Anlage muss in der Lage sein, den Boden zu sieben und den mit den Mineralschichten vermischten Metallschrott sicher zu entfernen.

### Gütesicherung

Um recycelte Baustoffe in Bauwerken einzusetzen, ist es wichtig, dass ihre Qualität geprüft, qualitätsgesichert und zertifiziert wird. Diese bewährten RC-Baustoffe können ohne zusätzliche Maßnahmen in technischen Bauwerken eingesetzt werden. Die ständige Qualitätsprüfung nach der Richtlinie RC-Baustoffe, auch Gütesicherung genannt, belegt die Bautaughkeit und Umweltverträglichkeit (Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz 2017).

Die Gütesicherung stellt sicher, dass die hergestellten RC-Baustoffe den geltenden Bau- und Umweltvorschriften entsprechen und ermöglicht somit eine ordnungsgemäße und unbedenkliche Verwertung im Sinne des § 7 KrWG. Bei Einhaltung der Vorgaben des Leitfadens ist davon auszugehen, dass es zu keinen nachteiligen Veränderungen der Wasserqualität in der Nähe des Vorhabens kommt, so dass keine zusätzliche wasserrechtliche Genehmigung für den Einsatz von Baustoffen erforderlich ist. Die Gütesicherung erfolgt nach DIN 18200 und TL Gestein-StB mit den entsprechenden Hinweisen

zur Konformitätsprüfung. Die Gütesicherungskriterien bestehen aus Eignungsnachweise, Eigenüberwachung, Fremdüberwachung durch eine anerkannte Prüfstelle und Produktzertifizierung. (Mettke 2017)

Die Einhaltung der Qualitätssicherung wird von einer unabhängigen Zertifizierungsstelle bestätigt. „Die Zertifizierungen sind deutschlandweit nach RAL 501/1 Recycling-Baustoffe oder in Bayern nach den Richtlinien des Baustoff Recycling Bayern e.V. möglich“ (Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz 2017). Das BRB eV-Zertifikat weist die Prüfungen und Normen für den zertifizierten Baustoff nach und erhöht damit die Rechtssicherheit für Endverbraucher bei der Verwendung von RC-Baustoffen. (Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz 2017)

### **Bautechnische Eigenschaften von RC-Beton**

Heute weist Recyclingbeton kleinere Abweichungen in Bezug auf Druckfestigkeit, Wasserleitfähigkeit und Elastizität gegenüber herkömmlichem Beton auf. Der Anteil an RC-Zutaten spielt jedoch eine Rolle bei den Materialeigenschaften von Recyclingbeton. So hat Recyclingbeton mit dem Anteil von bis zu 25 Masse-% an RC-Bestandteilen praktisch die gleichen Eigenschaften wie ein Primärbeton. Allerdings ist zu beachten, dass mit zunehmendem RC-Verhältnis die Festigkeitseigenschaften (Druckfestigkeit, E-Modul, Kriech- und Schwindmaß) stärker von denen des Primärbetons abweichen. (Kantonales Hochbauamt Thurgau 2021)

Je nach Verwendung des Bauteils müssen unterschiedliche Mischungen für den Recyclingbeton verwendet werden. Beispielsweise können Geschossdecken innerhalb eines Gebäudes, die eine hohe Festigkeit und einem höheren Elastizitätsmodul erfordern, mit einem niedrigeren RC-Verhältnis hergestellt werden, während Beton mit einem höheren RC-Verhältnis für Wände verwendet werden kann. (Kantonales Hochbauamt Thurgau 2021)

### **2.1.3. Allgemeine Einsatz- und Verwertungsmöglichkeiten für RC-Baustoffen**

RC-Baustoffe können in vielen Anwendungsbereichen eingesetzt werden. Derzeit werden diese Materialien hauptsächlich in drei Bereichen eingesetzt: Tiefbau, Hochbau und sonstige Bauwerke (Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz 2017).

Im Bereich Tiefbau werden diese Materialien vor allem im Straßen- und Wegebau sowie im Erd- und Deponiebau eingesetzt. Im Straßenbau können RC-Materialien in Frostschutzschichten, Schotterschichten, hydraulisch gebundenen Tragschichten, Deckschichten, Straßenunterbau, RC-Zuschlag in Stützbeton und Damm- und Rampenverfüllung eingesetzt werden. Bei vielen dieser Verwendungszwecke werden die

Materialien jedoch "gedowncycled", da sie einen geringeren Wert erhalten, indem sie nur als Füllmaterial verwendet werden, anstatt ihre bautechnischen Qualitäten voll auszunutzen. Im Erd- und Deponiebau können RC-Materialien als Lärm- und Sichtschutzwände, Deponieersatzbaustoffe, Baugrundstabilisierungen, Bodenauffüllungen, Einstreumaterial (Kabelsand), Polster und Polstermaterial, Garten- und Landschaftsbau (einschließlich Pflanzsubstrat) eingesetzt werden.

Darüber hinaus können im Hochbau Recyclingmaterialien aufbereitet und als Recyclingbeton oder ressourcenschonender Beton (kurz RC-Beton / R-Beton) sowie als Tragschicht unter der Sohle eingesetzt werden. Dafür wird der Recyclingprozess jedoch aufwändiger, um hochwertige Zuschlagstoffe zu schaffen.

Schließlich können diese Materialien auch für andere Bauzwecke verwendet werden, etwa für die Herstellung von Bauprodukten und Bauteilen. RC-Baustoffe können zum Beispiel zur Herstellung von Recycling-Betonsteinen und Pflastersteinen oder zur Herstellung von Sandsteinen für RC-Ziegel verwendet werden.

### **Relevante Aspekte bei der Herstellung von RC-Baustoffen**

Dieses Unterkapitel betrachtet die wichtigen Punkte, die bei der Verwendung von recycelten Materialien zu beachten sind. Es ist wichtig, die gewünschten Eigenschaften des Recyclingmaterials, der Rezeptur und der Zuschlagstoffe dieser zu verstehen.

#### **RC-Gesteinskörnungen**

Die deutschen DIN-Normen akzeptieren bisher Brechsand (< 2 mm) nicht in Recyclingbetonrezepturen. Aus diesem Grund müssen Anteile kleiner als 2 mm, die einen großen Teil des Brechschutts ausmachen (ca. 40%), von der Baustelle entfernt werden, da dies weder für die Herstellung von Beton Typ 1 noch Typ 2 zugelassen wird.

Aus technischen Gründen ist es einfacher, die Korngrößen 0/4 mm als die 0/2 mm zu sieben, so dass oft das gesamte 0/4 Material entfernt wird, was eine große Materialverschwendung und logistische Transportprobleme für die Materialentsorgung verursacht.

#### **Bindemittel (Zement)**

Andererseits ist die Suche nach einem klimaneutralen Beton eine große Herausforderung für Recyclingbeton. Das Fehlen einer Technologie, die Zement effizient recycelt, erzeugt die Notwendigkeit, Primärzement in RC-Beton zu mischen. Die Herstellung von Zement, der Beton als Bindemittel zugesetzt wird, findet in Drehrohröfen bei 1450 Grad Celsius statt, die enorme Mengen an Energie aus fossilen Brennstoffen verbrauchen, so dass Zement mehr als 7 % der weltweiten CO<sub>2</sub>-Emissionen ausstößt (Bergmeister 2021).



Es gibt jedoch mehrere aktive Forschungsprojekte, die darauf abzielen, das hochwertige Recycling von Beton zu optimieren und Zement freizusetzen, um Recyclingbeton mit geringeren CO<sub>2</sub>-Emissionen herzustellen. Beispielsweise versucht die Technische Universität Delft, einen „hochwertigen Recyclingprozess für Beton zu schaffen, indem alter Betonbruch in Zuschlagstoffe für neuen Beton und feines Zementleimkonzentrat getrennt wird, um neue Zementbindemittel mit niedrigem CO<sub>2</sub>-Gehalt herzustellen. Bei diesem Verfahren wird der zerkleinerte Beton zunächst schonend gemahlen, um den größten Teil des Zementleims und des feinen Sandes von der Oberfläche der Betonpartikel zu entfernen, und dann werden der Feinzement, das Holz und andere leichte Verunreinigungen in ein Zementsteinkonzentrat abgeschieden.“ (TU Delft 2013). Darüber hinaus gibt es mehrere Forschungsprojekte, um Alternativen zu Zementklinker zu finden. So hat das Karlsruher Institut für Technologie (KIT) gemeinsam mit Schwenk „Celitement“ entwickelt, ein Calciumhydrosilikat-Produkt, das in einem Druckbehälter bei Temperaturen von 200 bis 300 Grad hergestellt wird und damit deutlich weniger Energie verbraucht als herkömmlicher Zement. Diese Alternative hat auch eine andere chemische Struktur, sodass bis zu 50 % der CO<sub>2</sub>-Emissionen eingespart werden können. Das Material hat jedoch noch keine Lizenzen für eine Verwendung und Produktion im industriellen Maßstab. (Völpel 2020)

*Daher dient R-Beton zunächst der Reduzierung des Rohstoffeinsatzes und der Minimierung der Ausbeutung begrenzter Ressourcen, aber im Hinblick auf den ökologischen Fußabdruck ergeben sich die größten CO<sub>2</sub>-Einsparungen durch die Reduzierung der Transportwege. In Berlin beispielsweise gibt es viel Sand, aber gröbere Gesteinskörnungen müssen von weit her importiert werden, so dass viele LKWs für den Transport benötigt werden. Wird der Betonbruch vor Ort recycelt, kann dieser Materialimport vermieden werden. (Völpel 2020)*

### **Rezeptur Beton, RC-Beton nach Norm (Typ 1) und RC-Beton 100%**

Die folgenden Angaben basieren auf von im Labor (DMU Consult GmbH) errechneten Erfahrungswerten für unterschiedliche Betonarten. Ein Kubikmeter **Normalbeton** mit Widerstand C20/25 besteht zunächst aus 260 kg Zement, 6 kg Fließmittel, 895 kg Sand 0/4 mm, 384 kg Kies 4/8, 670 kg Kies 8/16 mm und 185 Liter Wasser. Der **RC-Beton nach Norm** Typ 1 enthält 290 kg Zement (mehr Zementmenge aufgrund eines höheren Porenanteils), 10 kg Fließmittel, 861 kg 0/4-Sand, 264 kg 4/8-Kies, 131 kg Kies 8/16, 633 kg Beton 8/16 RC und 189 Liter Wasser. Diese Mischung ermöglicht die Herstellung von Normbeton Typ 1 und Typ 2. Der **100 % RC-Beton** besteht aus einer Mischung von 320 kg Zement, 15 kg Fließmittel, 1990 kg Zuschlagstoff RC 0/16 mm und 220 Liter Wasser. Dieser Beton bewegt sich außerhalb der Normen, ist aber technisch möglich und kann durch Zustimmung im Einzelfall zugelassen werden.

**Tabelle 1: Betonrezept für 1 m<sup>3</sup> Normal-, RC- nach Norm, RC-Beton 100% (eigene Darstellung nach DMU Consult GmbH 2022)**

	Festigkeit	Zement [kg]	Wasser [l]	Fließmittel [kg]	Sand 0/4 [kg]	Kies 4/8 [kg]	Kies 8/16 [kg]	RC-GK 8/16 [kg]	RC-GK 0/16 [kg]	Rezeptgewicht [kg]
Normalbeton	C20/25	260	185	6	895	384	670	0	0	2400
RC-Beton (nach Norm)	C20/25	290	189	8	861	264	131	633		2376
RC-Beton (100%)	C20/25	320	220	10	0	0	0	0	1800	2350

Wie zu sehen ist, ermöglicht Recyclingbeton den Verbrauch von weniger Primärressourcen, indem der Anteil an RC-Gesteinskörnungen deutlich erhöht wird, was auch die Notwendigkeit erhöht, Zement aus Primärrohstoffen zu verwenden, der große Mengen CO<sub>2</sub> emittiert.

### RC-Substrate

Bei der Baufeldfreimachung ist der Bodenaushub oft die größte Materialquelle des Stoffstroms. Oftmals wird dieses Material einfach von der Baustelle entfernt, da nicht geplant wurde, was damit gemacht werden kann, und es eher als logistisches Problem denn als Potential gesehen wird, es vor Ort als hochwertiges Material für Grünflächen und Dächer als RC-Substrate wiederzuverwenden. Allerdings ist der Einsatz von RC-Substraten noch nicht geregelt, so dass dies auf empirischen Entwicklungen beruht. Die ZTV Vegtra regelt den Einsatz von Primärsubstraten. Dies lässt Raum für Optimierungen und die Erforschung der Möglichkeiten von recycelten Substraten. Diese recycelten Substrate bieten die Möglichkeit, den Recyclinganteil zu erhöhen, indem Materialien zugegeben werden, die im Standardfall von der Baustelle entsorgt werden, wie z. B. Brechsand, der derzeit nicht als Bestandteil von Beton verwendet werden darf. Dadurch können Mischungen aus Komponenten wie Brechsand, Erde, Oberboden (Humus), Ziegelgranulat (geeignet für ihre hohe Porosität und Wasseraufnahmefähigkeit), Rotlage durch Perlit, Quarzsand und anderen Bodenbestandteilen entwickelt werden, die dann für Grünflächen verwendet werden, z.B. im Garten- und Landschaftsbau.

### Flüssigboden

Flüssigboden ist ein kohäsives Material, das sich durch Reibung wieder verfestigt und für die Errichtung von unterirdischen Bauwerken verwendet wird. Es besteht aus einem Recycling-Gemisch aus Erdaushub, Zuschlägen (geringe Anteile von Zement, Beschleuniger etc.), Ziegelbruch, Grubensand, Wasser und ggf. Kalk. Dieser wird mit einem Verfahren erzeugt, das das temporäre Fließen von Böden und Zuschlagstoffen ermöglicht. Der Boden wird dann rückverfestigt, ohne dass eine externe Verdichtung erforderlich ist und ohne dass starre Strukturen gebildet werden. Dadurch kann der ursprüngliche Zustand ohne großen Aufwand wiederhergestellt werden. Aus diesem Grund eignet sich Flüssigboden ideal zum Verfüllen von Gräben mit unterirdischen Rohren und Versorgungsleitungen, wo die Überfahrt von LKWs erforderlich ist. (RAL 2014)

#### 2.1.4. Mischanlagen zur Aufbereitung von RC-Materialien

Eine Mischanlage ist eine Anlage zur Herstellung von Frischbeton und anderen Stoffmischungen. Die wichtigsten Komponenten einer Mischanlage sind der **Mischer**, in dem die Komponenten gemischt werden, die **Zementsilos**, in denen der Zement gelagert wird, die **Speicherkammer**, auch Boxen oder Reihensilos genannt, in denen die Zuschlagstoffe gelagert werden, um in die Mischung dosiert zu werden, und die **Anlagensteuerung**, wo der Prozess gesteuert und optimiert wird (König 2014). Bei der Auswahl einer geeigneten Mischanlage gibt es viele Parameter, die die Auswahl beeinflussen, wie unter anderem Materialzuschläge, Mischqualität, Gerätekapazität, Reinigungsmethode, Größe der Anlage und vor allem die maximale Tagesleistung. Es gibt viele Typen von Mischanlagen, wie unter anderem die Berg- und Tunnelbau Mischanlage, die Stationären Anlagensysteme, die Modulare Kompaktanlage, die Modulare Hochleistungsanlage, die Mobile Mischanlage und die Radmobile Mischanlage (Nisbau 2022). Die für diese Arbeit wichtigen Mischanlagen sind die Mobile-, Semimobile- und die Stationäre Mischanlage, weshalb sie näher analysiert werden.

##### **Mobile, semimobile und stationäre Mischanlagen**

Als Vergleichspunkt werden die verschiedenen Mischanlagen und die äquivalente Kapazität des Anlagenherstellers Hittmayr analysiert. Wie auf ihrer Website zu sehen ist, sind die hauptsächlich zum Verkauf stehenden Mischanlagen mobil, semimobil und stationär. (Hittmayr 2022)

Mobile Mischanlagen eignen sich für Projekte, bei denen es aus logistischen Gründen sinnvoll ist, mineralische Stoffe vor Ort zu mischen. Sie haben den Vorteil, dass sie mobil sind, d.h. sie lassen sich flexibel und einfach montieren und demontieren. Die als Referenz herangezogene mobile Anlage von Hittmayr weist eine Produktionskapazität von bis zu 50 m<sup>3</sup>/h und einen Doppelwellenmischer von 1 m<sup>3</sup> pro Mischdurchgang auf. Die Positionierung der Anlage im Bauvorhaben ist entscheidend, da es wichtig ist, einen Ort zu finden, an dem sie gut mit dem gesamten Gelände verbunden ist und sowohl an das Wassernetz als auch an den Stromanschluss angeschlossen ist.

Darüber hinaus weist die Semi-Mobile Mischanlage von Hittmayr eine maximale theoretische Leistung von 95 m<sup>3</sup>/h und eine Mischerkapazität von 2,25 m<sup>3</sup> pro Ladung auf. Dies eignet sich für Projekte, die zeitaufwändig sind, wie z. B. der Bau von Flughäfen, Siedlungen oder anderer großer Infrastruktur.

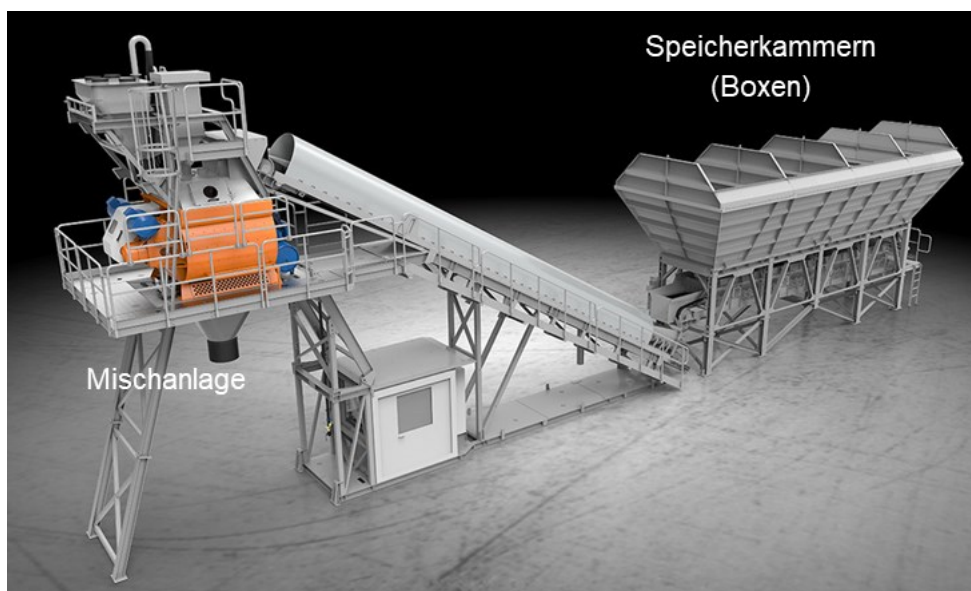
Schließlich hat die stationäre Mischanlage die größte Kapazität, die bis zu 120 m<sup>3</sup>/h mischen kann und eine Mischergröße von bis zu 3 m<sup>3</sup> hat. Die stationäre Anlage ist die herkömmliche Mischanlage bei den Betonwerken, wo Frischbeton produziert wird, der zu den verschiedenen Baustellen in der Umgebung transportiert wird. Bei stationäre

Recycling-Zentren ist auch eine stationäre Anlage geeignet, da sie in kurzer Zeit große Betonmengen produzieren kann.

Wie zuvor erläutert, ist die Mischanlage mit den verschiedenen Speicherkammer (Boxen) mit unterschiedlichen Zuschlagstoffen für die zu mischenden Materialien verbunden. Normalerweise ist die Mischanlage mit 4 oder 5 Speicherkammern mit unterschiedlichen Gesteinskörnungen (0/4, 4/8, 8/16, und 16/32) verbunden. Allerdings ist zu beachten, dass bei Großprojekten, bei denen auch andere RC-Baustoffe hergestellt werden sollen, mehr Boxen mit unterschiedlichen Bestandteilen wie Mutterboden, Erden, Humus usw. benötigt werden. Auf diese Weise können verschiedene Mischungen wie RC-Beton, RC-Substrate, Flüssigboden und andere RC-Baustoffe hergestellt werden.

*Um den Betrieb der Mischanlage zu optimieren, ist es wichtig, dass sie kontinuierlich produziert, um die Produktionskapazität zu steigern und die Arbeits-, Betriebs- und Mietkosten für Ausrüstung zu senken.*

Aus Erfahrungswerten ist bekannt, dass für die RC-Betonproduktion die Korngrößen 0/4 (Natarsand), 4/8 (RC), 8/16 (RC) und 16/32 (RC) geeignet sind, da sie einfacher herzustellen und leichter zu mischen sind. Für RC-Substrate kann Material mit einer Körnung zwischen 0 mm und 22 mm verwendet werden, was zusätzlich Aufwand im Aufbereitungsprozess spart.



**Abbildung 7: CIFAMOOVE 100- Semi-Mobile Betonmischanlage (Hittmayr 2022)**

## 2.2. Rahmenbedingungen und Richtlinien für die Verwendung von RC-Baustoffen

### 2.2.1. Politische Ziele und rechtliche Vorgaben

Ressourcenschutz ist ein zentrales ökologisches, politisches und soziales Thema. Gerade bei der stofflichen Verwertung ist das Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG) von besonderer Relevanz, da es ein zentrales Bundesgesetz des nationalen Abfallrechts ist. Das Gesetz trat 2012 in Kraft und soll durch die Förderung der Kreislaufwirtschaft die Schonung natürlicher Ressourcen und den Schutz von Menschen und Umwelt sicherstellen (BmUV 2012). Der § 6 des Kreislaufwirtschaftsgesetzes (KrWG 2012) regelt die Hierarchie der Abfallwirtschaft. Wenn Abfälle nicht vermieden oder wiederverwendet werden können, müssen sie immer stofflich verwertet werden. Das Abfallgesetz sieht kein gesondertes Genehmigungsverfahren für die Abfallverwertung vor. Nach § 7 Absatz 3 des KrWG müssen Abfälle fachgerecht und schadlos verwertet werden. Darüber hinaus ist nach § 8 KrWG eine möglichst hohe Verwertung von hochwertigen Materialien anzustreben (Bundesministeriums der Justiz 2012).

Das 2012 erstmals von der Bundesregierung verabschiedete Deutsche Ressourceneffizienzprogramm (ProgRess2012) und dessen Fortschreibung (ProgRess II 2016) betonen den beschleunigten Ausbau einer ressourceneffizienten Kreislaufwirtschaft (BRD 2015). Die Abfallhierarchie ist für die ordnungsgemäße Bewirtschaftung von Bauabfällen von entscheidender Bedeutung. Auf diese Weise können RC-Produkte (z. B. als Bauelemente) am Ende ihrer Nutzungsdauer direkt wiederverwendet werden. Die Anwendung erfolgt z.B. über die sogenannten Material- und Bauteilbörsen (Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz 2017).

Die 87. Umweltministerkonferenz (UMK) hat im Dezember 2016 einen Beschluss gefasst, der die Notwendigkeit eines verstärkten Einsatzes von RC-Baustoffen als Maßnahme zur nachhaltigen Schonung von Ressourcen, der Umwelt und wirtschaftlicher Aspekte bekräftigt (BRD 2016).

Mit der Neufassung der Gewerbeabfallverordnung (GewAbfV), die im August 2017 in Kraft getreten ist, wird in § 8 Abs. 1 die grundsätzliche Pflicht zur Trennung von Bau- und Abbruchabfällen in zehn Fraktionen festgelegt. Dabei handelt es sich um die folgenden mineralischen Fraktionen: Beton, Ziegel, Fliesen und Keramik (17 01), Boden (17 05) und Baustoffe auf Gipsbasis (17 08) (Bundesministeriums der Justiz 2017).

**Tabelle 2: Klassierung von Bauabfällen (Eigene Darstellung nach EAV 2016)**

4-steller Ebene (Gruppe)	6-steller Ebene (Abfallart)		
Code & Bezeichnung	U-Fakti	Code	Bezeichnung
17 01 Beton, Ziegel, Fliesen und Keramik	1,3	17 01 01	Beton
17 01 Beton, Ziegel, Fliesen und Keramik	1,3	17 01 02	Ziegel
17 01 Beton, Ziegel, Fliesen und Keramik	1,3	17 01 03	Fliesen, Ziegel und Keramik
17 01 Beton, Ziegel, Fliesen und Keramik	1,3	17 01 06*	Gemische aus oder getrennte Fraktionen von Beton, Ziegeln, Fliesen und Keramik, die gefährliche Stoffe enthalten
17 01 Beton, Ziegel, Fliesen und Keramik	1,3	17 01 07	Gemische aus Beton, Ziegeln, Fliesen und Keramik mit Ausnahme derjenigen, die unter 17 01 06 fallen
17 02 Holz, Glas und Kunststoff	0,5	17 02 01	Holz

## 2.2.2. Umweltpolitische Rahmenbedingungen

### Europaweiten Regelungen

Mit der Einführung der harmonisierten Europäischen Normen (hEN) im Jahr 2004 ist die CE-Kennzeichnung, die die Konformität des Produkts mit den geltenden Anforderungen der Europäischen Gemeinschaft symbolisiert, für die Verwendung von Bauprodukten obligatorisch geworden (BfGA 2022). In bestimmten Anwendungsbereichen gilt dies auch für RC-Baustoffe (Umwelt Bundesamt 2012). Dazu gehört auch die Verwendung von Gesteinskörnungen im Hochbau (DIN EN 12620). Für die folgenden Anwendungsbereiche bestehen harmonisierte europäische Normen und damit CE-Kennzeichnungspflichten:

- DIN EN 12620 Gesteinskörnungen für Beton
- DIN EN 13242 Gesteinskörnungen für ungebundene und hydraulisch gebundene Gemische für den Straßen- und Wegebau
- DIN EN 13043 Gesteinskörnungen für Asphalt und Oberflächenbehandlungen für Straßen, Flugplätze und andere Verkehrsflächen.

Produkte mit CE-Kennzeichnung können auf dem EU-Markt verkauft und verwendet werden, sofern die Bauprodukteverordnung wirksam wird. Qualitätsgesicherte, geprüfte und zertifizierte RC-Baustoffe sind natürlichen Baustoffen in Bezug auf die Erfüllung baulicher und ökologischer Anforderungen gleichwertig und sind „bau-, umwelttechnisch und regelwerkskonform verwendbar“ (Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz 2017).

Die Vorschriften für die Verwendung von Recyclingbeton gliedern sich in Richtlinien, die die Qualität der Gesteinskörnungen bestimmen und regeln, und Normen für den fertigen Mischbeton. Für Gesteinskörnungen wird auf europäischer Ebene die DIN EN 12620 verwendet, die die bautechnischen Eigenschaften von Gesteinskörnungen für die Herstellung von Betonen im Hochbau und die Anforderungen für den Erhalt von CE-Kennzeichnungen festlegt. Diese Kennzeichnung bestätigt die Einhaltung aller europäischen Rechtsvorschriften durch den Hersteller. Fertig gemischter Beton ist auf europäischer Ebene durch die DIN EN 206 definiert, die die Qualität und Festigkeit von Beton festlegt. (Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz 2017)

### **Deutschlandweite Regelungen**

Für die nationalen Normen werden die Qualität und die Anforderungen an die Gesteinskörnungen auf deutscher Ebene durch DIN- und DafStb-Richtlinien geregelt, um den Anforderungen an Umweltverträglichkeit und Qualitätssicherung zu entsprechen, um u.a. schädliche Reaktionen im Beton und umweltschädliche Auswirkungen zu vermeiden. Für die Normen des fertigen Mischbetons werden auf nationaler Ebene die DafStb-Richtlinie und die DIN 1045 verwendet, in denen die Grenzwerte für Recycling-Betonmischungen für verschiedene Arten von RC-Beton angegeben sind.

Diese Norm, DIN 1045-2, erläutert die beiden in Deutschland für den Hochbau zugelassenen RC-Betonarten. Diese sind **Typ 1** Betonsplitt und **Typ 2** Bauwerksplitt. Typ 1 erlaubt bis zu 45% recycelte Gesteinskörnungen, solange sie aus Betonschutt erstanden sind. Typ 2 erlaubt maximal 35% recycelte Gesteinskörnungen, da er höhere Mengen an Ziegel enthält, was seine bautechnischen Qualitäten mindert. (Müller 2018)

Die folgende Abbildung zeigt die Typ 1 und Typ 2 RC-Gesteinskörnungen.



**Abbildung 8: Typ 1 Betonsplitt; Typ 2 Bauwerksplitt (Mettke 2017)**

Für die RC-Beton-Rezeptur sollte grundsätzlich Natursand mit einer Korngröße von weniger als 2 mm anstelle des auf der Baustelle durch Zerkleinern des Bauschutts

hergestellten Brechsandes verwendet werden. Die Herstellung von Leicht- und Spannbeton mit einer rezyklierten Gesteinskörnung ist ausgeschlossen (Mettke 2017).

Daher muss der Anteil < 2 mm oft von der Baustelle entfernt werden, was eine logistische und wirtschaftliche Herausforderung darstellt. Bei der Zerkleinerung des Bauschutts zur Herstellung von Korngruppen der Gesteinskörnung wird ein großer Teil in kleine Partikelgrößen < 2 mm zerkleinert (ca. 40 %), was zu großen Mengen an Material führt, die derzeit von der Baustelle entfernt werden müssen.

Der Entwurf der DIN 1045-2, der im Juli 2022 veröffentlicht wurde, eröffnet jedoch die Möglichkeit, den Anteil der RC-Gesteine vor Ort zu erhöhen, indem erstmals die Zulassung von Brechsand < 2 mm in Beton des Typs 1 für RC-Betonrezepturen erwähnt wird, sofern er weniger als 20 % des Volumens ausmacht und aus der gleichen Produktion stammt wie die verwendeten rezyklierten Gesteinskörnungen des Typs 1 > 2 mm (DIN 1045-2 2022).

**Tabelle 3: Zulässige Anteile rezyklierte Gesteinskörnungen > 2 mm, bezogen auf die gesamte Gesteinskörnung (Vol.-%) (DIN 1045-2 2022)**

	Anwendungsbereich		Kategorie der Gesteinskörnung	
	Alkalirichtlinie <sup>a</sup>	DIN EN 206 und DIN 1045-2	Typ 1	Typ 2
1	WO	Karbonatisierung XC1	≤ 45 <sup>b</sup>	≤ 35
2	WF	Kein Korrosionsrisiko X0		
3		Karbonatisierung XC1 bis XC4	≤ 45	≤ 35
4		Frostangriff ohne Taumittleinwirkung XF und XF3		
5		Beton mit hohem Wassereindringwiderstand nach 5.5.3		
6		Chemischer Angriff XA1 <sup>d</sup>	≤ 25	≤ 25
7	WA <sup>c</sup>	XD1 und XD2 XS1 und XS2 XF2 und XF4	≤ 30	≤ 20

„Es dürfen rezyklierte Gesteinskörnungen des Typs 1 ≤ 2 mm eingesetzt werden, sofern sie aus der gleichen Produktion der verwendeten rezyklierten Gesteinskörnung Typ 1 > 2 mm stammen, für die die Anforderungen an die stoffliche Zusammensetzung nach DIN EN 933-11 nachgewiesen wurde“. (DIN 1045-2 2022)



## **Landesspezifische Regelungen (Bayern)**

Nach einer Vereinbarung zwischen dem „Bayerischen Umweltministerium und Wirtschaftsbeteiligten im Rahmen des Umweltpakts Bayern soll Bauschutt zu RC-Baustoffen für den Einsatz in technischen Gebäuden aufbereitet werden“ (Bayerisches Landesamt für Umwelt 2005). Ein Entschluss des Bayerischen Landtags vom März 2017 spricht sich für den verstärkten Einsatz von RC-Baustoffen anstelle von natürlichen Rohstoffen aus, um die natürlichen Ressourcen zu schonen, sofern dies ohne zusätzliche Kosten für den Bau erfolgt und Umweltschutzgründe, insbesondere der Schutz des Grundwassers, dem nicht entgegenstehen (Bayerischer Landtag 2017).

In Bayern dürfen Recycling-Baustoffe nur als geprüfte, qualitätsgesicherte und zertifizierte RC-Baustoffe eingesetzt werden. Die auf den jeweiligen Anwendungsfall zugeschnittenen Anforderungen sind in den Bayerischen Richtlinien für RC-Baustoffe und den Technischen Regeln für den Straßenbau definiert (Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz 2017).

Beim Verfüllen von Baugruben, Brüchen und Tagebauen in Bayern kommt der Verfüll-Leitfaden, auch Eckpunktepapier genannt, zum Einsatz, der die Anforderungen an Materialien und deren Belastungsgrenzen aufzeigt. Damit wird sichergestellt, dass die grundwasserschutzrechtlichen, bodenschutz- und abfallrechtlichen Anforderungen an die Verfüllung der Baugrube eingehalten werden. Dazu werden Materialeigenschaften vor Ort untersucht und eine Belastungsklasse zwischen Z0 und >Z2 festgelegt. Je nach Bauvorhaben wird Material mit unterschiedlichen Belastungsgraden für die Grubenhinterfüllung akzeptiert. Auf manchen Baustellen kann nur Z0-Material (unbelastet) für Verfüllungen benutzt werden. Auf anderen Baustellen kann z. B. Z1.1 auf Freiflächen und Z1.2 auf befestigten Flächen, z. B. im Straßenunterbau eingesetzt werden. Muss das belastete Material, wie z.B. Material mit Asbest, PCB oder andere Schadstoffe von der Baustelle entfernt werden, gilt die Deponieverordnung, bei der das Material von DK0 bis DK IV eingestuft wird. (Bayerisches Landesamt für Umwelt 2021)

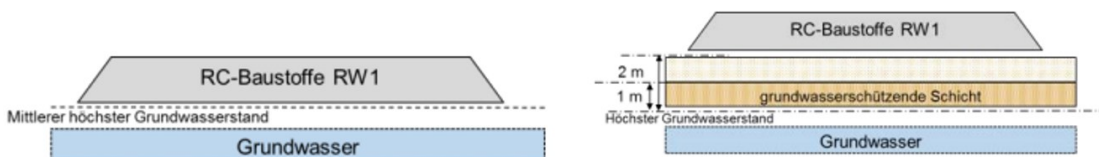
Für projektspezifische Aspekte ist es auch nötig, die Richtlinien des Bayerischen Wassergesetzes (BayWG) und der Bayerischen Bauordnung (BayBO) zu beachten, da diese zeigen, welche Regelungen, abhängig von den unterschiedlichen Herausforderungen, denen das Projekt ausgesetzt ist, zu beachten sind.

## **Einbaukriterien für RC-Materialien**

Um die beim Einsatz von Recyclingbaustoffen im Straßenbau in Bayern zu beachtenden wasserwirtschaftlichen Qualitätsstandards einzuhalten, werden RC-Baustoffe bezüglich Umwelтанforderungen nach Materialmenge und Grundwasserabstand in Richtwerte 1 (RW1-) und RW2-Materialien eingeteilt, je nach Schadstoffbelastungen (Bayerisches

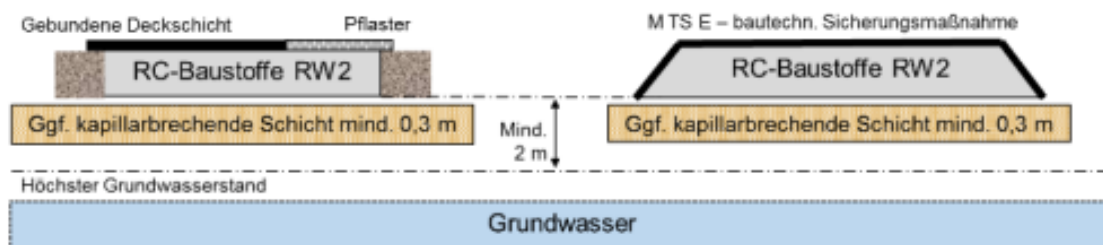
Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz 2017). Im Leitfaden RC-Baustoffe werden die für den Einbau geltenden Richtwerte und Einbaubedingungen für die zulässigen Stoffkonzentrationen im Eluat und den Stoffgehalt im Feststoff erläutert.

Beginnend mit dem Material RW1 kann dieses Material bei einem uneingeschränkten offenen Einbau außerhalb des mittleren höchsten Grundwasserspiegels eingesetzt werden, wenn die Bebauung 5.000 m<sup>3</sup> und bei einer Mehrfachverlegung im selben Baugebiet 10.000 m<sup>3</sup> nicht überschreitet (Siehe Abbildung 9). Dieses Material kann diese Werte in eingeschränktem offenem Einbau außerhalb von Überschwemmungsgebieten überschreiten (Menge > 5.000 m<sup>3</sup> und > 10.000m<sup>3</sup> im selben Baugebiet), sofern der Abstand zum Grundwasserspiegel mindestens 2 m beträgt und davon 1 m grundwasserschützende Deckschicht ist.



**Abbildung 9: Uneingeschränkter offener Einbau (links) und eingeschränkter offener Einbau (rechts) bei RW1-Material (Mettke 2017)**

RW2-Material darf nur mit technischen Sicherheitsmaßnahmen eingebaut werden. Im Straßen- oder Verkehrsbau kann es als gebundene Deckschicht, gebundene Tragschichten unter weniger durchlässigen Deckschichten und ungebundene Tragschichten unter wasserundurchlässigen Deckschichten eingebaut werden. Im Erdbau kann es als Sicht- und Lärmschutzwand sowie als Straßendamm eingebaut werden, sofern der Abstand von der Unterkante des RC-Materials bis zum höchsten Grundwasserspiegel mindestens 2 m beträgt. Bei einem Abstand von weniger als 3 m ist außerdem eine 0,3 m dicke kapillarbrechende Schicht nötig (Siehe Abbildung 10). Außerdem muss das Wasserwirtschaftsamt zur Abklärung der hydrogeologischen Situation hinzugezogen werden. (Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz 2017)



**Abbildung 10: Einbau mit technischen Sicherheitsmaßnahmen bei RW2-Material (Mettke 2017)**

## Zusammenfassung der Normen

Wie oben ersichtlich, gibt es die europäischen Normen, die deutschen Normen und die Normen der einzelnen Bundesländer. Es ist jedoch zu beachten, dass alle Vorschriften in Verbindung mit Bundesvorschriften und europäischen Normen gelten. Aus diesem Grund ist es für jedes Landesministerium wichtig, seine Regelungen mit den übergeordneten Regelungen in Einklang zu bringen. Im Anhang wird eine Zusammenfassung der zu beachtenden Normen und Richtlinien sowohl im Tiefbau als auch im Hochbau gezeigt (Abbildung 45 und Tabelle 9)

### 2.2.3. Ausschreibungen zur Implementierung von RC-Baustoffen

Nach § 45 KrWG und § 2 Abs. 2 BayAbfG sind öffentliche Auftraggeber insbesondere verpflichtet zu prüfen, ob RC-Baustoffe für Bauvorhaben verwendet werden können (Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz 2017).

Für diese Bauvorhaben ist es wichtig, dass die Ausschreibung produktneutral und nach den Vorschriften der Vergabe- und Vertragsordnung für Bauleistungen (VOB) erfolgt. RC-Baustoffe, die bestehenden technischen Regelwerken zur Erfüllung der Gütesicherung entsprechen, können ebenso gut als Primärbaustoffe eingesetzt werden. Lediglich in Trinkwasserschutzgebieten, Grundwasser- oder Karstgebieten ohne ausreichende Deckschichten ist der Ausschluss von der Verwendung dieser Materialien gerechtfertigt. Für Ausschreibungen werden vor allem die Texte des Gemeinsamen Ausschusses für Elektronik im Bauwesen (GAEB) und des Deutschen Instituts für Normung (DIN) verwendet (Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz 2017). Das folgende Beispiel zeigt eine Ausschreibungsvorlage zur Begünstigung der Verwendung von Recyclingmaterialien im Hochbau.

<ul style="list-style-type: none"><li>• <u>Hinweis in der Leistungsbeschreibung:</u></li></ul> <p>Besondere Anforderungen:</p> <p>Ortbeton ist als Primärbeton nach DIN EN 206:2017-01, DIN 1045-2:2008-08 und - soweit zulässig – unter der Verwendung rezyklierter Gesteinskörnung nach DIN EN 12620:2008-07 und DAfStb-Richtlinie „Beton nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 mit rezyklierten Gesteinskörnungen nach DIN EN 12620, Teil 1: Anforderungen an den Beton für die Bemessung nach DIN EN 1992-1-1“, Ausgabe Dezember 2010 herzustellen.</p>	<ul style="list-style-type: none"><li>• <u>Muster Ausschreibungstext:</u></li></ul> <p>Gewerk: 013 (STLB-Bau) Betonarbeiten</p> <p>013... .. m<sup>3</sup> Recycling-Beton ... €/m<sup>3</sup> ... €</p> <p>Ortbeton Außenwand Stahlbeton C 25/30, D 25 cm</p> <p>Ortbeton Außenwände aus bewehrtem Recycling-Beton C 25/30, XC4, rezyklierte Gesteinskörnung der Korngruppen 2/8 und 8/16, Typ 1, Kornrohdichte ....kg/m<sup>3</sup>, max. RC-GK 45 Vol.-%</p>
--	---

Abbildung 11: Ausschreibungsmuster für RC-Baustoffe im Hochbau (Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz 2017)

### 2.2.4. Zustimmungen im Einzelfall (ZiE)

Für den Fall, dass ein Produkt oder Bauteil (neue Materialien oder unregelmäßige innovative Konstruktionen) Abweichungen aufweisen oder keiner der im Land geltenden bautechnischen Richtlinien entsprechen, muss ihre Sicherheit auf andere Weise nachgewiesen werden. Entspricht das Bauteil oder Produkt nicht den Anforderungen der

Bayerischen Bauordnung (BayBO), muss eine baurechtliche Zustimmung im Einzelfall herangezogen werden. Diese Zulassung wird von der obersten Baubehörde des Landes erteilt und gilt nur für das beantragte Bauvorhaben. Je nach Ziel und Art der zu erreichenden ZiE ist es erforderlich, die Sicherheit des Produkts und/oder Bauteils durch den Nachweis seiner Eigenschaften durch spezifische Tests und Versuche nachzuweisen. (Bayerisches Staatsministerium für Wohnen, Bau und Verkehr 2018)

Voraussetzung für eine Zulassung im Einzelfall sind bei RC-Beton Laboruntersuchungen, die belegen, dass die geforderten Betoneigenschaften mit einer bestimmten Rezeptur erreicht werden können. Aufgrund des Aufwands beschränkt sich die Verwendung meist auf eine Betonart (MPM AG & prpm Architekten).

Zur Erlangung einer ZiE für z.B. Beton mit 100 % RC-GK werden in der Regel Prüfungen am Ausgangsmaterial (aufbereiteter Bauschutt), Prüfungen an Fließ- und Frischbeton sowie Prüfungen an Festbeton durchgeführt. Der erste Schritt nach dem Abbruch des Gebäudes ist die Überprüfung der abgerissenen und aufbereiteten RC-GK auf Verunreinigungen. Anschließend wird der RC-GK mittels Porositätstests auf Wasseraufnahme geprüft (DIN 4226-101 2017). Nach dem Mischen der Betonrezeptur werden die üblichen Frischbetonprüfungen durchgeführt, z. B. Luftporenanteil, Konsistenz zu verschiedenen Zeitpunkten und Rohdichte von Frischbeton (DIN 1045-2 2008). Sobald der Festbeton erreicht ist, werden an den Probekörpern erneut Prüfungen durchgeführt, wie z.B. Druckfestigkeit, Biegezugfestigkeit, Rissfestigkeit und E-Modul. Die Ortbetonherstellung von R-Beton wird durch Sichtprüfung der stofflichen Zusammensetzung von RC-GK, Bestimmung der Korndichte und Wasseraufnahme nach 60 Minuten, Bestimmung des Wassergehalts unter wechselnden Bedingungen von Feuchtigkeit, Luftgehalt in der Frischbetonprüfung und Betondruckfestigkeit nach 7, 28, 56 und 90 Tage geprüft (DIN EN 206 2016). Abbildung 12 zeigt ein Beispiel dafür, wie eine ZiE aussieht.



**Abbildung 12: Exemplarische Darstellung einer ZiE für RC-Beton für das Projekt Bayernkaserne, gütegesichert und zertifiziert durch Baustoff Recycling Bayern e.V. (Ettengruber 2019)**

## 2.3. Case Studies zur hochwertigen RC-Betonbauweise

In den letzten 30 Jahren hat München durch das Recycling von Materialien wichtige Schritte in Richtung einer Kreislaufwirtschaft gemacht. Diese Meilensteine sind in Tabelle 10: Innovation im Laufe der Großprojekte (Rohstofflager Stadt e.V. 2021) im Anhang nachzulesen. Wie aus der Tabelle ersichtlich ist, werden die meisten dieser Sekundärmaterialien jedoch für den Tiefbau und für Verfüllungen von Gruben auf der Baustelle verwendet.

Aus diesem Grund werden im folgenden Kapitel 3 wichtige Fallbeispiele zusammengestellt, in denen die Möglichkeiten des Einsatzes von RC-Beton im Hochbau aufgezeigt werden. Eines der Exemplare steht in Deutschland, ein weiteres in der Schweiz und ein drittes wurde in den Niederlanden gebaut. Wie die folgenden Beispiele zeigen, sind die Zulassungsverfahren in anderen Ländern weiter fortgeschritten und fördern den Einsatz von Recyclingmaterialien stärker als in Deutschland. Dies zeigt, dass für Deutschland großer Aufholbedarf Richtung RC-Bauweise besteht, aber dass die technischen Möglichkeiten dies bereit zulassen.

### **Case Study 1: Neubau Umweltstation Würzburg (Deutschland)**

Das folgende Beispiel zeigt den Einsatz von Recyclingbeton im Hochbau für den von der DBU finanzierten und 2017 durchgeführten Neubau der Umweltstation in Würzburg. Das Projekt hat eine bebaute Fläche von 779 m<sup>2</sup> und eine Bruttorauminhalt (BRI) von 3.300 m<sup>3</sup>. In diesem Fall wurde die Gesteinskörnung RC-Betonsplitt 2/16 Typ 1

verwendet. Die baustellengemischten Recyclingbetone waren in diesem Fall C 20/25, C 25/30 und C 30/37 mit jeweils 45 % RC-Gesteinskörnung.



**Abbildung 13: Umweltstation Würzburg (Feess 2018)**

Als Ergebnis dieses Projektes wurde festgestellt, dass alle statischen und ökologischen Anforderungen an die Materialien erfüllt sind, es keine Unterschiede zur Verwendung von Normalbeton in Bezug auf den Einbau gibt und die Betonfestigkeiten deutlich höher sind als gefordert (Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz 2017).

### **Case Study 2: Pädagogische Hochschule Thurgau (Schweiz)**

Mit dem Ausbau der Pädagogischen Hochschule Thurgau (PHTG) wurde im Kanton Thurgau ein Pilotprojekt durchgeführt. Bei diesem zweistöckigen Gebäude konnten fast 80 % des gesamten Betonverbrauchs mit Recyclingbeton gedeckt werden, wodurch natürliche Ressourcen geschont und Bauschutt vor Ort fachgerecht recycelt werden konnte (Kantonales Hochbauamt Thurgau 2021).

Aus dem Projekt ergab sich, dass die Verarbeitung von recycelten Zuschlagstoffen aufgrund der zusätzlichen Kosten für den Zerkleinerungs- und Sortierprozesse, sowie die Wiederverwendung von recycelten Komponenten teurer ist als die Bereitstellung von Primärrohstoffe. Allerdings musste der Bauherr Deponiegebühren für das Abbruchmaterial zahlen. Laut dem Artikel gleichen sich die Kosten auf diese Weise weitgehend aus. Auch der Transport und die Verarbeitung von Recyclingbeton auf der Baustelle verursachten keine zusätzlichen Kosten, sodass der Einsatz dieses Materials für den Kunden keine Mehrkosten verursacht hat.





**Abbildung 14: Pädagogische Hochschule Thurgau (Kantonales Hochbauamt Thurgau 2021)**

Durch dieses Pilotprojekt wurde gezeigt, dass die Eigenschaften von Recyclingbeton im Vergleich zu Primärbeton kaum begrenzt sind, sodass fast alle Bauteile auch aus Recyclingbeton hergestellt werden können. Dabei sind manche spezifischen Eigenschaften des Materials jedoch zu berücksichtigen, die teilweise von denen des Primärbetons abweichen können.

In der Schweiz wird Recyclingbeton nach den Normen SN EN 206-1, SIA 2030 und SIA 262 bewirtschaftet. Für die sichere Verwendung von RC-Beton wurde 2010 das Technische Merkblatt SIA 2030 „Recyclingbeton“ entwickelt, welches die unterschiedlichen bestehenden Normen berücksichtigt und deren Anwendung regelt. Dieses Merkblatt wurde 2021 aktualisiert (SIA 2021). Schweizer Recyclingbeton wird in RC-C (Zuschlagstoffe aus Betongranulat) und RC-M (Zuschlagstoffe aus Mischgranulat) unterteilt, die beide unterschiedliche Einsatzgrenzen haben. Um in der Schweiz einen Beton „RC-Beton“ nennen zu dürfen, muss dieser zu mindestens 25 Massen-% aus RC-Gesteinskörnung bestehen; die Obergrenze ist nicht definiert (Eberhardt 2022). Zudem wird in der Schweiz seit 2018 der Einsatz von RC-Zement auf Basis von Recyclingzuschlagstoffen gefördert. Dieser Zement, ZN/D 42,5 N Susteno 4, wurde von der Holcim AG entwickelt und verwendet industriell verarbeitetes Mischgranulat als Zusatzstoff (Holcim 2018).

### **Case Study 3: Pavillon aus Recyclingbeton, Drottninghög (Schweden)**

In der Stadt Drottninghög, Schweden, bauten Forscher der KTH-Universität ein Pilotgebäude in Form eines Pavillons mit Recyclingbeton. Dieser befindet sich auf einem Grundstück, auf dem zuvor ein Kindergarten stand, sodass die Bodenplatte des Bestandsbaus, für den „aus Hunderten Tonnen Beton Neubau“ genutzt werden konnte (KTH 2022). Das Gebäude wurde zu 99 % aus recyceltem Material gebaut.



**Abbildung 15: KTH-Recyclingbeton-Pilotgebäude (KTH 2022)**

Erik Stenberg, Professor an der KTH, zeigte mit seinen Berechnungen, dass durch die Verwendung von Recyclingbeton im Vergleich mit Normalbeton die CO<sub>2</sub> Emissionen in diesem Projekt um bis zu 96% reduziert werden konnten. Professor Stenberg zeigt Interesse, die Belastbarkeit und Einsatzmöglichkeiten von Recyclingbeton weiter zu untersuchen, da er das Ende der Lebensdauer eines Gebäudes getrennt vom Ende der technischen Lebensdauer des darin enthaltenen Betons sieht (KTH 2022). Dieses Pilotprojekt ist Teil eines größeren Projektes (UE ReCreate), das die Einsatzmöglichkeiten von Recyclingbeton in Neubauten untersucht.

*Die wesentlichen Herausforderungen in diesem Projekt waren unter anderem die Kartierung der Betonelemente, die Erstellung einer Datenbank über Qualitäten, Alter und Herkunft der Materialien sowie die Qualität und das Vorhandensein gefährlicher Stoffe (KTH 2022).*



## 3. Stoffstrommodell unter Verwendung von RC-Materialien

Das folgende Stoffstrommodell wird aus den folgenden Modellen aufgebaut:

- **Flächenmodell**, in dem die physikalische und geografische Situation der Baustelle erläutert wird
- **Mengenmodell**, in dem die verschiedenen Stoffströme analysiert, die Mengen an Material berechnet und eine Mengenzbilanz erstellt werden
- **Stoffbilanz im zeitlichen Verlauf**, die Zeit und Phasen des Projekts berücksichtigt, um das Stoffstrommodell zu schließen.

Für die Entwicklung dieses Modells wird parallel ein Beispiel für Stoffstrommanagement in einem fiktiven Musterprojekt durchgeführt, bei dem 1.500.000 Tonnen Bauschutt und Boden bei der Baufeldfreimachung anfallen und 1.600.000 Tonnen Material für den Neubau benötigt werden.

### 3.1. Flächenmodell

Um mit dem Stoffstrommodell eine strukturierte und organisierte Aufbereitung der RC-Materialien vor Ort zu erreichen, muss ein Flächenmodell entwickelt werden, das die geografischen und physikalischen Parameter der Baustelle analysiert. Auf diese Weise wird ein Geländemodell erstellt, das das Höhenprofil, die geotechnische Situation, die Verteilung und Nutzungen des Areals und die bauliche Beschaffenheit berücksichtigt. So entsteht ein Planquadrat mit unterschiedlichen Nutzungen der Flurstücke des Geländes, womit einen Bauausführungsplan entwickeln werden kann, der sowohl das aufzubereitende Material als auch die logistischen Lagerflächen berücksichtigt. Mit diesem Flächenmodell kann eine Tabelle der Flächennutzung erstellt werden, die unter anderem den Flächenverbrauch der überbauten Fläche, der Straßen, der Grünflächen und der Bäume in der Gesamtfläche zeigt.

#### 3.1.1. Wichtige Faktoren der Baustelleneinrichtung

**Topografie:** Um die Höhe über dem Meeresspiegel verstehen zu können und das Geländemodell mit Neigungsfaktoren zu analysieren.

**Bleibende und zu entfernende Grünflächen:** Um zu verstehen, wo eine vollständige Kampfmittelräumung erfolgen soll und wo sie vermieden werden kann. Auch die

Baumsituation und die historische Entwicklung des Areals müssen betrachtet werden. Die Situation der Bäume ist wichtig, da deren Beseitigung nicht ohne Naturschutzrechtliche Genehmigung zulässig ist. Dies hat Auswirkungen bei der Baufeldfreimachung.

**Boden und Grundwasser:** Um die Richtung und Höhe des Grundwasserspiegels, die Zusammensetzung des Bodens und das Risiko einer Verunreinigung des Grundwassers während des Recyclings vor Ort zu betrachten, ist eine ausreichende Anzahl von Aufschlussbohrungen durchzuführen sowie Grundwasserpegel zu setzen.

**Schadstoff-/Belastungssituation:** Die bisherige Nutzung der Fläche und mögliche Schadstoffe und Belastungen im Boden sind zu analysieren. Von dort aus sollten Satellitenbilder und Geländeanalysen verwendet werden, um zu sehen, ob es ein Problem mit Kampfmitteln geben könnte.

**Gebäudesituation:** Um die Zusammensetzung und das Baujahr der verschiedenen Gebäude zu verstehen. In diesem Teil muss die Nutzung, das Baujahr und die historische Situation jedes Gebäudes ermittelt werden, um Untersuchungen zu der Belastung und der Machbarkeit einer Verwertung vor Ort durchzuführen.

**Infrastruktur:** Die verschiedenen vorhandenen Straßen, Verbindungen, Rohr- und Versorgungsleitungen sowie die Anschlüsse zum Projekt müssen aufgezeigt werden, um ein Schema zu entwickeln, das zukünftige Planungsherausforderungen berücksichtigt. Versiegelte Bereiche und die Tiefe der Versorgungsleitungen müssen hier berücksichtigt werden, um zu verstehen, wie viel Erdaushub entstehen wird. Die Übergabepunkte der Leitungen an das Projekt müssen identifiziert werden, um zu planen, wo und wie mit der Baufeldfreimachung begonnen werden soll.

**Flächennutzung während des Bauablaufs:** Die logistischen Probleme im baubetrieblichen Bereich beginnen mit dem Platz auf der Baustelle und der Möglichkeit, sowohl Material als auch Maschinen zu bewegen und zu lagern, ohne den Bau-/Abbruchprozess zu beeinträchtigen. Im Projekt gibt es entweder ausreichend Flächen für die Lagerung und Verarbeitung von Materialien, auf denen das Recycling von Materialien vor Ort problemlos durchgeführt werden kann, oder es gibt einfach nicht genügend solcher Flächen, was zu logistischen Zwängen führt, die in einigen Fällen zu längeren Bauzeiten, höheren Kosten und geringeren RC-Quoten führen. Die Bemühungen zur Verbesserung der Effizienz von Recyclingsystemen werden durch Forschung und Entwicklung fortgesetzt. Ziel ist es zum Beispiel, den Betrieb der Anlagentechnik zu komprimieren und zu optimieren, um so wenig Platz wie möglich vor Ort zu benötigen. Zum anderen wird der Produktionsprozess modelliert, um z.B. Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen durchführen zu können.

### 3.1.2. Lagerflächen und Logistik

Die Materialmenge, die auf einer bestimmten Fläche gelagert werden kann, hängt von mehreren Faktoren ab. Beispielsweise hat jedes Material einen anderen Reibungswinkel, der je nach Materialart die Höhe und Breite der Lagerung bestimmt. Dieser Reibungswinkel bestimmt die Materialmenge pro Lagereinheit. Mit Kenntnis des Volumens der verschiedenen zu lagernden Materialien, des Reibungswinkels (Böschung) und der maximalen Höhe (in der Regel 10 m aus baubetrieblichen Gründen) kann die Grundfläche des Lagerplatzes berechnet werden. Diese Annäherung erfolgt mit abgeleiteten Formeln der Volumen- und Maßstäbe von Pyramiden. Der Reibungswinkel jedes Materials wird verwendet, um die Seitenlängen der Pyramiden auszurechnen. Auf diese Weise kann berechnet werden, wie viel Material in jedem Bereich des Geländes gelagert werden kann. Falls das zu speichernde Volumen größer ist als das Volumen, das in eine bestimmte Fläche passt, muss das Material entweder abgeflacht oder an einen anderen Ort transportiert werden.

**Tabelle 4: Ermittlung der benötigten Lagerflächen in Abhängigkeit von Volumen und Reibungswinkel des Materials (eigene Darstellung)**

Haufwerk Nr.	Material	Volumen	Böschung	Max. Höhe	Grundfläche	Höhe
1	Beton	1.000 m <sup>3</sup>	30 °	10 m	476 m <sup>2</sup>	6,3 m
2	Ziegel	3.200 m <sup>3</sup>	35 °	10 m	909 m <sup>2</sup>	10,0 m
3	Mineralisches	2.600 m <sup>3</sup>	35 °	10 m	792 m <sup>2</sup>	9,9 m
4	Holz	200 m <sup>3</sup>	30 °	10 m	163 m <sup>2</sup>	3,7 m
5	Metalle	1.500 m <sup>3</sup>	30 °	10 m	624 m <sup>2</sup>	7,2 m
6	Sonstiges	300 m <sup>3</sup>	30 °	10 m	213 m <sup>2</sup>	4,2 m
7	Asphalt	1.200 m <sup>3</sup>	45 °	10 m	373 m <sup>2</sup>	9,7 m

Sobald der spezifische Lagerbereich mit spezifischer Höhe für ein bestimmtes Materialvolumen bestimmt ist, kann ein Logistikplan entworfen werden, der den Transport von Baumaschinen und Materialien sicher unterbringt.

Die unterschiedlichen Reibungswinkel der Materialien können sowohl in den Normen als auch in den Schneider-Bautabellen gefunden werden: Kapitel Lastannahmen, 8: Lagerstoffe-Wichten und Böschungswinkel (EC1-1-1, Tab A.7). Beispielsweise haben Kies-, Sand- und Ziegelsplit-Materialien einen Reibungswinkel von 35 Grad. Für den Betonbruch kommt eine Böschung von ebenfalls 35 Grad hinzu. (Schneider Bautabellen 2018)

### 3.1.3. Routen und Logistik des Materialtransports

Es ist wichtig, die Nähe des Standorts zu den Materialquellen, Deponien und Recyclingzentrum zu analysieren. Dazu muss eine Studie der **Deponien, Recyclinganlagen, Beton- und Zementwerken** in der Umgebung durchgeführt werden, um Kilometerbilanzen zu erstellen und zu berechnen, wie viele Kilometer durch das Recycling der Materialien vor Ort im Projekt eingespart werden können. Dazu wird mit Daten aus Google Earth

Pro eine Karte erstellt, auf der für die Materialtransportlogistik relevanten Einrichtungen markiert sind.

### 3.1.4. Erstellung eines Baustellenleitplans

Es soll ein Baustellenleitplan erstellt werden, in dem alle projektrelevanten Faktoren dargestellt werden. Dazu gehören unter anderem abzureißende Gebäude, zu erhaltende Bestandsgebäude, geplante Gebäude gemäß städtebaulichem Wettbewerb, neuer Bahnhof mit zugehörigen Tunnelstrecken und die Straßenanbindung des Areals. Dieser Plan ist wichtig, um das Projekt ganzheitlich zu betrachten. Auf diese Weise können Synergien zwischen dem Altbau und dem Neubau mit den entsprechenden Einrichtungen ermittelt werden. Die Überschneidung von Neu- und Altbau ist wichtig, um zu verstehen, welche Flächen für Materiallager, Verkehrs- und Verarbeitungsflächen genutzt werden könnten. Dadurch wird ein Konzept und eine Strategie für die Massenbewegung und Verarbeitung von Sekundärrohstoffen in den Bereichen erstellt, die nicht von Neu- und Altbauten gestört werden.

#### Musterprojekt Beispiel Flächenmodell

In diesem Teil werden das Gelände und alle zuvor beschriebenen Schritte auf der Baustelle analysiert. Auf diese Weise wird ein ganzheitliches Konzept der Baustelle erreicht und der Flächenanteil der einzelnen Nutzungen kann analysiert werden. In diesem Beispiel einer 9 Hektar großen Baustelle (3\*3 Kästen) können die Gebäudeflächen mit und ohne Kellergeschoss, Straßenflächen, Grünflächen und zu erhaltende Grünflächen des Bestand- und Neubaus prozentual aufgeteilt werden. So lassen sich Synergien finden und mit den ersten Schritten des Mengenmodells beginnen, wo die Mengen und Bereiche angegangen werden.

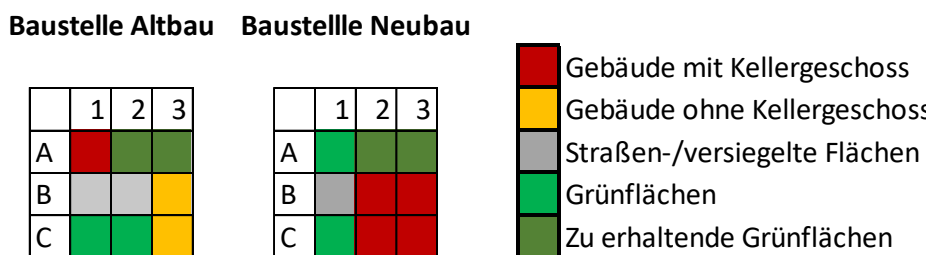


Abbildung 16: Stylisierte Darstellung des Baustellenleitplans in Kästen (Eigene Darstellung)

## 3.2. Mengenmodell (Aufbereitung und Wiederverwendung von RC-Materialien)

Nachdem das Flächenmodell entwickelt und die räumliche Situation der Baustelle verstanden wurde, beginnt die Entwicklung eines Mengenmodells. Dazu muss vorher eine Mengenermittlung durchgeführt werden, um zu verstehen, wie viel Material überhaupt

vorhanden ist. Anschließend wird untersucht, wie viel Material entsprechend seiner Belastung von der Baustelle zu deponieren ist. Außerdem wird analysiert, welche Gesteinskörnungen aus welchem Material und in welcher Qualität vor Ort aufbereitet und recycelt werden können. Mit diesen Werten werden Rezepturen erstellt, um RC-Baustoffe vor Ort mit einer Mischanlage zu entwickeln. Dazu werden auch die Materialien berechnet, die auf der Baustelle importiert werden müssen. Die Qualität des Bodens und der Aufbereitungsmechanismen sind entscheidend, um hochwertiges RC-Material erzielen zu können. Die Hauptquellen der Stoffströme sind **Bauschutt** von Gebäudeabbrissen, **Trümmer von asphaltierten Verkehrsflächen** und **Material von Bodenaushub**. Bei der Mengenermittlung der Baufeldfreimachung werden die relevanten Stoffströme aus dem Abbruch berücksichtigt. Diese sind unter anderem:

- **Bauschutt:** Beton vom Kellerabbruch
- **Verkehrsflächen:** Asphalt, Beton von Verkehrsflächen, Materialreste aus Verkehrsflächen
- **Bodenaushub** (Im Regelfall größter Anteil): Auffüllungen, Verfüllen von Leitungsgräben, Kalkschroppen, Hinterfüllungen

Das Mengenmodell muss unter anderem das anfallende Material, das Einbaumaterial für den Neubau, das Material zur Lagerung und das zu entfernende Material berücksichtigen. Das Exportmaterial besteht aus belastetem Material, das zu einer Deponie gebracht werden muss. Das anfallende Material ist das während der Baufeldfreimachung gewonnene Material aus Bodenaushub, Straßenaufbruch oder Gebäuderückbau. Das Einbaumaterial sind die bereits recycelten Mengen, die für den Neubau bereit sind. Als Lagerungsmaterial werden alle Mengen bezeichnet, die bis zur Verarbeitung und Verwertung oder nach der Verwertung bis zum Einbau in den Neubau über einen gewissen Zeitraum auf der Baustelle gelagert werden müssen.

Das akkumulierte Lagermaterial im Jahr  $n$  ist die Summe der Lagerung des Jahres  $n-1$  mit der Gewinnung des Jahres  $n$ , minus des Exportmaterial des Jahres  $n$  minus des Einbaumaterials des Jahres  $n$ :

*Lagermaterial* ( $n$ )

$$= \text{Lagermaterial}(n-1) + \text{Materialgewinn}(n) - \text{Einbaumaterial}(n) - \text{Exportmaterial}(n).$$

Sobald das Lagermaterial in Tonnen berechnet ist, werden die im Flächenmodell gezeigten Formeln verwendet, um die erforderliche Lagerfläche zu ermitteln. Auf diese Weise kann festgestellt werden, ob genügend Lagerfläche vorhanden ist oder nicht, und

erst dann können Strategien entwickelt werden, wie und wo dieses Material zu lagern ist.

### 3.2.1. Stoffströme durch Gebäuderückbau

Die folgende Grafik zeigt die Materialverlusten bei der Anhäufung und Aufbereitung dieser für die Verwertung als Baustoffe. Dadurch kann die Menge der gesamten Materialien berechnet und jedes Material mit dem Faktor aus der entsprechenden Tabelle multipliziert werden, um herauszufinden, wie viel der Materialien tatsächlich vor Ort recycelt werden könnten.

Baustoffgruppe	Verlusten
Putze, Estriche, Mörtel	10%-20%
Betone	5%-20%
Mauersteine	4%-50%
Bauplatten	10%
Holz, Holzwerkstoffe	5%
Wärmedämmstoffe	10%
Dachdeckungen	10%
Beläge, Dichtungsbahnen	50%
Sonst. Stoffe, Schüttungen	10%
Metalle	5%

Abbildung 17: Verlusten durch Sammlung und Aufbereitung (nach Baustoffgruppen) (Heinrich 2018)

### 3.2.2. Schadstoffproblem

Um ein ordnungsgemäßes Materialrecycling zu erreichen, ist es entscheidend, alle Verunreinigungen und Schadstoffe in den Materialien und Boden zu entfernen, damit die spätere Materialverarbeitung reibungslos verlaufen kann.

Asbest, PCB-Fugenmaterial, Holzschutzmittel, DDT als Insektizid (hauptsächlich in amerikanischen Nachkriegskasernen zur Bekämpfung von Insekten verwendet) und andere sind Schadstoffe, die in vielen Gebäuden während der Baufeldfreimachung gefunden werden und potenziell problematisch für das Recycling sind. Silikose ist auch eine Krankheit, die beim Einatmen von Kieselsäurestaub in der Lunge auftritt, der beim Schneiden, Schleifen oder Bohren von Sand, Gestein und Quarz entsteht. Besonders bei Arbeitern, die mit Mauerwerk, Beton und Glas arbeiten, kann dies zu erheblichen Atemproblemen führen (Wagner Healthcare 2022).

Schadstoffhaltige Materialien können auch künstliche Mineralfasern, Schwermetalle, polzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe und polychlorierte Biphenyle umfassen.

Problemstoff	Verwendung in Bauteilen	Verwendung ab	Herstellungsverbot	Verwendungsverbot
Asbest	Fassade, Zementzusatz, Bodenbeläge, Dämmung	1920	1993	1993
KMF	Gedämmte Bauteile (z.B. Wände, Dach)	1900	2000	2000
PCP	Holzschutzmittel, Beschichtungen	1970	1989	1989
Polychlorierte Biphenyle (PCB)	Fugen, Farben, Kunststoffe	1929	1983	1989
Polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK)	Kleber, teerhaltige Produkte (z.B. Abdichtungen, Asphalt)	1850	1970	
Lindan	Holzschutzmittel	1950	1984	2006

**Abbildung 18: Verwendungszeiträume von ausgewählten Problemstoffen in Gebäuden (Heinrich 2018)**

Recyclingbaustoffe werden aufgrund der Asbestproblematik oft negativ bewertet. Das Material wurde vor allem in den 1960er Jahren verwendet und wegen seiner bautechnischen Qualitäten großflächig eingesetzt. Das Problem mit Asbest ist, dass seine Mineralfasern krebserregend sind (Verbraucher Zentrale 2022). Es werden immer noch Abstandshalter oder Rohre mit Asbest gefunden, so dass zusätzliche Maßnahmen ergriffen werden müssen, um Materialien zu recyceln.

### 3.2.3. Stoffmengen für Wohngebäude

Für das folgende Kapitel wurden die vom Leibniz-Institut für Raumentwicklung und Informationssystem Gebaute Umwelt herausgegebenen durchschnittlichen Gewichts- und Bruttorauminhaltstabellen für Wohn- und Nichtwohngebäude verwendet (IÖR 2022). Die vorhandenen Tabellen zeigen die Standardgröße von Gebäuden, ihr durchschnittliches Gewicht und die Materialzusammensetzung in Abhängigkeit von der Nutzung des Gebäudes und dem Baujahr. Aus diesen Werten wird das sogenannte Volumengewicht extrapoliert, das das Gewicht der Konstruktion aus dem Volumen des Gebäudes ableitet. Dieses volumetrische Gewicht ermöglicht es auch, das Gewicht nach Materialien zu trennen und zu ziehen. Daraus wurden Sankey-Diagramme mit der STAN-Software der Technische Universität Wien erstellt. Diese Diagramme ermöglichen die Eingabe des Bruttorauminhalts eines Gebäudes eines bestimmten Jahres mit einer bestimmten Nutzung zu bestimmen, wobei das Diagramm einen Näherungswert für die Materialzusammensetzung dieses Gebäudes und das Gewicht der einzelnen Materialien liefert.

## Stoffliche Zusammensetzung Mehrfamilienhäuser, die zwischen 1919 und 1949 gebaut wurden

Der Bruttorauminhalt des Mustergebäudes beträgt 2.408 m<sup>3</sup>, das Gewicht 1.164,1 Tonnen. Daraus folgt, dass die zwischen 1919 und 1948 gebauten Wohngebäude für jeden m<sup>3</sup> BRI etwa 0,48343 Tonnen wiegen. Für die folgende Tabellen wurde ein Musterprojekt von 100 m<sup>3</sup> BRI angenommen, der direkt mit dem Faktor für das Konstruktionsgewicht multipliziert wurde.

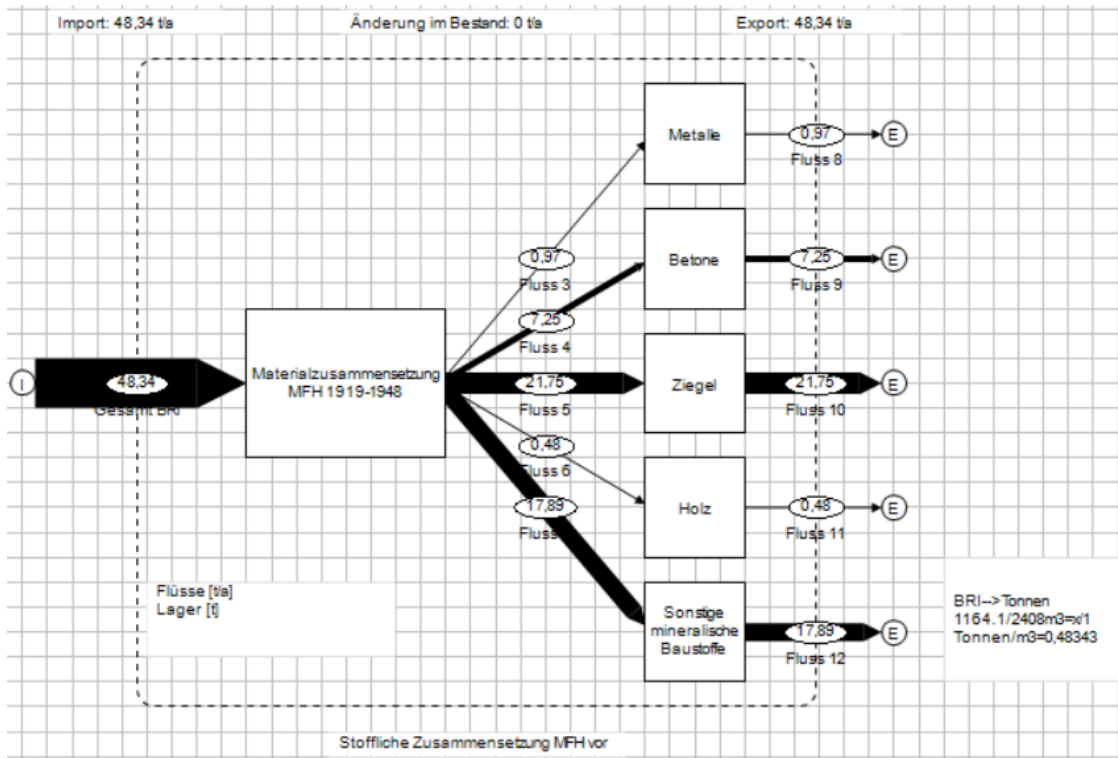


Abbildung 19: Sankey Diagramm Materialzusammensetzung MFH 1919-1949 (Eigene Darstellung mit der STAN-Software)

Für die folgenden Materialzusammensetzungstabellen in Abhängigkeit von Baujahr und Nutzung des Gebäudes wurden ebenfalls Sankey-Diagramme mit Hilfe der STAN-Software erstellt. Aus Platzgründen wird der Faktor für jede Gebäudeart berechnet, aber auf eine Abbildung des Diagramms wird verzichtet. Die restlichen Sankey-Diagramme werden im Anhang gefunden.

## Stoffliche Zusammensetzung Mehrfamilienhaus, die zwischen 1949 und 1978 in Westdeutschland gebaut wurden

Der Bruttorauminhalt des Mustergebäudes beträgt 2.787 m<sup>3</sup>, das Gewicht 1.347,8 Tonnen. Daraus folgt, dass die zwischen 1949 und 1978 gebauten Wohngebäude für jeden m<sup>3</sup> BRI etwa 0,4836 Tonnen wiegen.



### Mengenermittlung von Beton-Keller

Zur Ermittlung des Betonkellerfaktors wurde der Kellerschnitt eines Gebäudes in der Bayernkaserne als Referenz herangezogen, der einen Konstruktionsvolumen pro Brutto-rauminhalt von 16,4 % aufwies. Multipliziert man dies mit der Dichte von 2,4 t/m<sup>3</sup> (DIN EN 1991 2010), so erhält man einen Faktor von 0,394 Tonnen pro m<sup>3</sup> BRI.

### 3.2.4. Stoffmengen für Nichtwohngebäude

#### Stoffliche Zusammensetzung Bürogebäude

Der Brutto-rauminhalt des Mustergebäudes beträgt 15.493 m<sup>3</sup>, das Gewicht 7.199,4 Tonnen. Daraus folgt, dass Bürogebäude im Standardfall etwa 0,4647 Tonnen pro m<sup>3</sup> BRI wiegen.

#### Stoffliche Zusammensetzung Feuerwehrehäuser und Rettungswache

Der Brutto-rauminhalt des Mustergebäudes beträgt 4.772 m<sup>3</sup>, das Gewicht 2.660,2 Tonnen. Daraus folgt, dass Feuerwehrehäuser und Rettungswache im Standardfall etwa 0,5575 Tonnen pro m<sup>3</sup> BRI wiegen.

#### Stoffliche Zusammensetzung Lagerhallen

Der Brutto-rauminhalt des Mustergebäudes beträgt 15.255 m<sup>3</sup>, das Gewicht 4.905,8 Tonnen. Daraus folgt, dass Lagerhallen im Standardfall etwa 0,3216 Tonnen pro m<sup>3</sup> BRI wiegen.

#### Stoffliche Zusammensetzung Produktionshallen

Der Brutto-rauminhalt des Mustergebäudes beträgt 22.298 m<sup>3</sup>, das Gewicht 7.281,7 Tonnen. Daraus folgt, dass Produktionshallen im Standardfall etwa 0,3267 Tonnen pro m<sup>3</sup> BRI wiegen.

**Tabelle 5: Überblick Umrechnungsfaktoren BRI-Gewicht für Gebäude je nach Baujahr und Nutzung**

	BRI Mustergebäude	Gewicht Mustergebäude	Faktor [t/m <sup>3</sup> BRI]
Mehrfamilienhäuser 1919-1949	2.408m <sup>3</sup>	1164 t	0,48343
Mehrfamilienhaus, 1949-1978 Westdeutschland	2.787m <sup>3</sup>	1348 t	0,4836
Beton-Keller	-	-	0,394
Bürogebäude	15.493m <sup>3</sup>	7199 t	0,4647
Feuerwehrehäuser und Rettungswache	4.772m <sup>3</sup>	2660 t	0,5575
Lagerhallen	15.255m <sup>3</sup>	4906 t	0,3216
Produktionshallen	22.298m <sup>3</sup>	7282 t	0,3267

### 3.2.5. Mengenermittlung Boden

Um die Menge an Bodenaushub zu ermitteln, die auf einer Baustelle anfallen wird, ist es wichtig, die geografischen und geotechnischen Eigenschaften des Geländes zu verstehen. Je nach Belastung in verschiedenen Bereichen des Geländes werden unterschiedliche Bodenaushube mit unterschiedlichen Tiefen hergestellt.

Bei bekannten Luftangriffen während des 2. Weltkrieges und bei zu erwartender intensiver Kampfmittelräumung mit vielen Verdachtspunkten ist erfahrungsgemäß mit einer Bodenaushubtiefe von 2 bis 2,5 Metern zu rechnen. Die Baufeldfreimachung und Kampfmittelbeseitigung erfolgt im Rahmen der „Arbeitshilfe Kampfmittelräumung“, die eine Einstufung und Kategorisierung von Risiken und Maßnahmen anhand der Ergebnisse der Kampfmitteluntersuchungen ermöglicht. Wenn zum Beispiel bekannt ist, dass Bodenkämpfe auf dem Gelände stattgefunden haben, muss bei der Baufeldfreimachung ca. 50 Zentimeter des gesamten Bodens ausgehoben und gesiebt werden, um Metallreste und anderen Schrott, der in den oberen Schichten vorkommen kann, zu entfernen.

Außerdem ist es wichtig, die Frostschutzzone zu analysieren und den Boden an den Übergabepunkten der Rohre und Anschlüsse an der Baustelle mindestens bis zu dieser Tiefe auszuheben, um Frostgefahr in den neuen Rohren zu vermeiden. Die Mindesttiefe für frostfreie Gründungen beträgt laut Norm 80 cm (DIN 1054 2021). Erfahrungswerten zufolge liegt die Frostschutzlinie in Oberbayern bei etwa 1 m Tiefe.

Wie im Kapitel über die Richtlinien erläutert, gelten beim Verfüllen von Baugruben in Bayern die Eckpunktpapiere, die die verschiedenen Belastungskategorien festlegen. Abhängig von der Belastung und den Genehmigungen für das spezifische Projekt, kann das Material vor Ort wieder eingesetzt werden, wobei angestrebt wird, so viel Erdaushub wie möglich auf der Baustelle zu belassen.

### **3.2.6. Mengenermittlung Asphalt**

Zur Bemessung des Regelquerschnitts und damit die Asphaltmengenermittlung der Straßen wird eine Belastungsklasse nach RStO 12 je nach Verkehrsbelastung ausgewählt. Für dieses Stoffstrommodell wird eine Belastung von „Bk 3,2 Hauptgeschäftsstraßen“ angenommen. Dies ist die vierthöchste Belastungsklasse nach RStO 12 nach „Bk 100 Autobahnen und Schnellstraßen“, „Bk 32 Industriestraßen“ und „Bk 10 Hauptgeschäftsstraßen“ (RStO-12 2020). Diese Belastungsklasse geht von einer 75 cm Frostschutzschicht, einer 12 cm Asphalttragschicht und einer 10 cm Asphaltdecke aus. Auf diese Weise wird eine bituminöse (möglicherweise teerhaltig) Trag- und Deckschicht von insgesamt 22 cm (12 cm+10 cm) ausgerechnet. Daher ist die Dicke der Asphaltfahrbahnen 22 cm, mit einer die Dichte von 2,2 t/m<sup>3</sup> (DIN EN 1991 2010). Die Gesamtfläche der Straßen muss berechnet werden. Um das Volumen zu erhalten, wird die Gesamtfläche der Spuren mit ihrer Schichtdicken multipliziert.

### **3.2.7. Aufbereitung von RC-Materialien und Prozessoptimierung**

Um hochwertiges Recyclingmaterial herzustellen, ist es wichtig, den Aufbereitungsprozess zu optimieren. Dazu ist es notwendig, im Vorfeld zu wissen, in welcher Korngrößen das Material gebrochen werden soll und welche Mischungen vor Ort vorzunehmen sind,

um die gesamte Anlage von Anfang an ohne Nachjustierungen während des Projekts einstellen zu können. Aus diesem Grund schlägt dieses Modell vor, sowohl hochwertigen RC-Beton, RC-Substrate, Flüssigboden als auch Verfüllungsmaterial vor Ort herzustellen. In diesem Fall ist das relevanteste Material Recyclingbeton, da es für den Bau von Gebäuden und Infrastruktur verwendet wird, und daher stärker in den Vordergrund gerückt wird. Die RC-Substrate werden dann als hochwertige Substrate zur Herstellung von Grünflächen und Naturflächen mit Bäumen und/oder Rasen verwendet. Der Flüssigboden ist ein sehr geeignetes Material zum Verfüllen von Gräben mit Rohren oder Versorgungsleitungen und schließlich das Verfüllungsmaterial (Downcycling), das aus Materialien mit hoher Belastung (Z1.2.) als Grabenverfüllung und Straßenunterbau verwendet wird, um lange Transportwege zu Deponien zu sparen. Auch Versorgungsleitungen sind ein wichtiges Thema bei der Herstellung von Baustoffen. Die Lage der Leitungsanlagen zur Aufbereitungs- und Mischanlage ist entscheidend für deren Betrieb. Die Strom- und Wasserleitungen müssen freigeschaltet sein und eine Verbindung zum Recyclingzentrum haben. Deren Tiefe und Leistung sind daher von großer Bedeutung.

### **Kiesiges Material**

Wenn Geotechnisch kiesiger Boden vorhanden ist, kann dieser vor Ort gebrochen und verarbeitet werden. Es ist wichtig, dass eine Bodenuntersuchung durchgeführt wird, um die Eignung dieses Materials zu ermitteln. Das Baufeld kann daher als Kiesgrube genutzt werden, in die recycelter Beton oder andere RC-Materialien eingebracht werden können.

### **RC-Asphalt**

Generell sollten Ausbauasphalt und Straßenbauschutt (insbesondere bituminöses Mischgut AVV 170302) in den gebundenen Schichten der Straße wiederverwendet werden, um eine möglichst hohe Verwertung zu erreichen, sofern die bautechnische Eigenschaften ausreichend bleiben (Baustoff Recycling Bayern 2022). Zu diesem Zweck wird der Straßenbauschutt zu einer Asphaltrecyclinganlage transportiert, wo er aufbereitet und an die nahe gelegenen Baustellen geliefert werden kann.

### **RC-Beton**

Wie der Stand der Forschung zeigt, ist es derzeit noch nicht zugelassen, Brechsand in Recyclingbetonrezepturen einzusetzen. Aus der Sieblinie-Analyse zu Recyclingbeton geht hervor, dass eine große Menge an Material vorkommt, das sich zu Brechsand mit einer Körnung von weniger als 2 mm zersetzt. Je nach Brechverfahren ist mit einem Feinanteil (< 4 mm) von zwischen 40 % bis 50 % zu rechnen. Derzeit gibt es hierfür in Deutschland nur wenige Recycling-Anwendungen. Aus diesem Grund wird dieses Material oft zu Deponien transportiert, auch wenn es bautechnisch einsetzbar wäre, was

zu unnötigen Transportmengen führt. Der Entwurf der DIN 1045-2 vom Juli 2022 zeigt jedoch erste Änderungen und akzeptiert einen Brechsandanteil ( $< 2$  mm) in Betonrezepturen des Typs 1. Aus diesem Grund wird davon ausgegangen, dass in naher Zukunft nicht mehr die Korngröße entfernt werden muss und auf der Baustelle verwendet werden kann. Der Betonbruch wird optimal in 0/4, 4/8 und 8/16 mm Material gebrochen, um RC-Beton-Rezepturen nachzubilden. Der Beton nach Norm benötigt Natursand, daher kann hierfür kein 0/4 mm Material hinzugefügt werden. Dieses 0/4-Material kann jedoch in Kombination mit Natursand eingesetzt werden, wenn eine ZIE beantragt wird.

### **RC-Substrate**

Wie bereits erwähnt, können bei der Baufeldfreimachung hochwertige Substrate aus RC-Materialien erstellt werden. Dazu können Boden, Mutterboden, Humus, Bauschutt wie z.B. Ziegel und sogar Brechsand gemischt werden. Dieselbe Mischanlage kann sowohl für RC-Beton als auch für Substrate und andere Komponenten verwendet werden. Allerdings ist es wichtig, zwischen den verschiedenen Mischungen einen sehr guten Reinigungsprozess durchzuführen. Wenn das Rohmaterial des RC-Substrats (Erde) sehr nass ist, muss darauf geachtet werden, dass der Mischer nicht verschmutzt wird.

### **Flüssigboden**

Wie bereits erwähnt, besteht Flüssigboden aus einer Mischung aus Ziegelbruch, Grubensand, etwas Zement und anderen Bestandteilen, die dann mit etwas Wasser vermischt werden. Dieses Material wird meist zum Verfüllen von Rohren und Kabeltrassen verwendet, die dann irgendwann mit dem Minibagger zurückgebaut werden können. Zusätzliche Boxen mit anderem Material sollten für diesen Flüssigboden nicht installiert werden, da viele Komponenten aus RC-Beton oder Substrat verwendet werden können, um dieses Material zu mischen.

### **Allgemeines**

Einer der Vorteile von RC-Substrat gegenüber RC-Beton besteht darin, dass das gemischte Material gelagert werden kann (da es keine chemischen Reaktionen aufweist) um es zum späteren Zeitpunkt zu verwenden. Um diese zusätzlichen Materialien in derselben Mischanlage mischen zu können, werden mehr Speicherkammern benötigt, daher werden für dieses Stoffstrommodell insgesamt 10 Boxen vorgeschlagen (6 Boxen für RC-Beton dimensioniert, 3 für RC-Substrate und 1 für Flüssigboden). Wie bereits erwähnt, muss die Mischanlage jedes Mal, wenn ein anderes Baumaterial gemischt werden soll, gründlich gewaschen werden, um Veränderungen im Rezept zu vermeiden. Sowohl der Kübel der Mischanlage als auch das Förderband müssen komplett gereinigt werden, bevor die nächste Mischung beginnt. Abbildung 20 zeigt eine

Zusammenfassung des gesamten Prozesses und der Schritte, die beim Recycling von Materialien zu befolgen sind.

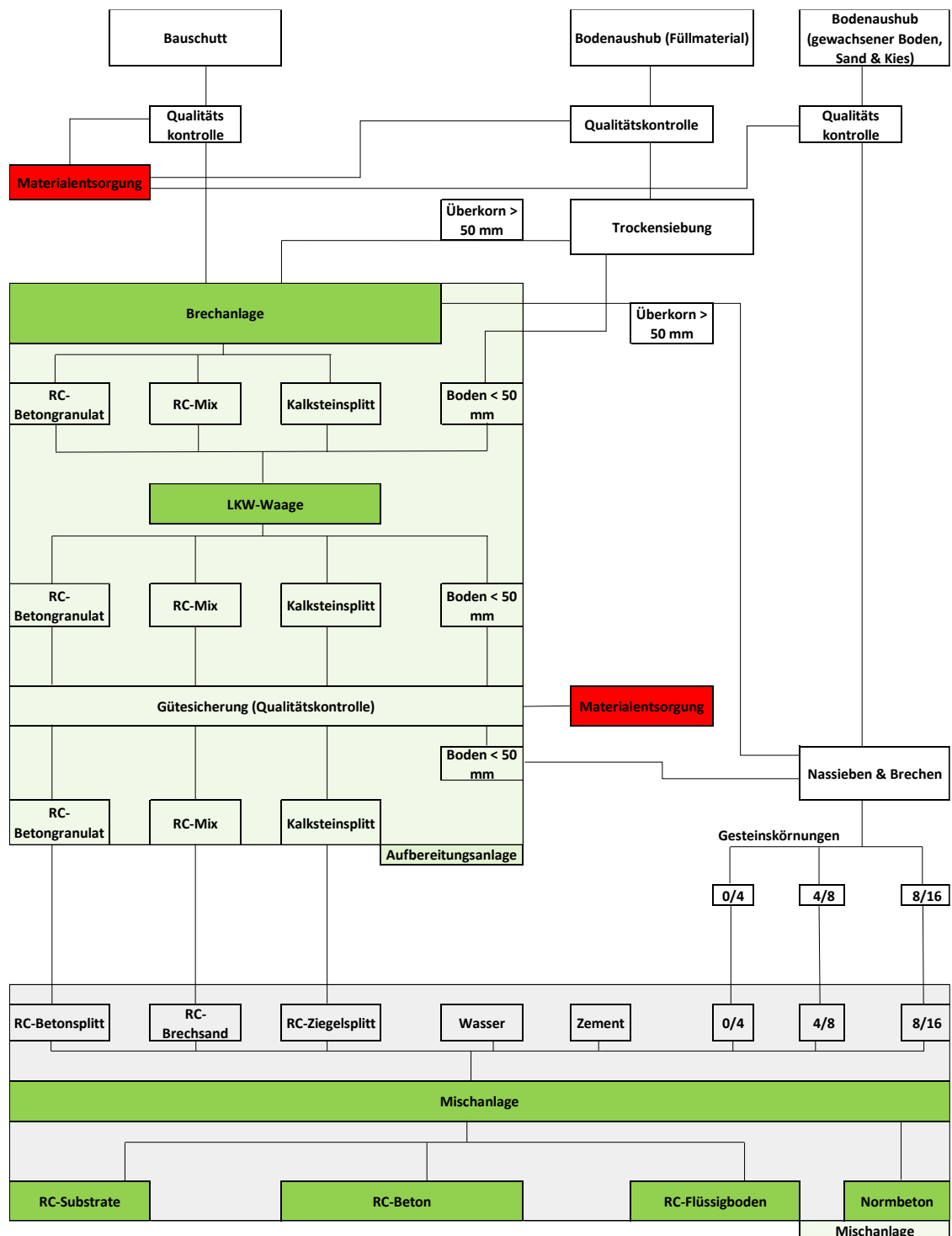


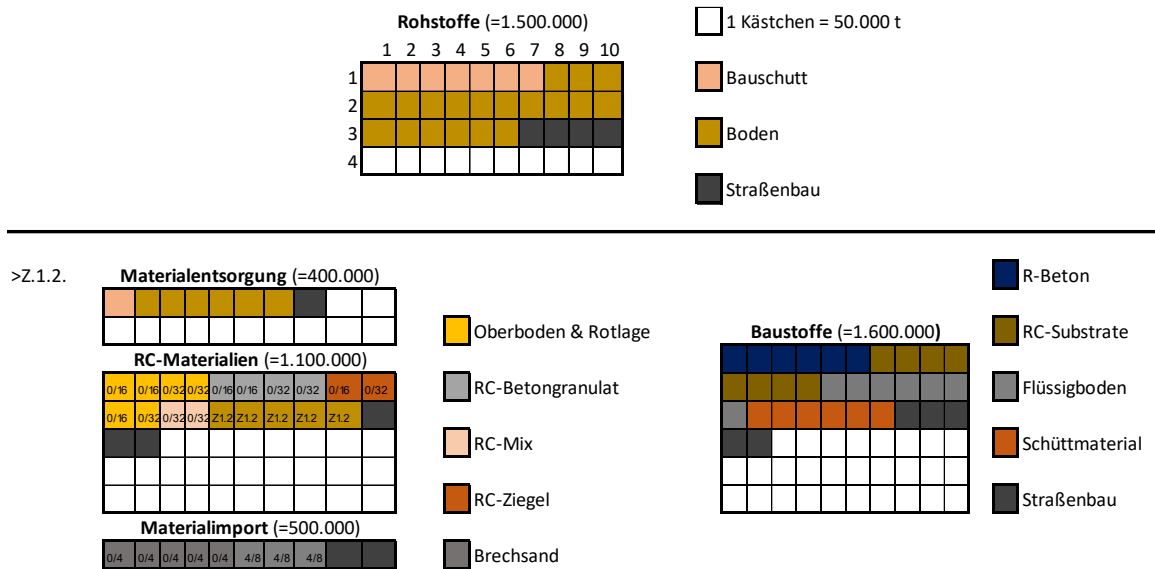
Abbildung 20: Fließbild RC-Materialien (eigene Darstellung nach DMU Consult GmbH 2022)

### Musterprojekt Beispiel Mengenmodell

Auf diesem 9 Hektar großen Musterprojekt wird eine Gesamtstoffbilanz von 1.500.000 Tonnen der Baufeldfreimachung errechnet. Davon fallen 350.000 Tonnen auf den Bauschutt und 1.150.000 auf die Kategorie Boden und mineralische Stoffe. Von der gesamten anfallenden Menge i. H. v. 1,5 Mio. t. werden 400.000 t belastetes Material entsorgt.

Zudem werden 500.000 t Brechsand, Zement und andere Materialien zugekauft, um die RC-Baustoffe vor Ort herzustellen. Auf diese Weise werden 1.600.000 Tonnen RC-Materialien für den Neubau produziert.

Wie zu sehen ist, kann das recycelte Material verwendet werden, um verschiedene Rezepturen zu mischen und R-Beton, RC-Substrat, Flüssigerde und Schüttgut herzustellen, wodurch der Anteil an Material, das von der Baustelle exportiert und für den Neubau importiert werden muss, minimiert wird.



**Abbildung 21: Mengenmodell Musterprojekt 1.500.000t aus Baufeldfreimachung und 1.600.000t für den Neubau**

Wenn das gesamte verwertbare Material (1.100.000 t), bei einer angenommenen durchschnittlichen Dichte von 2 t/m<sup>3</sup>, errechnet sich ein Volumen von 550.000 m<sup>3</sup>, das gleichzeitig vor Ort gelagert wird. Somit ergibt sich aus den Tabellen für die Lagerflächen im Flächenmodell, mit einem Reibungswinkel von 35° (Reibungswinkel angenommen für Kies (Schneider Bautabellen 2018)), eine Gesamtfläche von 6,2 ha und eine Höhe von 10 m für die Haufwerke. Da das RC-Material jedoch während des gesamten Projekts anfällt und im Neubau eingebaut wird, werden die Haufwerke während des Projekts vorübergehend aufgeteilt, sodass die insgesamt benötigte Lagerfläche geringer sein wird.

### 3.3. Stoffbilanz im zeitlichen Verlauf

Nachdem das Flächen- und das Mengenmodell entwickelt wurden, können die Informationen mit dem zeitlichen Rahmen des Projekts zur Entwicklung des Stoffstrommodells abgestimmt werden. Auf diese Weise kann die Menge des anfallenden Materials mit den Quartalen des Jahres des Terminplans überlappt werden. So wird eine

Materialsummenlinie gebildet, um die Synergien zwischen den benötigten und den verfügbaren Logistikflächen und dem vorhandenen Material zu verstehen. Diese Materialsummenlinie wird aus einer kumulierten Materialmenge erstellt, die das anfallende Material und das eingebaute Material im Neubau pro Quartal berücksichtigt. Somit ist bekannt, wie viel Material gleichzeitig in jedem Quartal gespeichert werden soll.

### Musterprojekt Beispiel Stoffbilanz im zeitlichen Verlauf

Am Beispiel des Musterprojekts wird der Altbau in die ersten zwei Jahren in Betrieb bleiben, während Strategien und Planungen für das stoffliche Recyclingkonzept entwickelt werden. Im 3. Jahr beginnt die Baufeldfreimachung, und parallel dazu entwickelt sich der Bebauungsplan. Ab dem 4. Jahr beginnt der Bau der Infrastruktur, gefolgt vom Bau des öffentlichen Gebäudes im 5. Jahr und des Privatgebäudes im 7. Jahr. Die Landschaftsarchitektur und die Nutzung von Grün- und Gemeinschaftsflächen beginnen im 8. Jahr (Siehe Abbildung 22). Daher verbleibt ein Pufferzeitraum von etwa einem halben Jahr, falls es zu Verzögerungen im Projekt kommen sollte.

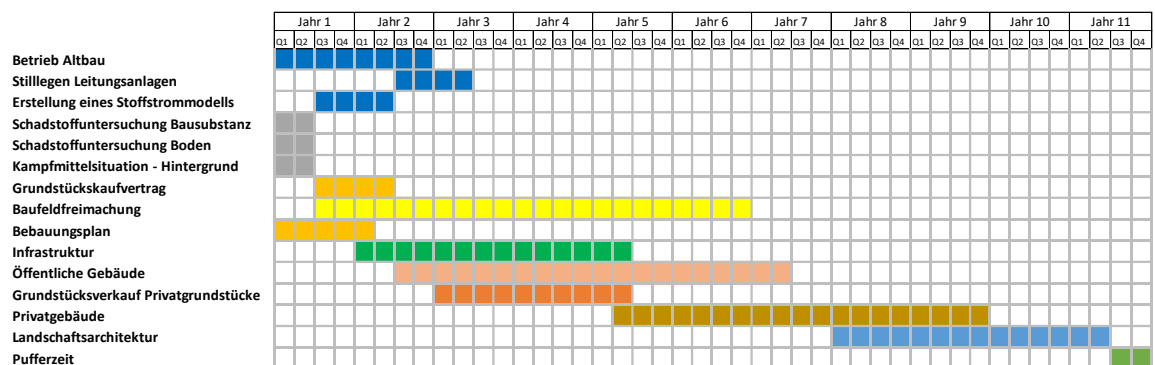
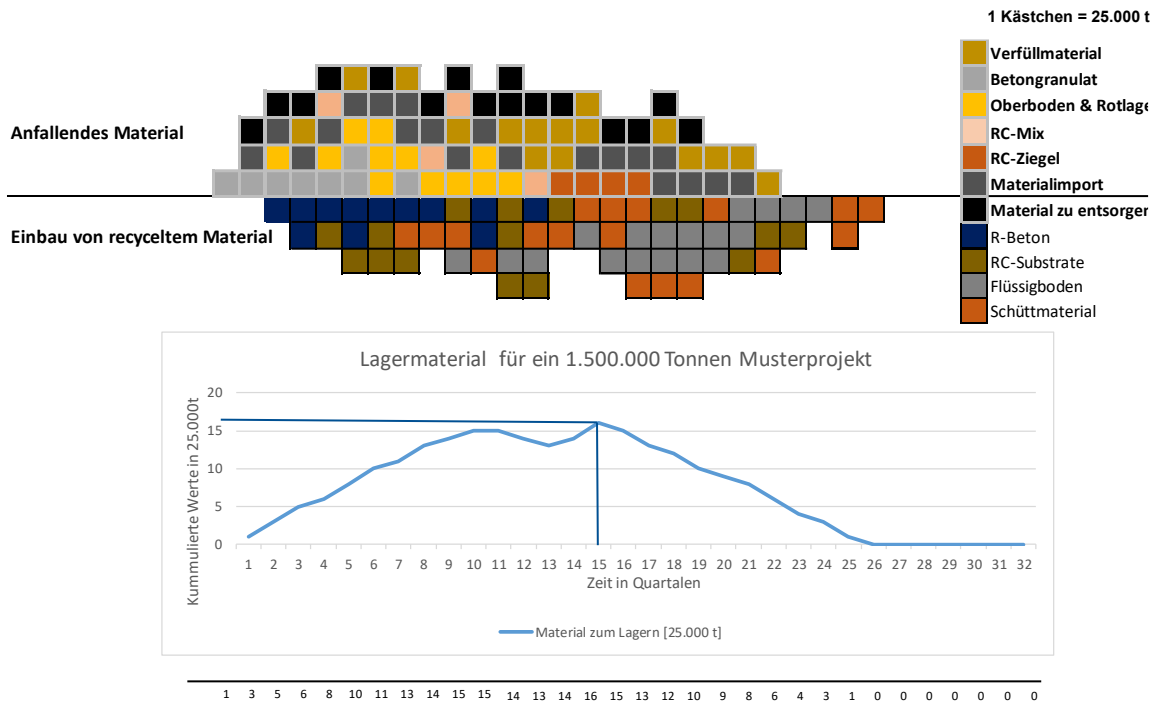


Abbildung 22: Terminplan Musterprojekt

Auf diese Weise wird eine Materialbilanz erstellt, die das während der Projektentwicklung anfallende Material (Material, das bei der Baufeldfreimachung, Bodenaushube, usw. gewonnen wird) und das Recyclingmaterial, das in den Neubau eingebaut wird, berücksichtigt. So kann eine kumulative Materialkurve entwickelt werden, die das zu lagernde Material in jeder Periode anzeigt, sodass nachvollziehbar wird, wie viel Speicherkapazität in jedem Quartal auf der Baustelle benötigt wird.



**Abbildung 23: Lagermaterial Musterprojekt mit dem Terminplan verknüpft**

Wie dargestellt, wird für das Musterprojekt im Quartal 15 eine maximale Lagerkapazität von 400.000 t (=16\*25.000 t) benötigt. Bei einer durchschnittlichen Dichte von 2,0 t/m<sup>3</sup> entspricht diese Menge einem Volumen von 200 m<sup>3</sup>, was bei einem Reibungswinkel von 35 Grad eine Lagerfläche von 2,4 Hektar und einer Höhe von 10 Metern für die Haufwerke im gleichen Zeitraum ergibt.

### 3.4. Recycling-Zentrum

Um den Stoffkreislauf zu schließen, steht der Bau eines Recycling-Zentrums im Vordergrund. Es wird eine Anlage benötigt, in dem das anfallende Material der Baufeldfreimachung aufbereitet und verwertet werden kann. Wie am Stand der Forschung zu sehen ist, kann eine kleine Recyclinganlage mobil installiert werden, oder für größere Materialmengen kann auch ein RC-Zentrum gebaut werden. Wenn auf dem Gelände genügend Platz vorhanden ist und große Projekte in der Nähe sind, die viel Material benötigen, ist ein solches Zentrum von Vorteil, da das Material ohne lange Transportwege wiederverwertet werden kann.



### 3.4.1. Flächenbedarf

#### Beispiel Recyclingzentrum Feeß und Eberhardt

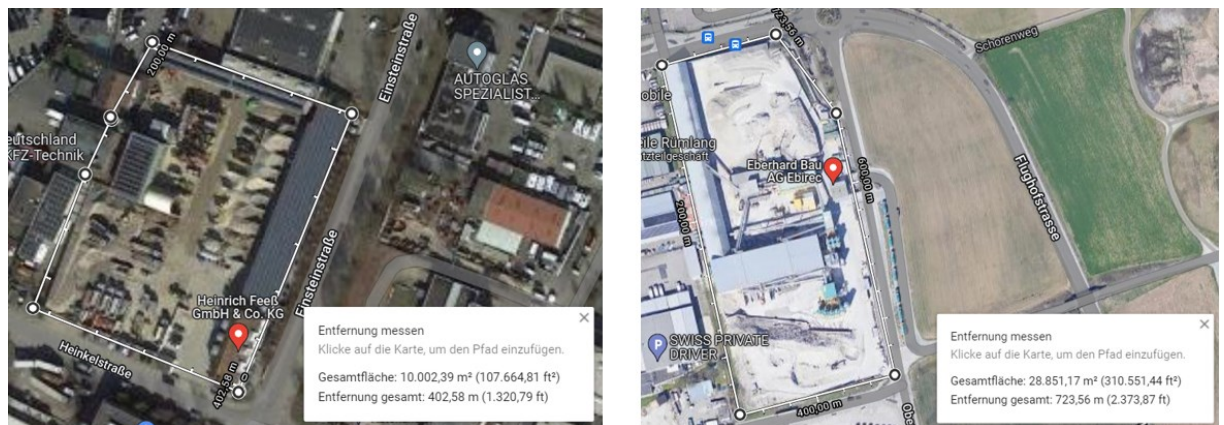


Abbildung 24: Recyclingzentrum Feeß (1 Hektar) und Recyclingzentrum Eberhardt (3 Hektar) (Google Maps)

Die Durchschnittgröße für so ein RC-Zentrum liegt zwischen 1 und 3 Hektar. Eine Kostenstudie oder Angaben zu den benötigten Kapazitäten der Anlagen gibt es noch nicht, daher basieren die Aussagen zu den erforderlichen Anlagen auf Erfahrungswerten, Online-Recherchedaten und mehreren Interviews auf der Baustelle.

### 3.4.2. Erforderliche Anlagen und Betriebsmodell

Für das RC-Zentrum ist unter anderem eine Mischanlage, eine Kiesaufbereitungsanlage, ein Brecher und eine Siebanlage (RC-Baustoffaufbereitungsanlage) und eine Halle erforderlich. Die Halle, in dem das Recycling durchgeführt wird, umfasst auch eine Bodenplatte, Waagen, Förderbänder, Wasser, Strom, usw. Die Preise dieser Anlagen richten sich nach den benötigten Abmessungen der Produktion, können also erst detailliert ermittelt werden, bis die projektspezifischen Informationen über die benötigten Produktionsabmessungen vorliegen.

Je nach Größe der Anlagen und der erforderlichen Materialproduktion kann ein Recyclingzentrum erstellt werden, das bis zu 500 Tonnen Recyclingmaterial pro Stunde verarbeiten und produzieren kann. *Deshalb ist es wichtig zu wissen, wie viel Material pro Stunde und pro Tag für den Neubau benötigt wird, um anhand dieser Daten die Anlagen dimensionieren zu können.*

### 3.4.3. Genehmigungsverfahren

Maßgebend im Genehmigungsverfahren für das Recyclingzentrum ist das Bundesimmissionsschutzgesetz (BImSchG). Dabei ist das Kapitel der „Genehmigungsbefürdigten Anlagen“ zu beachten, konkret die 4. BImSchV. Dort heißt es, dass die „Anlagen zum Brechen, Trocknen, Mahlen oder Klassieren von natürlichem oder künstlichem Gestein genehmigungspflichtig sind und am vereinfachten Verfahren gemäß § 19

BlmSchG (ohne Öffentlichkeitsbeteiligung) zu überprüfen sind.“ (4. BlmSchV 2013). Zusätzlich sind die Lagerflächen für kontaminiertes Material mit den Richtwerten 1 und 2 (RW1- und RW2-Material) zu berücksichtigen.

Zur Erlangung der Genehmigung wird empfohlen, alle Unterabschnitte in einem einzigen Antrag („Hauptantrag“) zusammenzufassen, um das Verfahren zu vereinfachen. Dieses wird bei der Untere Umweltschutzbehörde beantragt. Die Baugenehmigung wird in Übereinstimmung mit der BlmSchV erteilt. Der Bau der Halle ist ein eigenständiger Bauantrag. Es sollte jedoch versucht werden, die Strom-, Heizungs- und Wasserrechte in den Hauptantrag einzubeziehen. Dies ist verfahrensökonomisch vorteilhafter.

Auch beim Schutz vor Lärm- und Staubbelastung durch den Brecher und andere Anlagen müssen bestimmte Normen beachtet und eingehalten werden. Baut man das RC-Zentrum in eine Halle, kann der Lärmpegel und die Staubbildung direkt reguliert werden. Die Richtwerte werden in Baulärm AVV und einer entsprechenden Ausbreitungsrechnung nach DIN ISO 9613-2 ausgedrückt. Hier sind die Immissionsrichtwerte eingeschränkt (Wohngebiete haben z.B. tagsüber 50 db(A) und nachts 35 db(A)).

### 3.5. Erstellung eines Gesamtmodells

Wie oben gezeigt, schlägt diese Arbeit ein Gesamtmodell des Materialflusses vor, das aus 3 parallelen Schritten aufgebaut ist und darauf abzielt, Strategien für die Verwendung und Aufbereitung von Materialien zu entwickeln, um sie vor Ort lagern, recyceln und wiederverwenden zu können.

Zunächst wird ein Flächenmodell erstellt, um die Baustelle und ihre physikalischen und geografischen Eigenschaften zu verstehen. So wird jeder Flächeneinheit auf dem Gelände eine Nutzung zugeordnet, der Aufbau gliedert sich also unter anderem in Straßen, Grünflächen, Gelände und Bebauung. Auf diese Weise wird begonnen, die Materialien und die physikalische Zusammensetzung des Gebiets zu analysieren. Zweitens wird ein Mengenmodell erstellt, um die vorhandenen Massen zu berechnen und Strategien zu entwickeln, wie am besten das Material aufbereitet und wiederverwendet wird. Dann wird der Materialimport (Material, das auf die Baustelle gebracht wird, können sowohl Primärrohstoffe als auch Sekundärrohstoffe von einer anderen Baustelle sein) und Materialexport (Material, das von der Baustelle entfernt werden muss, entweder aufgrund von Verunreinigungen oder weil es nicht benötigt wird) ermittelt, der für die unterschiedlichen RC-Baustoffe benötigt wird. Danach wird die Zeitdimension hinzugefügt, um zu verstehen, wann wie viel Material gelagert werden muss, je nachdem, wann Material pro Periode anfällt und wie viel Material im Neubau eingebaut wird.

## Musterprojekt Beispiel Stoffstrommodell

Das gesamte Stoffstrommodell zeigt die folgenden 5 Pläne: **Baustelle Altbau**, wo die stilisierte bauliche Situation des Altbauprojekts zu sehen ist", das **Abrissmaterial**, wo angezeigt wird, wann Material (Jahr je nach Farbe) und aus welchem Ort des Projekts anfällt, **Lagermaterial**, das zeigt, wie viel Material während des Projekts in jedem Kästen gelagert wird, **Baustelle Neubau**, in der die physische Situation des Neubauprojekts zu sehen ist, und das **Einbaumaterial**, das zeigt, wie viel Material in jedem Projektkasten in welchem Jahr für den Neubau eingebaut wird. Abbildung 25 zeigt dieses gesamte Stoffstrommodell. Die Zahl in jedem Kasten bezieht sich auf die Materialmenge auf dieser Stelle. Jede Einheit stellt 50.000 Tonnen dar, so dass beispielsweise im Kasten A1 der Abrissmaterial-Darstellung 250.000 t Abrissmaterial berechnet werden ( $5 \cdot 50.000$  t). In den Darstellungen repräsentieren die Kästen mit oranger Umrandung das Jahr des Abrisses/Neubaus, der Kasten mit schwarzer Umrandung die damalige räumliche Infrastruktur. Nähere Informationen zur Anwendung dieser Darstellungen auf das Stoffstrommodell finden sich in Abbildung 27.

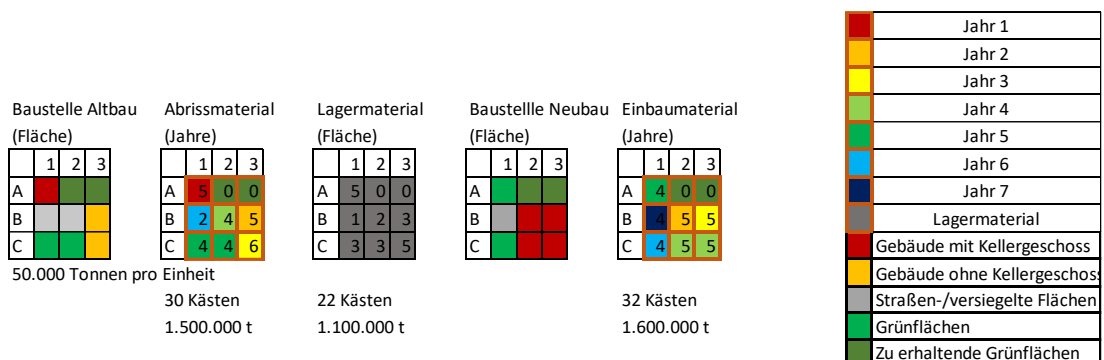
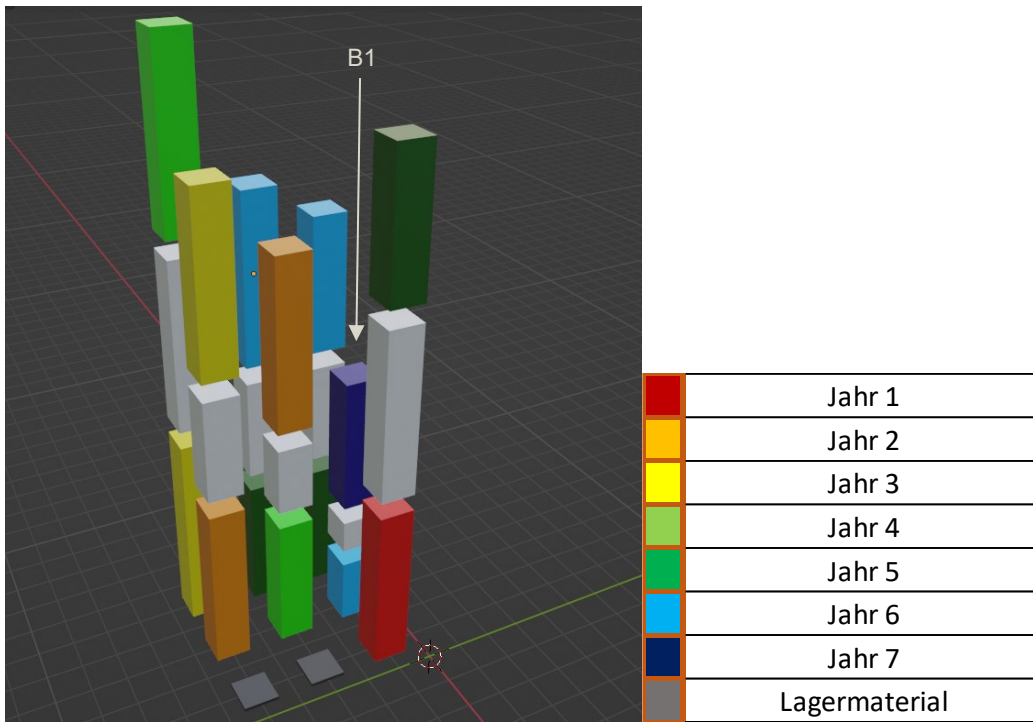


Abbildung 25: Gesamtstoffstrommodell in 2D

Abbildung 26 wurde aus den Daten des Flächenmodells, Mengenmodells und Stoffstrommodells entwickelt. Im Musterprojekt erkennt man die 9 Projektkästen der Baustelle und die Materialbelegung von jedem. Die unterste Säule zeigt das anfallende Material in den Kästen, und jede Farbe stellt das Jahr dar, in dem die Baufeldfreimachung an dieser Stelle erfolgt ist. Die mittlere (weiße) Säule stellt die Materialmenge dar, die in diesen Kästen während des Projektes gelagert wird. Die oberste Säule zeigt das Material, das für den Neubau pro Projektkasten eingebaut wird, und die Farbe bestimmt, in welchem Jahr der Bau ausgeführt wird. Auf diese Weise entsteht ein 4D-Modell, das die Menge an anfallendem Material und das verbaute Material im Neubau unter Berücksichtigung des Jahres, sowie das gelagerte Material zu jedem Zeitpunkt des Projekts und des Standorts zeigt.



**Abbildung 26: Gesamtstoffstrommodell Säulendiagramm in 3D**

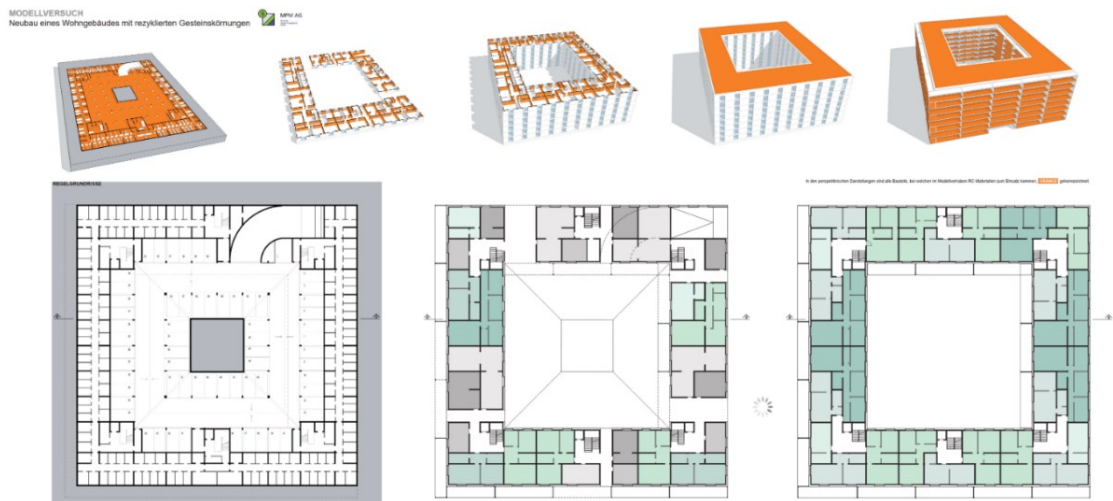
Der Hektar im Quadrat B1, der eine Straßenfläche ist, wird als letzter abgerissen und für den Neubau vorbereitet (Abbau im Jahr 6, Neubau im Jahr 7, siehe Farben). Daher ist dieser Punkt im Verlauf des Projekts ein strategischer Ort, um die Recyclinganlage zu platzieren. So kann das Material an dieser Stelle gelagert, aufbereitet und recycelt werden. Diese Stelle ist gut an die gesamte Baustelle angebunden und dank des Terminplanverlaufs als Recyclingstelle geeignet.

Wie sich bei der Erstellung dieses Stoffstrommodells gezeigt hat, ist es unerlässlich, den Rückbau mit dem Neubau zu analysieren und zu überlappen, um Synergien zu identifizieren und Strategien für den Materialtransport zu entwickeln. Es ist wichtig, den Terminplan frühzeitig im Projekt einzubeziehen, um zeitliche Lagerflächen je nach Auslastung von Raum, Zeit und Mengen zu erreichen.

### 3.6. Mögliches Ergebnis bei ordnungsgemäße Recyclingplanung: Musterhaus aus RC-Beton

Das folgende Beispiel zeigt einen Neubau für ein Wohnhaus mit RC-Gesteinskörnungen, der durch eine strukturierte Planung unter Berücksichtigung des Stoffstrommanagements erreicht werden kann. Der Entwurf des Gebäudes verwendet große Mengen an RC-Beton und respektiert gleichzeitig die technischen Anforderungen für die Struktur (MPM AG & prpm Architekten). Hier sollen bestimmte Teile des Gebäudes unter Verwendung eines R-Betons mit ca. 30% recycelten Gesteinskörnungen (nach Norm) und

andere Bauteile unter Verwendung von R-Beton 100% (ZiE) gebaut werden. Die Zustimmung im Einzelfall muss bei der Baubehörde beantragt werden. Dabei wird auf die DAFStB-Richtlinie zurückgegriffen, die Beton nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 und recycelten Gesteinskörnungen nach DIN EN 12620 definiert. Die folgende Abbildung zeigt das neue Wohnhaus, wobei alle Bauteile, in denen RC-Materialien im Modellprojekt verwendet werden, orange gekennzeichnet sind.



**Abbildung 27: Neubau eines Wohngebäudes mit rezyklierten Gesteinskörnungen (MPM AG & prpm Architekten)**

Durch eine geeignete Vorplanung und der Durchführung von Machbarkeitsstudien kann ein Projekt mit großen Mengen von RC-Beton mit hoher struktureller Qualität erfolgreich sein. Das Musterprojekt zeigt, dass ein Wohngebäude ohne Einschränkungen bei der Anlagenplanung mit C20/25-Beton aus R-Beton mit 100 % recycelten Zuschlagstoffen errichtet werden kann. Außenwände und Bodenplatten werden jedoch mit R-Beton nach Norm (Typ 1 und Typ 2 RC-Beton) ausgeführt. Das bedeutet, dass 60 % des Rohbaus mit RC-Beton gebaut werden kann. Für dieses Projekt entspricht dies 44.000 t an RC-Beton.

Durch ein geeignetes Stoffstrommodell können große Mengen an Material vor Ort recycelt werden, wodurch der Bedarf an Primärrohstoffen reduziert und die LKW-Fahrten gesenkt werden. Geht man von 2 Fahrten pro Ladung aus (Entnahme: voll + leer), so sind für die Lieferung von 44.000 t etwa 7.000 Fahrten erforderlich, was große CO<sub>2</sub>-Emissionen durch den Einsatz von Kraftstoffen verursacht (MPM AG & prpm Architekten). Wie im obigen Beispiel zu sehen ist, handelt es sich um ein optimales RC-Gebäude, das grundsätzlich bei der Entwicklung eines Projekts mit Recycling von Baustoffen angestrebt werden sollte. Oft scheitert ein solches Projekt jedoch an der mangelnden Planung, wie mit den Materialien aus dem Rückbau des alten Gebäudes vor Ort umgegangen werden soll.

*Aus diesem Grund ist die Anwendung eines Stoffstrom- und Materialtransportmodells auf der Baustelle in der Frühphase des Projekts unerlässlich, um Projekte entwickeln zu können, bei denen große Mengen an recycelten Materialien für den Bau von Gebäuden verwendet werden.*



## 4. Anwendung des Stoffstrommodells am Beispiel des Fliegerhorsts Erding

### 4.1. Projektbeschreibung Fliegerhorst Erding (FHE) und Ziele

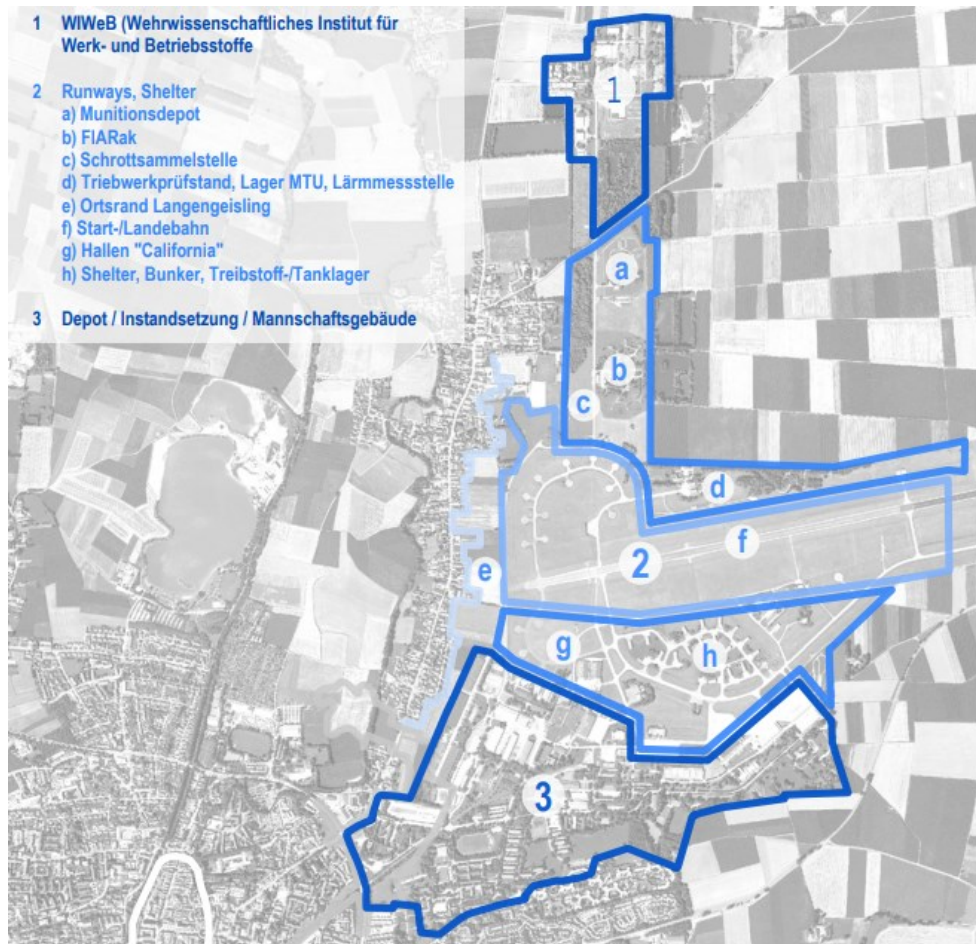


Abbildung 28: Entwicklungsstudie Fliegerhorst Erding (Stadt Erding 2020)

In der Stadt des Landkreises Erding, nordöstlich von München, läuft ein städtebauliches Großprojekt zur Konversion des Fliegerhorstes Erding zur zivilen Nutzung. Mit der Umwandlung von militärischer zu ziviler Nutzung fällt das Areal wieder in die kommunale Planungshoheit der Stadt Erding (Stadt Erding 2020). Das Projekt zielt darauf ab, durch die Anwendung von Recyclingstrategien und die Integration von grüner und blauer Infrastruktur in die bebaute Umgebung zu einer der nachhaltigsten Stadtentwicklungen des Landes zu werden. Dafür wird ein Quartier mit Zukunftsvision entwickelt, das die Geschichte und Besonderheiten des Standortes aufgreift. Es soll Leben, Arbeiten, Versorgung und Erholung eng miteinander verknüpfen und innovative Lösungen auf die Fragen der Mobilität und des Klimaschutzes geben. (Stadt Erding 2020)

Infrastruktur, die nach 1935 gebaut wurde, wird selektiv zurückgebaut, um mit dem Bau neuer Gebäude zu beginnen. Der Bauschutt des Gebäudeabbruchs und die Ressourcen aus dem Bodenaushub sollen jedoch nicht – wie sonst üblich – abtransportiert, sondern vor Ort zunächst verwertet werden, um hochwertige RC-Baustoffe für den Neubau herzustellen. Diese werden dann vor Ort mit den entsprechenden Anlagen aufbereitet und genehmigt, damit sie als voll funktionsfähiger und rechtlich anerkannter Baustoff für das geplante Neubauvorhaben wiederverwendet werden können. Das spart nicht nur Material, entlastet die Deponien und fördert die Kreislaufwirtschaft, sondern spart auch eine Menge LKW-Transporte und damit CO<sub>2</sub>-Emissionen ein.

Der Militärstützpunkt hat eine Gesamtgröße von ca. 413 ha, während der im Architekturwettbewerb und in dieser Arbeit betrachtete Vertiefungsbereich ca. 190 ha groß ist. Der Neubau wird auf einem zentralen Areal im Vertiefungsbereich von rund 28 ha entwickelt. Mit seiner Gesamtfläche ist der Fliegerhorst Erding derzeit die größte Konversionsfläche in Bayern und eine der größten in Deutschland. (Stadt Erding 2019)

Für die Stadt Erding ist dies eine große Chance, wichtige Schritte in Richtung einer Kreislaufwirtschaft zu unternehmen. Sie kann einen Beitrag zur nachhaltigen Entwicklung leisten, indem sie die Umwandlung des Geländes des Luftwaffenstützpunkts durch die Wiederverwertung von Bau- und Abbruchmaterial in recycelte Zuschlagstoffe vorantreibt. Dazu wird das im vorigen Kapitel entwickelte Stoffstrommodell für dieses Projekt verwendet.

Die Geschichte des Fliegerhorsts Erding reicht bis ins Jahr 1935 zurück, als der Militärstützpunkt von der Wehrmacht errichtet wurde. 1944 wurde der Fliegerhorst von den Alliierten schwer bombardiert und zu 90 % zerstört. Ab Mai 1945 haben die Alliierten den Militärstandort bis 1957 besetzt, dann erfolgte die Übergabe an die Luftwaffe. Danach erfolgte ein Umstrukturierungs- und Sanierungsprozess auf dem Areal bis 2011, als im Rahmen der Bundeswehrreform beschlossen wurde, den Stützpunkt zum 31.12.2024 zu schließen und ab 2025 zivil zu nutzen (Stadt Erding 2020).



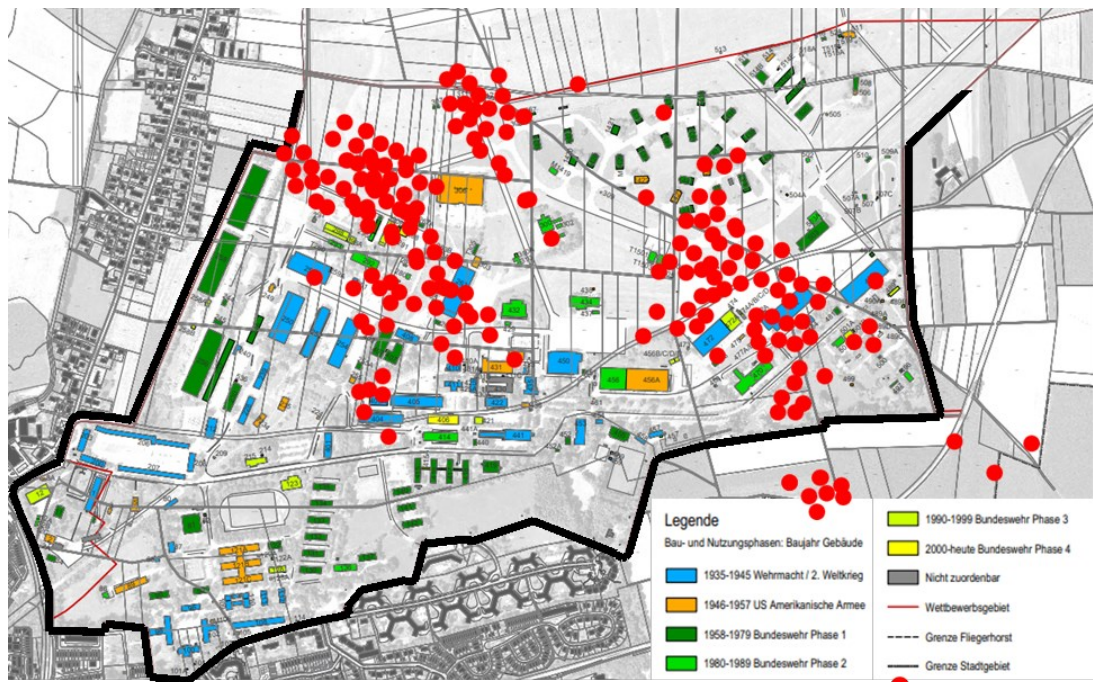


Abbildung 29: Überlagerung FHE und Bombenrichter (Eigene Darstellung nach Stadt Erding)

## 4.2. Flächenmodell

### 4.2.1. Bestandsbeschreibung

#### Topografie

Nach Angaben der Stadt ist die Topografie Erdings im Allgemeinen flach ohne steile Hänge im Gelände. Südlich der Landebahn steigt das Gelände jedoch nach Südwesten an und fällt dann wieder ab. Die Höhe hat einen Spielraum zwischen 460 und 480 m über dem Meeresspiegel.

#### Grünflächen

Diskutiert wird noch, welche Grünflächen intakt bleiben sollen und in welchen Bereichen eine Kampfmittelräumung erfolgen soll. Bekannt ist, dass es in der Gegend viele Bäume gibt, die etwa 80 Jahre alt sind (kurz nach dem Krieg gepflanzt), was zu Konflikten führt zwischen dem Wunsch, alte Bäume intakt zu halten, und einer umfangreichen Kampfmittelräumung, um den Boden vor der Umwandlung vorzubereiten.

#### Boden und Grundwasser

Der Boden im Südosten des Fliegerhorstes wird von Braunerden aus Lößlehm über Lößlehm-Fließerde gebildet.

Die Richtung der Grundwasserströmung ist im Allgemeinen von Süden nach Norden. Das Grundwasser ist nur gering belastet. Aufgrund hoher Grundwasserstände ist das gesamte Gebiet laut Wasserwirtschaftsamt als wassersensibles Gebiet ausgewiesen.

Für die Bodenschichten kann von einer hohen Wasserundurchlässigkeit ausgegangen werden. Im Areal gibt es keine Wasserschutzgebiete oder Quellen.

### **Kampfmittel**

Wie man auf der Kampfmittelkarte sehen kann, wurde der Fliegerhorst während des Zweiten Weltkriegs stark bombardiert. Aus diesem Grund wird erwartet, dass viel Kampfmittelschrott während der Baufeldfreimachung entdeckt wird. Aus Zeitzeugenberichten ist bekannt, dass kontaminierter Erdaushub von Nachkriegsgebäuden als Verfüllungen über den Fliegerhorst verteilt wurde. Aus diesem Grund rechnet man in weiten Teilen des Aushubs neben Munition auch mit Flugzeugmotoren, Propellern, Autoteilen und andere Bauschuttteilen. Bekannt ist auch, dass es im Areal Bodenkämpfe gab, also muss eine Bodensiebung in den belasteten Bereichen erfolgen.

### **Gebäude**

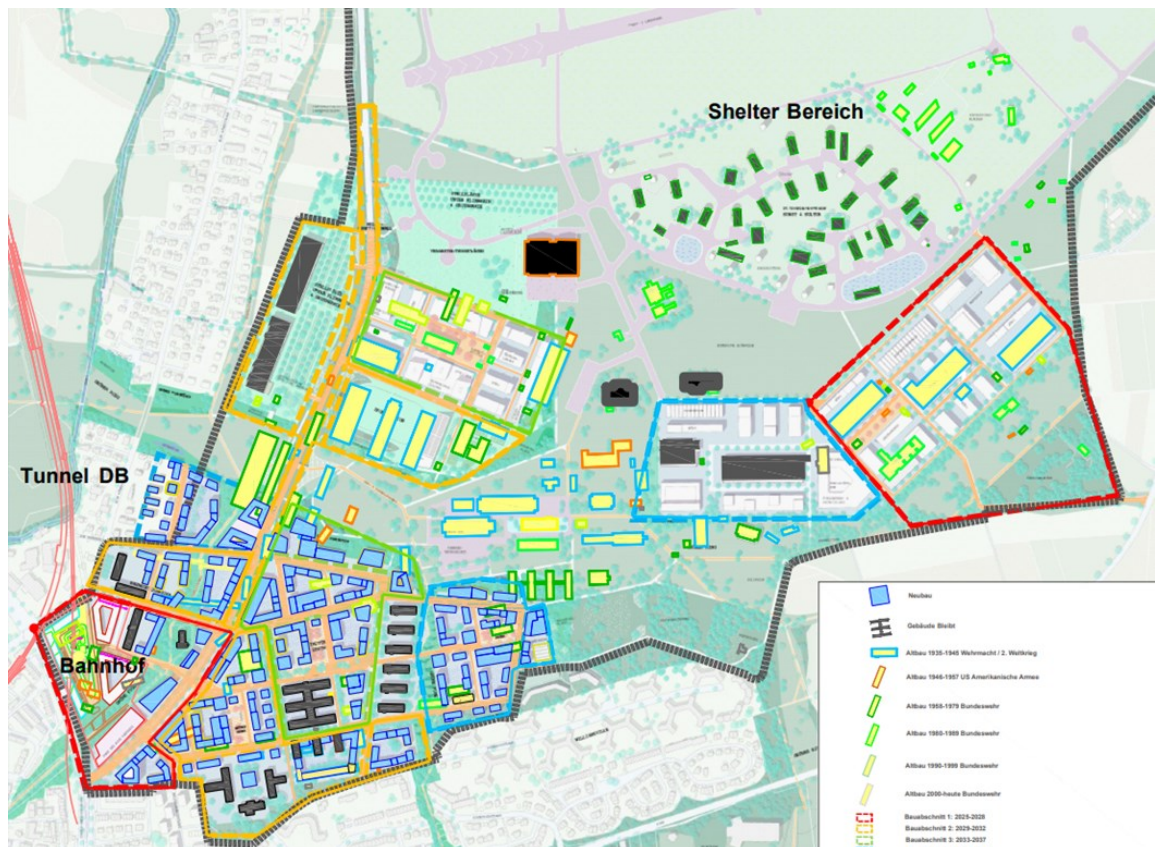
Insgesamt gibt es für den Vertiefungsbereich im Süden des Fliegerhorstes 246 Gebäude bzw. Bauwerke. Davon sollen 157 abgerissen werden, 89 (inklusive Gebäude im Schelker-Bereich) sollen erhalten bleiben. Es wird angenommen, dass nur Wohn- und das Bürogebäude (Verwaltung) Kellergeschosse haben. Insgesamt wird von 27 Gebäuden mit unterirdischer Gebäudekonstruktion ausgegangen.

### **Infrastruktur**

Der Wettbewerb für den Neubau liegt im Bereich von 190 Hektar des Vertiefungsgebiets. Insgesamt umfasst das Gebiet 19,3 ha überbaute Fläche. Die Straßen nehmen eine Fläche von 18,9 ha ein.

#### **4.2.2. Erstellung eines Baustellenleitplans**

Abbildung 30 zeigt einen in AutoCAD erstellten Baustellenleitplan des Fliegerhorst Erdings. Auf diese Weise können Synergien gesucht und ein tieferes Verständnis der notwendigen Strategien zur Förderung des Recyclings vor Ort erreicht werden. In der Abbildung sind die verbleibenden Gebäude in schwarz, die abzureißenden in gelb und der Neubau in blau dargestellt. Außerdem sind die verschiedenen Bebauungspläne für die Entwicklungsabschnitte farblich dargestellt.



**Abbildung 30: Baustellenleitplan FHE (eigene Darstellung nach Stadt Erding)**

- B-Plan 1, rote Farbe (2025-2028) = 30,2 Hektar
- B-Plan 2, dunkelgelbe Farbe (2029-2032) = 28,1 Hektar
- B-Plan 3, grüne Farbe (2033-2037) = 17,3 Hektar
- B-Plan 4, hellblaue Farbe (2038-2042) = 15,2 Hektar

Insgesamt haben alle Bebauungspläne eine Gesamtfläche von 90,8 Hektar, auf der die Entwicklung stattfinden soll. Das gesamte Vertiefungsgebiet, dargestellt im Baustellenleitplan, ist ca. 190 ha groß (FHE südlich von der Landebahn). Das bedeutet, dass nur in 90 von 190 ha große bauliche Veränderungen stattfinden werden. Die übrigen Flächen zwischen diesen Bebauungsplänen bedürfen lediglich einer Altlastenuntersuchung und eventueller -sanierung.

#### **4.2.3. Leitungssituation**

Wie Abbildung 31 zeigt, gibt es im Fliegerhorst Erding ein komplexes Leitungssystem, bei dem die Pläne häufig nicht vollständig vorhanden sind. Die Übergabepunkte des Hauptsystems in Richtung Fliegerhorst sind im Bild nicht erkennbar. Diese Punkte sind wichtig, um zu verstehen, woher die Energie kommt, das Trinkwasser, das Gas, und wo das Abwasser den Raum verlässt. Die Lage der Leitungen ist wichtig für den Betrieb der Stoffverwertung vor Ort, da bekannt sein muss, wie die Anlagen an Wasser und

Energie angeschlossen werden können. Die folgenden Farben stellen die verschiedenen Linien dar:

- Hellblaue Leitung = Wasser
- Lila/Dunkelblaue Leitung = Abwasser
- Gelbe Leitung = Gas
  - Die Gasleitung endet an einem beliebigen Punkt innerhalb des Areals, ab diesem Punkt beginnt die orange Linie (Fernwärme). Daher wird voraussichtlich Fernwärme vor Ort erzeugt. Möglicherweise gibt es in der Gegend ein Kraftwerk, aber für genauere Fakten sind weitere Informationen erforderlich.
- Rote Leitung = Kabel (Strom)

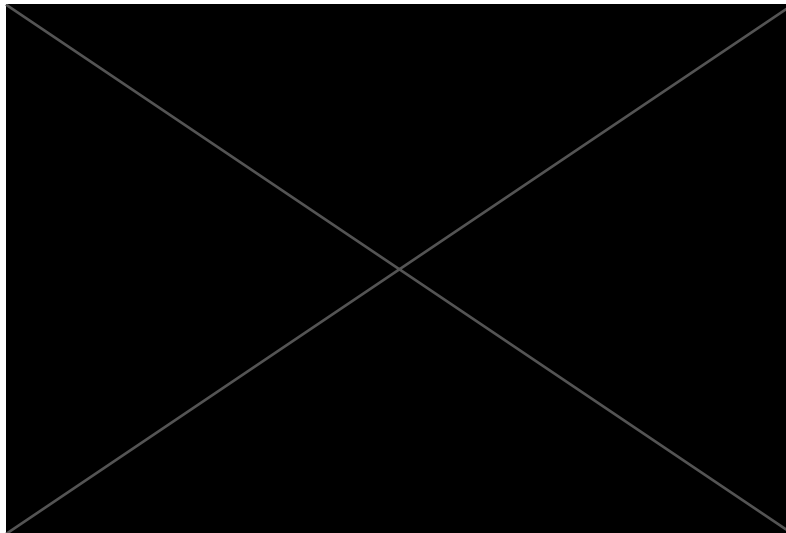


Abbildung 31: Leitungssituation im FHE

#### 4.2.4. Baumbestand und Grünflächen

Im Vertiefungsbereich befinden sich rund 79 Hektar Grünflächen zwischen den verschiedenen Entwicklungsflächen. In diesen tauchen Waldflächen, Bäume, Gärten, Flächen mit Gras, Pflanzen, Büsche und andere Objekte auf. Insgesamt stehen im Vertiefungsbereich mehr als 3.500 Bäume.



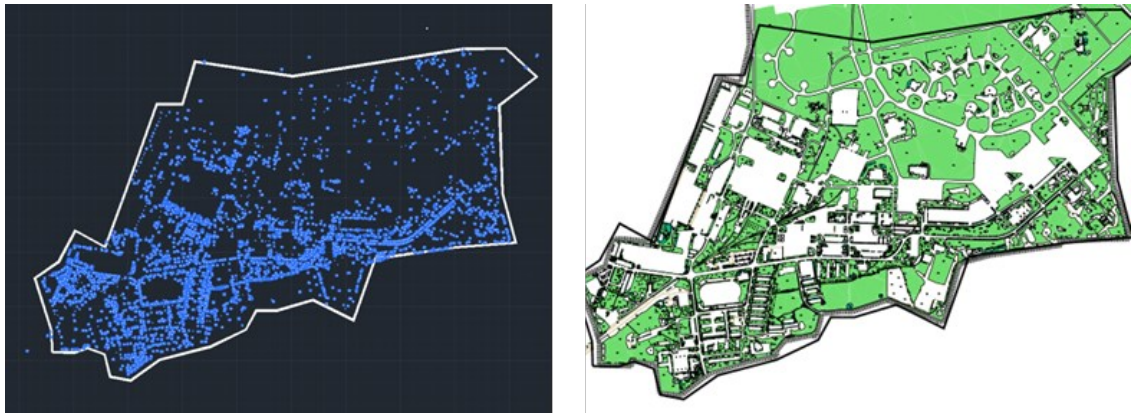


Abbildung 32: Grünflächen und Baumbestand im FHE

#### 4.2.5. Routen und Logistik des Materialimports - Transportwege Rohstoffe

Die folgende Grafik zeigt die verschiedenen Deponien, Recyclinganlagen, Beton- und Zementwerke in Bayern. Hier wurden die wichtigsten Anlagen für das Projekt Fliegerhorst Erding ausgewählt, entweder nach Entfernung oder nach Größe. Wie zu sehen ist, liegt das nächste Betonwerk 5 km, die nächste Deponie 46 km und die nächste Recyclinganlage 34 km entfernt. Wird das Material also zum Neubau zur Baustelle transportiert und nach seiner Nutzungsdauer deponiert oder zu einer Recyclinganlage gebracht, muss jeder Kubikmeter Material mindestens 40 km gefahren werden. Aus diesem Grund wird vorgeschlagen, innerhalb des Areals FHE ein Recyclingzentrum zu errichten, um die Sekundärrohstoffe vor Ort produzieren zu können und sowohl den Import als auch den Export von Material von außen zu reduzieren, so dass das Material über kurze Distanzen von etwa 1 km anstatt 40 km transportiert werden muss, was deutlich CO<sub>2</sub>-Emissionen sparen würde.

Recyclinganlagen	Entfernung
Kieswerk Obermayr	34 km
AR Recycling GmbH	38 km
Ettengruber GmbH	45 km
Breitsamer	49 km

Zementwerke	Entfernung
Zementwerk Wiesböck & Co.	101 km
Heidelberger Cement AG	132 km
Solnhofen Portland - Zementwerke GmbH	133 km
Märker Zement GmbH	149 km
Schwenk Zement	188 km

Deponien	Entfernung
Bauschuttannahmestelle Geisenhausen	46 km
Reststoffdeponie Jedenhofen	51 km
Deponie Haunsbach	81 km
Donau Bauschutt Recycling	87 km
Bauschuttdeponie Fisel	143 km

Betonwerke	Entfernung
Berger Beton GmbH	5 km
Rohrdorfer Transportbeton GmbH	7 km
Rohrdorfer Betonwerke GmbH	13 km
Schwenk GmbH	15 km
CEMEX AG	30 km
Schwenk GmbH	37 km

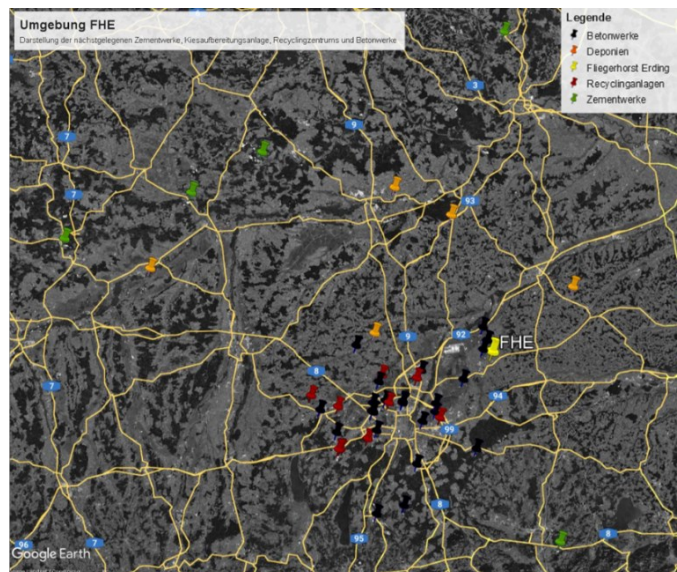


Abbildung 33: Entfernungen des Materialtransports zum Fliegerhorst Erding

#### 4.2.6. Fazit Flächenmodell

Zum Abschluss des Flächenmodells wird eine tabellarische Gegenüberstellung der Flächennutzungen des Bestandsbaus und der verschiedenen Vertiefungsbereiche erstellt. Wie zuvor gezeigt, soll es 4 übergeordnete Bebauungspläne für die Entwicklung des Quartiers geben, also werden die Angaben zu diesen für die Berechnungen der Stoffströme im nächsten Kapitel benutzt. Die folgende Tabelle fasst die aktuelle Situation und räumliche Zusammensetzung des Vertiefungsbereiches des FHE zusammen und zeigt die bauliche Zusammensetzung für die verschiedenen Entwicklungspläne. So ist schnell erkennbar, wie viel Prozent des jeweiligen Bebauungsplans auf umbaute Räume (versiegelte Flächen und Straßen), und Grünflächen entfallen. Die Angaben stammen aus dem zuvor erstellten Baustellenleitplan.

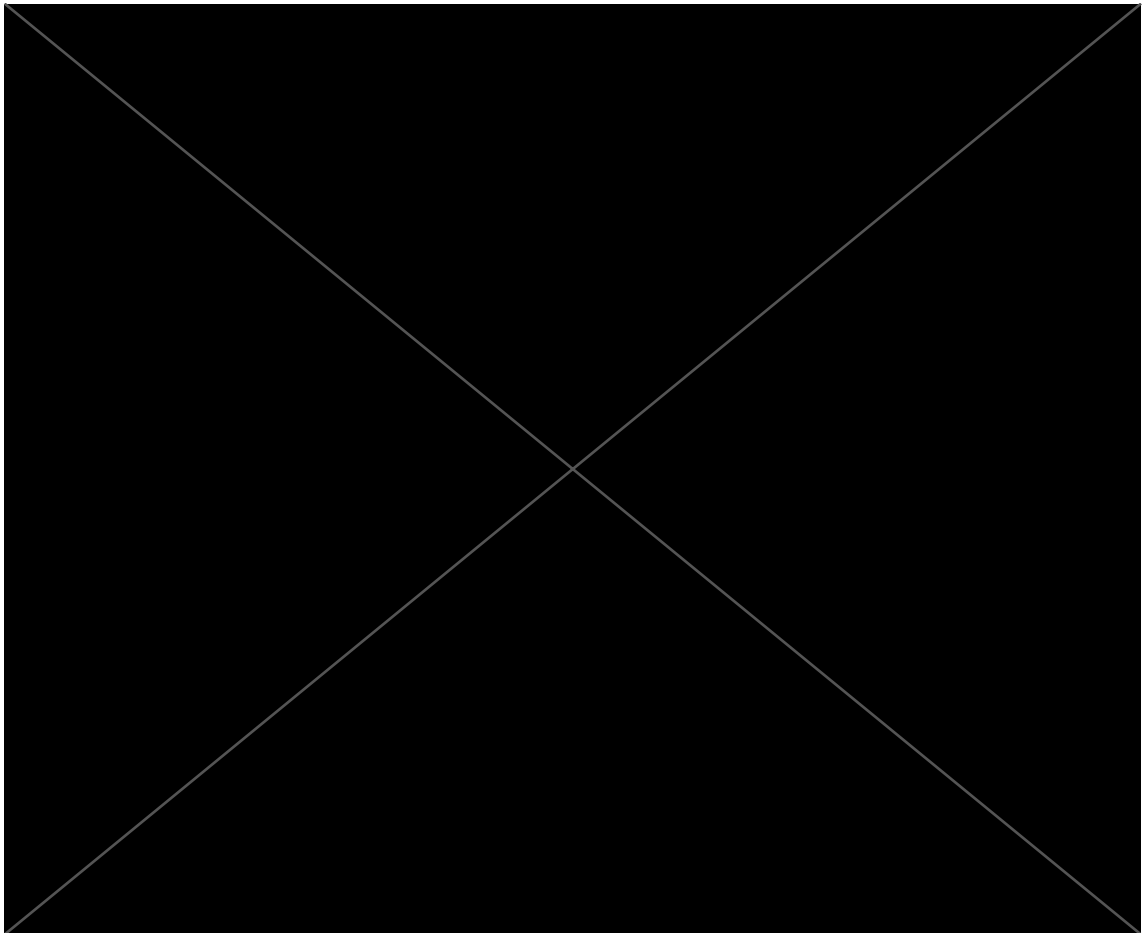
**Tabelle 6: Flächennutzungsvergleich Bestandsbau und Entwicklungspläne im Vertiefungsbereich des FHE (eigene Darstellung)**

Vertiefungsbereich					
Flächennutzung	Bestandsbau	Neubau (B-Pläne)			
		BP 1	BP 2	BP 3	BP 4
Gesamtfläche	200 ha	30,2	28,1	17,3	15,2
Überbaute Fläche	19,28 ha	17	11,2	3	10,4
Straßen	18,9 ha	3,2	3,5	2,9	1,4
Bäume	3500 Bäume	-	-	-	-
Grünflächen	160 ha	10	13,4	11,4	3,4

#### 4.3. Mengenmodell mit Mengenbilanz

In diesem Kapitel erfolgt der Aufbau eines CAD-Modells anhand der verfügbaren Pläne der Großen Kreisstadt Erding. Dazu wird ein digitales Projektmodell erstellt. Als Basis des Modells werden die von der Stadt Erding bereitgestellten CAD-Layer genommen, in denen die Gebäude als Linienkörper dargestellt sind. Mit Hilfe von Google Maps, Google Earth und Blender wurde die Höhe jedes Gebäudes und jeder Infrastruktur abgemessen und in AutoCAD wurden die unterschiedlichen Höhen als Volumenkörper dem entsprechenden Gebäude zugewiesen. Auf diese Weise war es möglich, alle Gebäude als 3D-Modelle in der Ebene zu modellieren. Mit Hilfe der Excel-Tabellen zu den Baujahren, Nutzung und Zustand der Gebäude war es möglich, den verschiedenen Gebäuden in einer weiteren CAD-Schicht eine Nutzung und ein Baujahr zuzuordnen. Dieselbe Excel-Tabelle ermöglicht es, bestehende Gebäude zu identifizieren, welche abgerissen werden und welche erhalten bleiben. Dadurch konnten die verschiedenen Gebäude des Projekts, das spezifische Baujahr, der spezifische Standort und die Größe des Körpers modelliert werden.

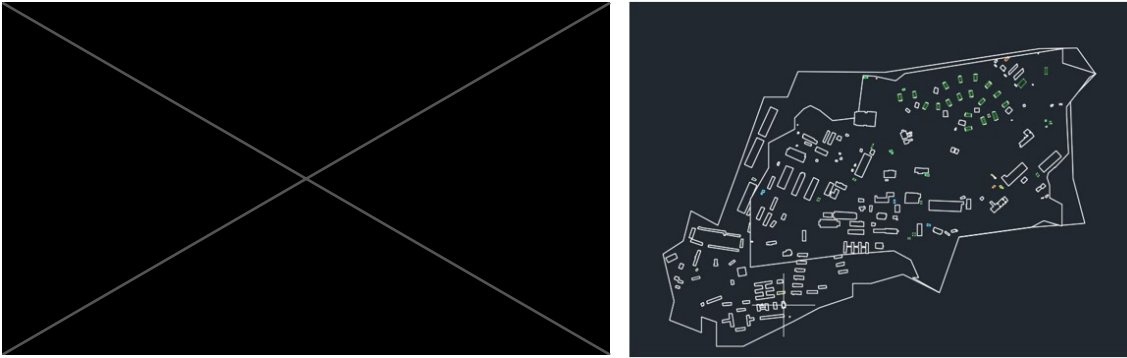
### 4.3.1. Boden



**Abbildung 34: Überlagerung Kampfmittelsituation im FHE-Areal**

Die rote Zone ist stark mit Kampfmitteln belastet. Daher werden in diesen Flächen 2 Meter Boden ausgehoben. Die zu erhaltenden Grünflächen werden nicht beeinträchtigt, um die vorhandenen Bäume und Natur nicht zu beschädigen. Der Rest des Geländes wird bis zu einer durchschnittlichen Tiefe von 1 m ausgehoben, um die Frostschutzzone für die Verlegung der neuen Leitungen zu erreichen. Die stark kontaminierten Flächen des Fliegerhorstes Erding haben bei einem Aushub von 2 m ein Volumen von 5.070.800 m<sup>3</sup> (=2\*2.535.400 m<sup>3</sup>). Die restliche Fläche, die nicht stark kontaminiert ist und bei der ein 1m hoher Aushub erstellt werden soll, hat ein Volumen von 1.342.502 m<sup>3</sup>.

Durch diese Annäherung kann für den gesamten Fliegerhorst Erding ein Bodenaushub von insgesamt 6.413.302 m<sup>3</sup> angenommen werden. Bei einer Dichte von 2,0 t/m<sup>3</sup> (DIN 1055-2 2010) beträgt die Gesamtmenge an Boden 12.826.604 Tonnen.



**Abbildung 35: Bodenaushubmenge Vertiefungsbereich (eigene Darstellung)**

Da die 4 Bebauungspläne im Vertiefungsbereich jedoch die einzigen Bereiche sind, an denen es konkrete Informationen über die zu treffenden baulichen Maßnahmen gibt, werden diese Flächen zur Berechnung des Bodenaushubs verwendet. Wie oben errechnet, ergeben die vier Bebauungspläne zusammen eine Gesamtgrünfläche von 38,2 Hektar. Da noch kein Plan vorliegt, in welche Flächen die Grünflächen erhalten bleiben und in dem eine vollständige Kampfmittelbeseitigung vorgenommen wird, wird die Annahme getroffen, dass in diesen Entwicklungsbereichen 30 % der Grünflächen ohne jegliche Intervention erhalten bleiben. Auf diese Weise wird innerhalb der Entwicklungspläne eine Fläche von 267.400 m<sup>2</sup> (26,74 ha) Grünflächen berechnet, auf der Kampfmittelbeseitigung und Bodenaushube vorgenommen werden. Aufgrund der großen Präsenz von Bombenrichtern und die damit hochbelasteten Bereiche wird für die vollständige Kampfmittelbeseitigung (Kategorie 5 des BFR-Kampfmittelräumungsmerkblatt) eine Aushubtiefe von 2 m empfohlen. Dadurch errechnet sich eine Bodenmenge aus dem Aushub von 534.800 m<sup>3</sup> was einer Gesamtmasse von 1.069.600 Tonnen Boden entspricht.

Im Areal müssen mehrere Testfelder für die genaue Kampfmittelbeseitigung durchgeführt werden. Wahrscheinlich werden zu Beginn Testfelder in der Mitte der roten Zone angelegt, um die Kampfmittelbelastung zu messen. Danach wird in mehreren Testfeldern im roten Bereich verteilt geprüft, ob die Belastung konstant oder nur punktuell ist. So kann die Art und Stärke der Kampfmittelbelastung analysiert und ggf. weitere Maßnahmen eingeleitet werden. Diese Testfelder werden nach und nach von gepanzerten Baggern geräumt und haben Standardgrößen von ca. 10 m \* 15 m. Als Ergebnis der Testfelder wird untersucht, wie viele Störpunkte es in welcher Tiefe pro m<sup>3</sup> gibt.

#### **4.3.2. Bauschutt**

Für dieses Kapitel wurden die Gebäude in 3D in AutoCAD entworfen, wobei Google Satelliten verwendet wurde, um die Grundfläche jedes Gebäudes zu markieren und dann die Höhe jedes Gebäudes zu ermitteln. Wie man sehen kann, ist jedes Gebäude, das in AutoCAD modelliert wurde, ein 3D-Volumenkörper mit einer bestimmten Farbe,



die dem Baujahr entspricht. Anhand eines weiteren Layers lässt sich erkennen, welche dieser Gebäude abgerissen und welche erhalten bleiben, sowie welche spezifische Nutzung sie jeweils haben. Auf diese Weise ist es möglich, einen 3D-Baufeldplan zu erstellen, der die vorhandene Infrastruktur im Areal einbezieht. In der folgenden Abbildung entspricht die hellblaue Farbe den Gebäuden, die von der Wehrmacht zwischen 1935-1945 gebaut wurden; die orangefarbenen wurden zwischen 1946 und 1957 von der US-Armee gebaut; die dunkelgrünen von der Bundeswehr zwischen 1958-1979 (nach Übergabe des Fliegerhorstes an die Bundeswehr); Gebäude mit der Farbe Grün „Limette“ wurden zwischen 1980-1989 gebaut, hellgrün zwischen 1990-1999 und gelb entspricht Gebäuden, die nach 2000 gebaut wurden.



**Abbildung 36: 3D-Modelle von Gebäuden nach Baujahr und Nutzung (eigene Darstellung)**

Die untere Tabelle zeigt die Mengenermittlung von Bauschutt aus dem Rückbau der Gebäude. Wie ersichtlich, gliedert sich die Gebäudenutzung im FHE in Fabrik- und Werkstättegebäude, Handels- und Lagerräume, Büro- und Verwaltungsgebäude, Mehrfamilienhäuser und Sonstige Nutzung. Mittels AutoCAD war es möglich, den Brutto-rauminhalt jedes dieser Gebäude zu ermitteln, und durch die im vorherigen Kapitel erstellten Tabellen zum Umrechnungsfaktor (BRI zu Materialmenge) gelang es, die Materialmenge für alle Gebäude, die abgerissen werden, zu berechnen. Zur Annäherung der stofflichen Zusammensetzung der Materialien werden die IÖR-Tabellen (Leibnitz-Institut) verwendet (Mehrfamilienhäuser, die zwischen 1919-1948 gebaut wurden).

Insgesamt werden 157 Gebäude zurückgebaut. Die Summe des Brutto-rauminhalts aller rückbaubaren Gebäude beträgt 964.613 m<sup>3</sup>. Aus der Umrechnung nach Baujahr und Nutzung des Gebäudes ergibt sich eine Materialmenge von ca. 331.322 t, davon werden ca. 94.604 t wegen Verlustraten entsorgt.

**Tabelle 7: Mengenermittlung Bauschutt aus dem Rückbau (eigene Darstellung)**

Jahr	Besitzer	Fabrik- und Werkstättegebäude	Handels- und Lagerräume	Büro- und erwaltungsgebäude	Mehrfamilienhaus	Sonstiges	Summe BRI
140	1935-1945 Wehrmacht / 2. Weltkrieg	327.986 m <sup>3</sup> 18x	192.673 m <sup>3</sup>	0 m <sup>3</sup> 0x	25.269 m <sup>3</sup> 3x	0 m <sup>3</sup> 0x	545.929 m <sup>3</sup> 37x
30	1946-1957 USA-Armee	5.049 m <sup>3</sup> 3x	29.776 m <sup>3</sup>	681 m <sup>3</sup> 1x	17.155 m <sup>3</sup> 3x	220 m <sup>3</sup> 3x	52.882 m <sup>3</sup> 18x
94	1958-1979 Bundeswehr Phase 1	74.046 m <sup>3</sup> 16x	95.286 m <sup>3</sup>	12.025 m <sup>3</sup> 3x	57.572 m <sup>3</sup> 9x	788 m <sup>3</sup> 4x	239.717 m <sup>3</sup> 57x
100	1980-1989 Bundeswehr Phase 2	56.336 m <sup>3</sup> 14x	15.314 m <sup>3</sup>	0 m <sup>3</sup> 0x	0 m <sup>3</sup> 0x	0 m <sup>3</sup> 0x	71.649 m <sup>3</sup> 24x
60	1990-1999 Bundeswehr Phase 3	18.156 m <sup>3</sup> 4x	11.345 m <sup>3</sup>	0 m <sup>3</sup> 0x	4.141 m <sup>3</sup> 1x	307 m <sup>3</sup> 1x	33.949 m <sup>3</sup> 14x
50	2000-heute Bundeswehr Phase 4	0 m <sup>3</sup> 0x	8.023 m <sup>3</sup>	0 m <sup>3</sup> 0x	0 m <sup>3</sup> 0x	0 m <sup>3</sup> 0x	8.023 m <sup>3</sup> 1x
8	- nicht zuzuordnen	0 m <sup>3</sup> 0x	2.561 m <sup>3</sup>	0 m <sup>3</sup> 0x	0 m <sup>3</sup> 0x	9.903 m <sup>3</sup> 1x	12.465 m <sup>3</sup> 6x
		<b>481.573 m<sup>3</sup> 55x</b>	<b>354.978 m<sup>3</sup></b>	<b>12.706 m<sup>3</sup> 4x</b>	<b>104.138 m<sup>3</sup> 16x</b>	<b>11.219 m<sup>3</sup> 9x</b>	<b>964.613 m<sup>3</sup> 157x</b>
Jahr	Besitzer	Konstruktionsgewicht FW	Konstruktionsgewicht HL	Konstruktionsgewicht BV	Konstruktionsgewicht MFH	Konstruktionsgewicht S	Summe Materialmengen
140	1935-1945 Wehrmacht / 2. Weltkrieg	107.140 t	61.961 t	0 t	12.216 t	0 t	181.317 t
30	1946-1957 USA-Armee	1.649 t	9.576 t	316 t	8.293 t	71 t	19.906 t
94	1958-1979 Bundeswehr Phase 1	24.188 t	30.643 t	5.588 t	27.832 t	253 t	88.504 t
100	1980-1989 Bundeswehr Phase 2	18.403 t	4.925 t	0 t	0 t	0 t	23.327 t
60	1990-1999 Bundeswehr Phase 3	5.931 t	3.648 t	0 t	2.002 t	99 t	11.680 t
50	2000-heute Bundeswehr Phase 4	0 t	2.580 t	0 t	0 t	0 t	2.580 t
8	- nicht zuzuordnen	0 t	824 t	0 t	0 t	3.185 t	4.008 t
		<b>157.311 t</b>	<b>114.156 t</b>	<b>5.904 t</b>	<b>50.343 t</b>	<b>3.608 t</b>	<b>331.322 t</b>

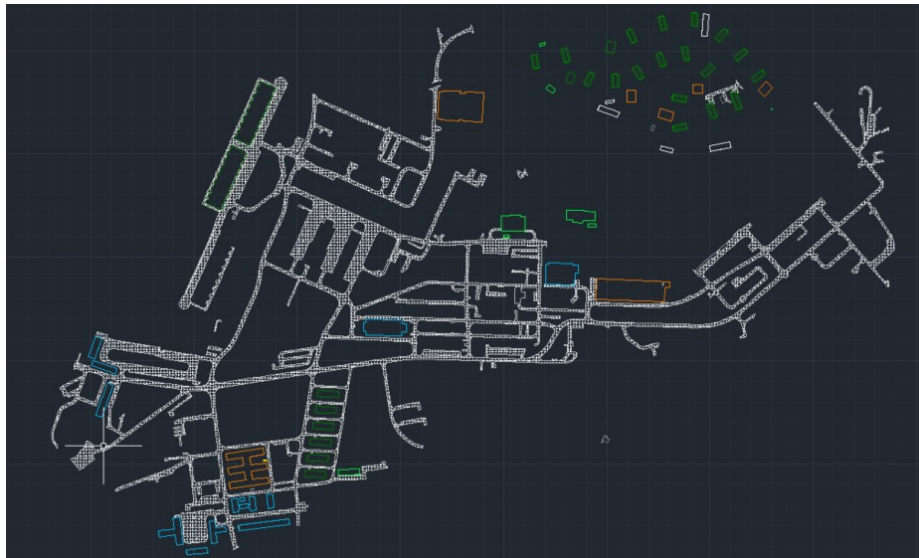
Geschätzt, fallen ca. 7.125 Tonnen auf Metall, 41.780 Tonnen auf RC-Betongranulat, 75.725 Tonnen auf Ziegel, 3.063 Tonnen auf Holz und 108.937 Tonnen auf sonstige mineralische Baustoffe.

Um die Mengenermittlung vom Bauschutt des Kellers anzunähern, wird angenommen, dass nur Wohn- und Bürogebäude (Verwaltung) einen unterirdischen Keller haben (insgesamt 27 Gebäude, die abgebrochen werden). Durch AutoCAD wird dafür ein Layer erstellt mit einer Kellerhöhe von 3 Metern und Wände aus Beton werden hinzugefügt. Auf diese Weise ergibt sich ein Bruttorauminhalt von 40.977 m<sup>3</sup> Kellervolumen. Somit errechnet sich ein Gesamtbruttorauminhalt der Gebäude von 1.005.590 m<sup>3</sup>. Multipliziert mit dem Faktor 0,394 Tonnen pro m<sup>3</sup> BRI, ergibt das insgesamt 16.145 Tonnen Bauschutt, konkret Betonbruch. Dadurch wächst der vor Ort verwertbare Anteil an Betongranulat von 41.780 Tonnen auf 57.925 Tonnen.

#### 4.3.3. Asphalttschutt

##### Bestandsbau

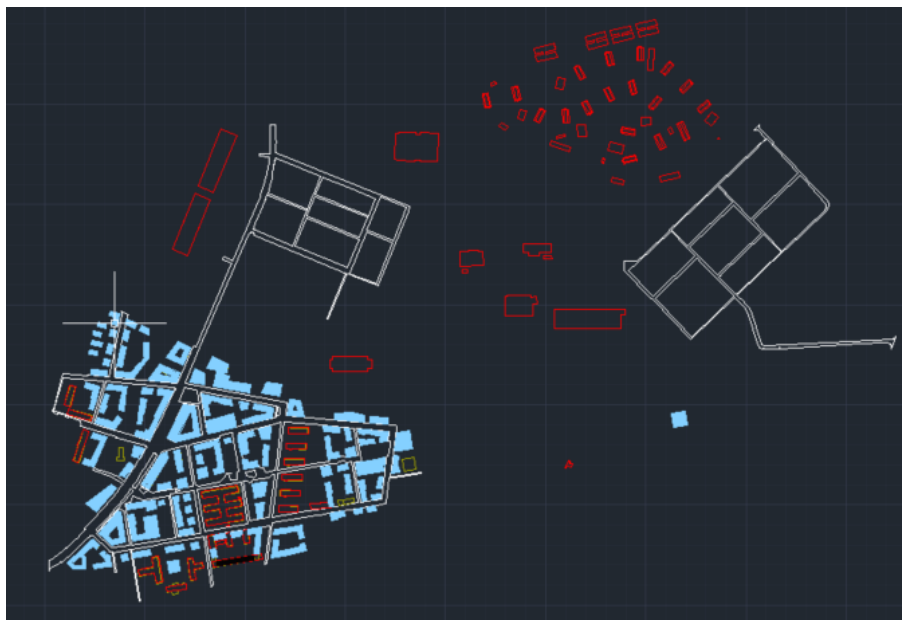
Zur Berechnung der Asphaltmenge werden alle bestehende Verkehrsflächen südlich der Landebahn im FHE (Vertiefungsbereich) berücksichtigt. Da noch nicht bekannt ist, welche Straßen bestehen bleiben und welche abgerissen werden, wird eine Vorstudie erstellt, die das Volumen aller Straßen berücksichtigt. Mittels eines in AutoCAD erstellten Layers wird für die Fahrbahnen im Areal eine Fläche von 189.456 m<sup>2</sup> berechnet. Geht man von einer Asphalttschichtdicke von 22 cm aus, errechnet sich ein Volumen von 41.680 m<sup>3</sup> Fahrbahnmaterial. Ausgehend von einer Dichte von 2,2 t/m<sup>3</sup> errechnet sich eine Gesamtmenge von 91.696 t Asphalt. In diesem Fall wird davon ausgegangen, dass die Straßen aus einer bituminösen, möglicherweise teerhaltigen, Trag- und Deckschicht bestehen.



**Abbildung 37: Verkehrsflächen Bestandsbau Vertiefungsbereich des FHE (eigene Darstellung in AutoCAD)**

### Neubau

Für das neue Wohn- und Gewerbegebiet des Fliegerhorst Erding wird eine Gesamtfläche von 110.150 m<sup>2</sup> Verkehrsflächen errechnet. Bei einer 22 cm dicken Asphaltenschicht (RStO 12 - Bk 3.2 Hauptgeschäftsstraßen) errechnet sich ein Asphaltvolumen von 24.233 m<sup>3</sup>. Mit der Dichte von 2,2 t/m<sup>3</sup> errechnet sich eine Gesamtmenge von 53.313 t Asphalt für den Neubau der Straßen. Die Gesamtlänge der Strecken beträgt 10.850 m.



**Abbildung 38: Verkehrsflächen Neubau Vertiefungsbereich des FHE (eigene Darstellung in AutoCAD)**

### 4.3.4. Mengenmodell

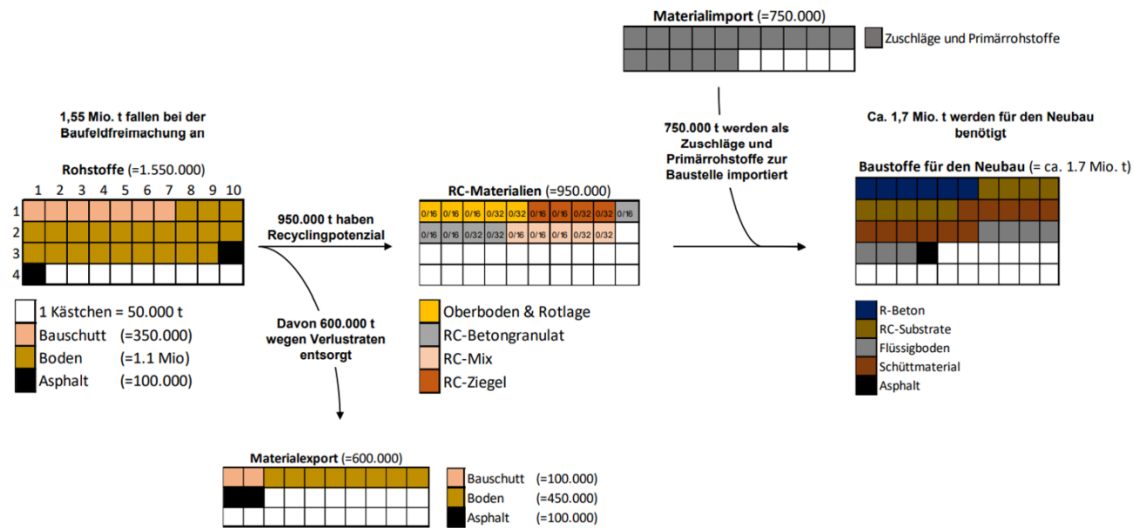


Abbildung 39: Mengenbilanz FHE

Das Mengenmodell zeigt die unterschiedlichen Quellen von Stoffströmen und den Prozess des Anfallens von Bauschutt und Boden, der Vorbereitung und Herstellung von RC-Materialien und den finalen Rezepturen zu Baustoffen. Wie zu sehen ist, fallen insgesamt 1,55 Mio. t Rohstoffe aus der Baufeldfreimachung an (350.000 t Bauschutt und 1,1 Mio. t Boden und 100.000 t Asphalt). Davon müssen 600.000 t wegen verschiedener Belastungsarten vor Ort entsorgt und 750.000 t Material als Zuschlagstoff für den Neubau importiert werden. So können die RC-Baustoffe für den Neubau hergestellt werden.

## 4.4. Recyclingkonzeption Fliegerhorst Erding

### 4.4.1. Übersicht

Wie bereits im vorherigen Kapitel erwähnt, ist es zur Schließung des Materialkreislaufs und zur Förderung der nachhaltigen und zirkulären Entwicklung des Projekts Fliegerhorst Erding unerlässlich, vor Ort ein Recyclingzentrum zu bauen. So werden die Materialien aus der Baufeldfreimachung vorbereitet, recycelt und für den Neubau als RC-Baustoffe eingesetzt. Die für das Recyclingzentrum erforderlichen Dimensionen hängen von der benötigten Materialmenge des Neubaus ab. Daher muss untersucht werden, wie viele Tonnen Baustoff zu einem bestimmten Zeitpunkt benötigt werden. Auf diese Weise kann ein Recyclingzentrum mit den richtigen Abmessungen für die exakte Produktion des für den Neubau benötigten Materials gebaut werden.

#### 4.4.2. Überlagerung Baufeldfreimachung und Neubau



Abbildung 40: Neubau Vertiefungsgebiet (Stadt Erding)

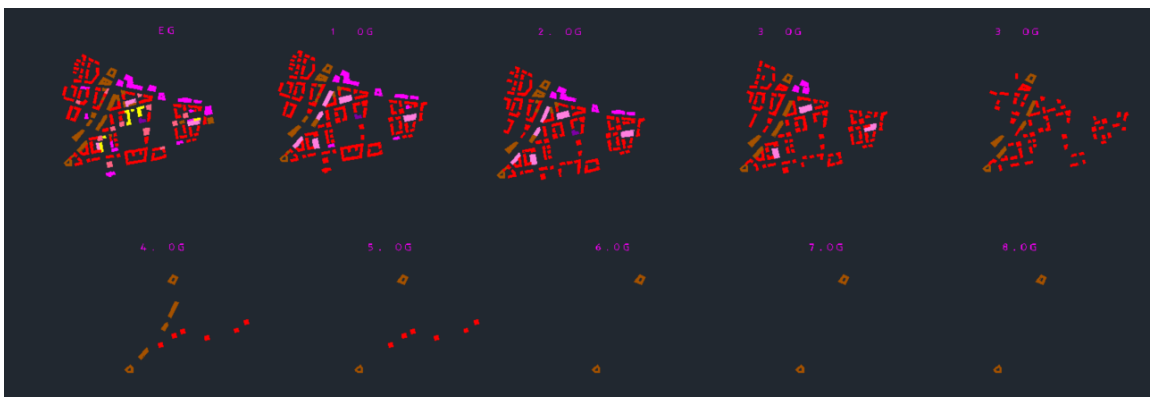


Abbildung 41: Geschossanzahl und Gebäude für den Neubau (Eigene Darstellung nach Stadt Erding)

Der Entwurf des Neubaus besteht aus mehreren Gebäuden mit bis zu 9 Stockwerken. Als Annahme ist jedes Stockwerk 3 Meter hoch sein. Das EG hat eine bebaute Gesamtgeschossfläche von 96.000 m<sup>2</sup>, der 1. Stock 90.900 m<sup>2</sup>, der 2. Stock 87.300 m<sup>2</sup>, der 3. Stock 71.600 m<sup>2</sup>, 4. Stock 40.100 m<sup>2</sup>, der 5. Stock 11.000 m<sup>2</sup>, der 6. Stock 6.300 m<sup>2</sup>, der 7. Stock 2.700 m<sup>2</sup>, die 8. Etage 2.700 m<sup>2</sup> und letzte Etage, die 9. Etage, hat eine bebaute Gesamtfläche von 2.700 m<sup>2</sup>. Die Gesamtnutzfläche aller Gebäude und Etagen zusammen beträgt daher 411.410 m<sup>2</sup>. Geht man von einer Geschosshöhe von 3 Metern aus, errechnet sich damit ein Gesamtbruttorauminhalt (BRI) von 1.234.230 m<sup>3</sup>. Zur Annäherung der für diesen Neubau benötigten Mengen an Material werden die IÖR-Tabellen verwendet, im Detail die Mehrfamilienhäuser (MFH)-Kategorie mit den aktuellsten Daten, die die zwischen 1991-2010 gebauten MFH sind.

Der Umrechnungsfaktor von Bruttorauminhalt zu Gesamttonnen an Material für das Gebäude beträgt hier  $1195,1\text{t}/2349\text{m}^3=0,5088\text{ t/m}^3$ .

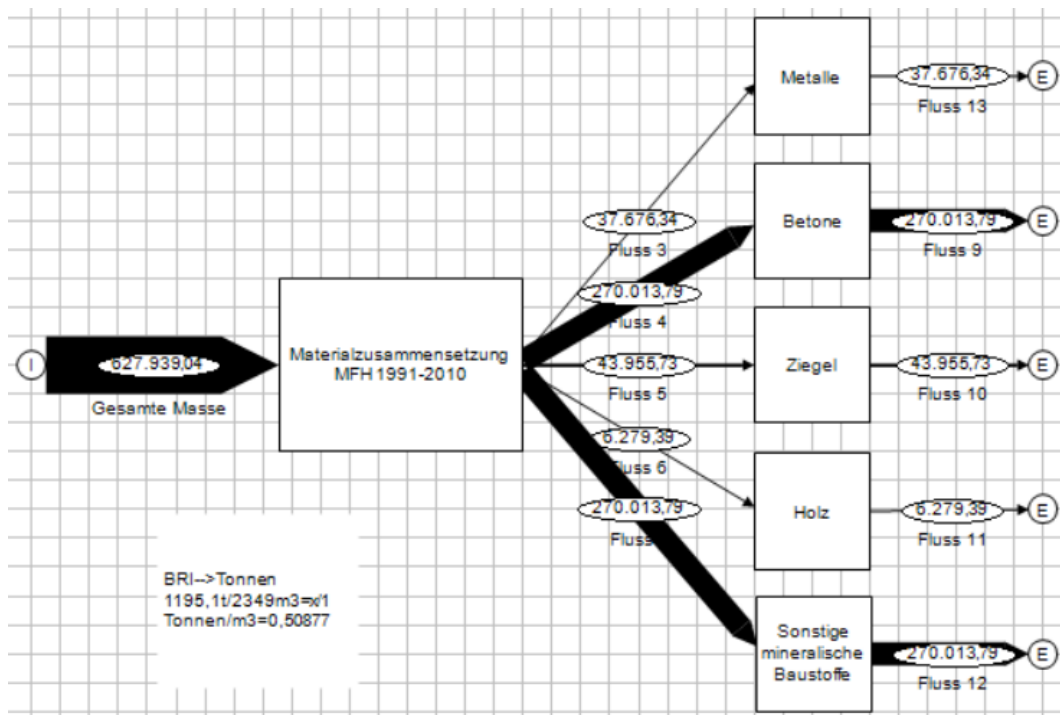


Abbildung 42: Stoffliche Zusammensetzung MFH 1991-2010

Wie sich aus den Tabellen errechnen lässt, werden für den Neubau rund 627.939 Tonnen Material benötigt. Davon entfallen rund 270.000 Tonnen auf Beton, 270.000 Tonnen auf sonstige mineralische Baustoffe wie Putz, 43.956 Tonnen auf Ziegel, 38.000 Tonnen auf Metalle und 6.279 Tonnen auf Holz (Holzbau-Anteil nimmt im Laufe der Jahre stark zu).

#### 4.5. Recycling-Zentrum Erding

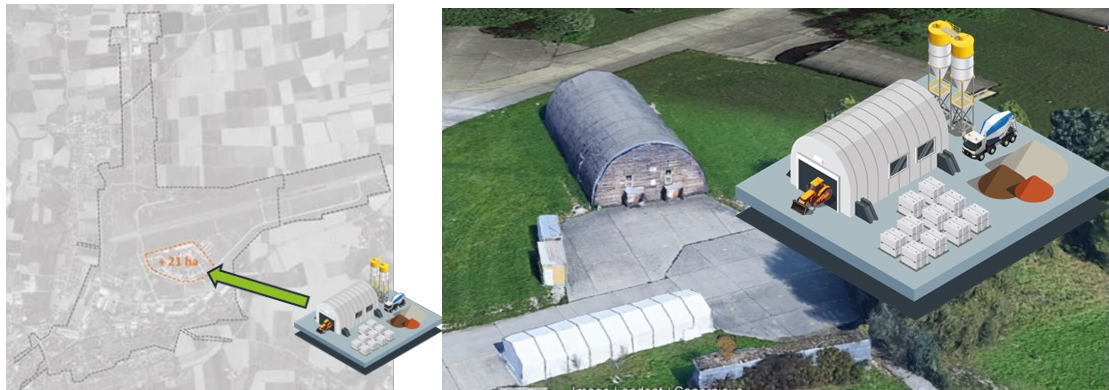
Das Thema Kreislaufmanagement spielt eine wesentliche Rolle beim Recycling vor Ort, insbesondere bei den geplanten frühzeitig verfügbaren Flächen und dem Stoffverkehr.

Aufgrund seiner zentralen Lage und seiner guten Anbindung an den gesamten Fliegerhorst Erding ist das Schelter Areal (ca. 21 ha) ein geeigneter Standort für den Bau eines Recyclingzentrums (Kiesaufbereitungs-, Brecher- und Siebanlage, Lagerflächen, Mischanlage und Recyclinghalle). Darüber hinaus könnten die Schelter auch als überdachte Lagerflächen für Sekundärrohstoffe genutzt werden, wodurch witterungsbedingte Gefährdungen des Materials vermieden werden (Siehe Abbildung 43). Die Schelter haben einen Radius von 7 m und eine Länge von 30 m. Aus diesen Werten errechnet sich für jeden Schelter ein Volumen von rund 2300 m<sup>3</sup> ( $=\frac{\pi \cdot 7^2 \cdot 30}{2}$ ), das für die Lagerung von aufbereiteten Sekundärrohstoffen genutzt werden kann. Auf dem Gelände gibt es insgesamt 18 Schelter, in denen folglich bis zu 41.300 m<sup>3</sup> Material gleichzeitig gelagert werden können. Wichtig zu wissen ist natürlich, dass sie aufgrund des Reibungswinkels



und konstruktionsbedingt nicht vollständig gefüllt werden können, das Speichervolumen also geringer ist. Außerdem ist es wichtig, das Material und die Recyclinganlagen möglichst kompakt zusammenzustellen, um lange Transportwege zu vermeiden und den Logistikaufwand zu reduzieren.

Da das Genehmigungsverfahren für dieses Recyclingzentrum, wie bereits beschrieben, nach dem Bundes-Immissionsschutzgesetz durchgeführt wird, müssen entsprechende Unterlagen für den zu stellenden Antrag nach BImSchG erarbeitet werden.

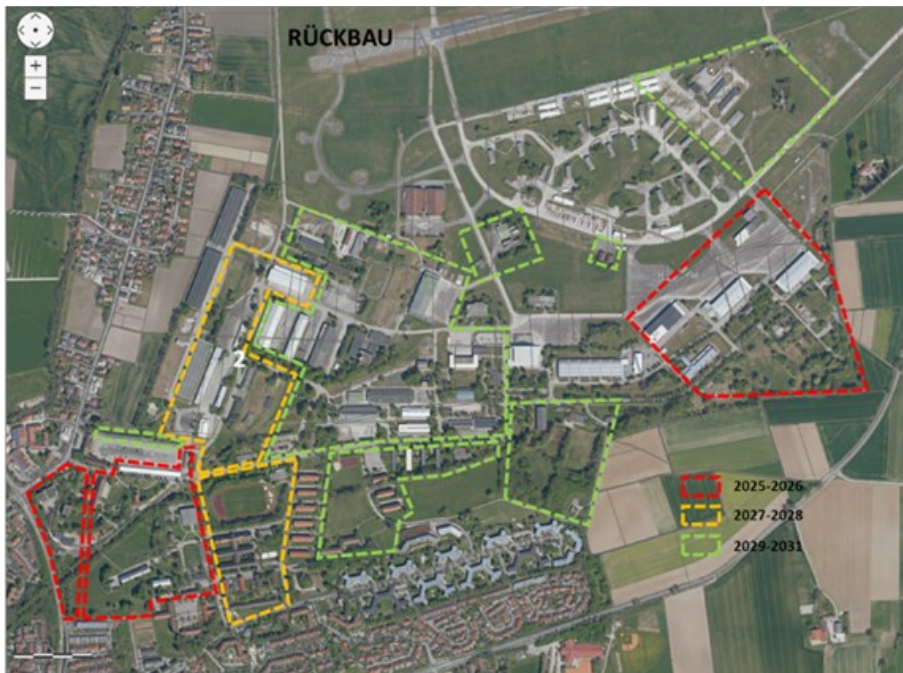


**Abbildung 43: Recyclingzentrum FHE im Schelter-Bereich (Eigene Darstellung nach Stadt Erding und Google Earth Pro)**

#### 4.6. Stoffbilanz im zeitlichen Verlauf des Fliegerhorsts Erding

Die Abrissphasen sind in drei Abschnitte unterteilt. Die erste (rote Phase) beginnt 2025 und endet 2026, die zweite (gelbe Phase) beginnt 2027 und endet 2028 und die letzte (grüne Phase) beginnt 2029 und endet 2031 (Siehe Abbildung 44). Wichtig ist vor allem, dass die rote Phase termingerecht fertig gestellt wird, da dies das Projektgebiet ist, auf dem der neue Erdinger Hauptbahnhof entstehen wird. Also gibt es einen zeitlichen Druck, diese Baufeldfreimachungsarbeiten planmäßig durchzuführen.

	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031
<b>Rückbauphase 1</b>							
<b>Rückbauphase 2</b>							
<b>Rückbauphase 3</b>							



**Abbildung 44: Rückbauphasen FHE (Stadt Erding)**

Die folgenden Berechnungen wurden aus verschiedenen Layern in AutoCAD erstellt, wobei die Gebäude, die unterirdischen Bauten und die Abrissphasen überlagert wurden, um auszurechnen, wie viel Volumen die Gebäude in jedem der Rückbaugebiete einnehmen.

Die Gebäude zusammen mit den unterirdischen Bauten in der roten Abbruchphase (2025-2026) haben einen BRI von insgesamt 316.595 m<sup>3</sup>. Die gelbe Abbruchphase (2027-2028) hat einen BRI von insgesamt 171.466 m<sup>3</sup>. Schließlich weist die grüne Abbruchphase (2029-2031) mit insgesamt 516.516 m<sup>3</sup> den größten BRI auf.

Insgesamt errechnet sich ein Gesamt-BRI von 1.004.577 m<sup>3</sup>, also hat die rote Rückbauphase 31,5 % des BRI, die gelbe Rückbauphase 17,1 % und die grüne Rückbauphase 51,4 %. Auf diese Weise ergibt sich bei der geschätzten Gesamtmaterialmenge von 331.322 t (siehe Tabelle 5) eine Gesamtmenge von 104.366 t für die erste Rückbauphase (rot), 56.656 t für die zweite Rückbauphase (gelb) und 170.300 t für die letzte Rückbauphase (grün).



## 4.7. Gesamtstoffstrommodell

Zur Berechnung des gesamten Stofftransports, der in diesem Projekt eingespart werden kann, wenn Baustoffe vor Ort recycelt werden, werden die Ergebnisse des Mengenmodells verwendet. Insgesamt 950.000 t Material haben ein Recyclingpotenzial, das vor Ort verwertet werden kann, anstatt auf Deponien oder zu eine weitere entfernte Recyclinganlage transportiert zu werden. Erfahrungsgemäß können pro LKW ca. 27 t Material transportiert werden. Das ergibt insgesamt 35.000 LKW-Fahrten. Dabei werden aber nur die Transportwege zur Deponie oder zum Recyclingzentrum betrachtet. Außerdem sind auch die Transportwege für die Primärrohstoffe für den Neubau zu betrachten. Das summiert sich auf ca. 70.000 LKW-Fahrten, die durch das Recycling von Materialien auf dem Fliegerhorst Erding eingespart werden könnten. In einer linearen Wirtschaft mit einer durchschnittlichen Gesamtentfernung des Materials vom Betonwerk, der Baustelle und dann zur Deponie/Recyclingzentrum von ca. 50 km müssten 1.750.000 km (35.000 Fahrten \* 50 km) zurückgelegt werden. In einer Kreislaufwirtschaft, in der das Material vor Ort recycelt und innerhalb der Baustelle durchschnittlich 2 km weit transportiert wird, beträgt die insgesamt zurückgelegte Strecke 70.000 km (35.000 Fahrten \* 2 km). Dadurch könnten bis zu 1,68 Millionen Kilometer an LKW-Fahrten eingespart werden. Zum Vergleich: Der Erdumfang am Äquator beträgt 40.000 km (Schüttler 2014). Durch die Einsparung von 1,68 Millionen Reisekilometern werden daher etwa 42 „Weltumrundungen“ eingespart. Durch das RC-Potential der 950.000 Tonnen Material können durch Aufbereitung „vor Ort“ bis zu 48 km pro LKW eingespart werden (50 km Transport in einer linearen Wirtschaft (bisherige Vorgehensweise) vs. nur 2 km in einer Kreislaufwirtschaft). So können bis zu 45.600.000 Tonnenkilometer (48 km\*950.000 t) eingespart werden. Laut Statista betrug die Höhe der Treibhausgas-Emissionen im deutschen Güterverkehr im Jahr 2019 für LKW 113 g/tkm (0,000113 t/tkm) (Statista 2019). Multipliziert man diesen Wert mit den insgesamt eingesparten Tonnenkilometern von 45.600.000 tkm, errechnet sich eine Gesamteinsparung an Treibhausgasemissionen (CO<sub>2</sub>-Äquivalent) von 5.152,8 Tonnen durch die stoffliche Verwertung vor Ort. Der deutsche Durchschnitt von 2021 zeigt, dass eine Person 11,17 t Treibhausgase in CO<sub>2</sub>-Äquivalenten pro Jahr erzeugt (Statista 2022). Somit kompensiert das Recycling vor Ort im FHE-Projekt den Jahres-CO<sub>2</sub>-Ausstoß von 462 Personen allein durch den reduzierten Materialtransport.



## 5. Wirtschaftlicher Vergleich von Primär- und Sekundärbaustoffen

Das folgende Kapitel enthält eine vereinfachte Kostenschätzung, um den Preis eines Kubikmeters traditionellen Betons mit einem Kubikmeter Recyclingbeton zu vergleichen. Diese Daten sind nicht genau, da mit der sich ändernden Wirtschaft Preise und Ausgaben von der Saison und der Region abhängen. Ebenso helfen die folgenden Daten, sich ein Bild davon zu machen, wie sich die Preise von Recyclingbeton und Primärbeton zusammensetzen. Für dieses Kapitel wurden Ausschreibungspreise verschiedener Bauleistungen unterschiedlicher Unternehmen im Jahr 2020 für das Projekt Bayernkaserne (BYK) in der Landeshauptstadt München herangezogen und zur Anonymisierung der Daten Durchschnittspreise gesucht. Es ist wichtig zu betonen, dass dieser Vergleich auf Preisen von 2020 mit einem Aufschlagfaktor basiert, es handelt sich also nicht um die neuesten Preise, sondern nur um eine Annäherung.

### **RC-Beton:**

**Abriss:** Der Preis für einen Recycling-Ingenieur beträgt laut HOAI etwa 100 € pro Stunde (Byak 2013). Dieser wird mit 40 Stunden pro Woche und 52 Wochen pro Jahr berechnet. Das FHE-Projekt benötigt ca. 8 Jahre Ingenieurleistungen für das Recycling von Baumaterialien. Dies ergibt eine Gesamtsumme von 1.664.000 €. Insgesamt werden 950.000 t Material recycelt. Für jede Tonne RC-Baumaterial werden daher ca. 1,75 € für die Planung des Bauwerks ausgegeben. Mit 2,4 t Beton pro m<sup>3</sup>, rechnet sich insgesamt 4,2 € pro m<sup>3</sup> Beton. Die Zerkleinerung von Betonschutt liegt nach den Angeboten bei ca. 10,86 €/m<sup>3</sup>. Dazu kommen noch ca. 5 €/m<sup>3</sup> für die sortenreine Vorbereitung des Bauschutts.

**Materialverarbeitung:** Das Angebot für die Herstellung von RC-GK 0/16 Beton liegt bei 9,63 Euro/Tonne. Die Dichte des Betons beträgt 2,4 t/m<sup>3</sup>. Daraus ergeben sich Kosten von 23,1 € pro m<sup>3</sup> Beton. Die Gesamttransportkosten für das BYK-Projekt mit RC-Beton belaufen sich auf 164.970 €. Insgesamt werden 47.000 Tonnen RC-Material transportiert. Die Gesamttransportkosten betragen daher 3,51 €/Tonne. Daraus errechnet sich ein Betrag von 8,424 €/m<sup>3</sup>. Basierend auf Angebotspreisen kostet die Entsorgung von belastetem Material ungefähr 25 €/Tonne. Hier wird ein empirischer Faktor von 0,2 multipliziert, da nur 20 % des Materials hochbelastet sind. Daher berechnet sich für die Entsorgung von kontaminiertem Material ein Preis von ca. 12 €/m<sup>3</sup>.

**Betonmischung:** Die Preise für den Zement liegen bei ca. 120 €/t (Detlef-Bar 2022). Es werden ca. 300 kg pro 1 m<sup>3</sup> Beton benötigt. Daher werden 37,50 € pro 300 kg Zement

benötigt, um 1 m<sup>3</sup> Beton zu mischen. In diesem hypothetischen Beispiel werden keine Zuschläge verwendet (RC-Beton 100%). Außerdem sind 2 kg Zusatzmittel für 1 m<sup>3</sup> Beton zugemischt, d. h. etwa 4 €. Das Mischen von 1m<sup>3</sup> Beton kostet etwa 15 €, einschließlich Strom, Wasser, Personal, unter anderem. Zudem kommen noch 10 €/ m<sup>3</sup> für die Belieferung der Zusatzmittel und Zement.

Pro Kubikmeter Recyclingbeton errechnet sich so ein ungefährender Gesamtpreis von rund 130,10 €. Allerdings wurden diese Preise anhand der Angebotspreise von 2020 kalkuliert, die bereits durch die rasanten Preissteigerungen der letzten 2 Jahre bei Energie, Treibstoff, Personal, Betriebsmitteln u.a. übertroffen wurden. Aus diesem Grund wird nach mehreren Interviews vor Ort auf diesen Preis ein empirischer Durchschnittsfaktor von 10 % addiert, um die Preise annäherungsweise an 2022 anzupassen. Daraus ergibt sich ein geschätzter Gesamtpreis von 143,10 € pro Kubikmeter Recyclingbeton.

### **Normalbeton:**

**Abbruch:** Dabei gilt die Faustregel, dass der traditionelle Abbruch 75 % der Kosten des selektiven Rückbaus erfordert. Daraus ergeben sich Abbruchkosten von 8,15 €/m<sup>3</sup>.

**Entsorgung:** In dem Fall wird Material nicht vor Ort recycelt. Daher muss das gesamte Material von der Baustelle angeliefert werden, was logistische Kosten verursacht und zu denen noch die Deponiegebühren hinzukommen. Für diese Berechnung wird wieder ein Preis von 12 €/m<sup>3</sup> für die Entsorgung des belasteten Material verwendet. Für die Entsorgung von nicht kontaminiertem Material werden die Angebotspreise der Entsorgung Mineralischer Mischbauschutt RW2 verwendet, die 0,95 €/t kosten. Auch hier wird ein empirischer Faktor von 0,8 verwendet, da davon ausgegangen wird, dass 80 % des Materials unbelastet ist. So errechnet sich für die Entsorgung des mineralischen Mischbauschutts ein Preis von 1,83 €/m<sup>3</sup>.

Abbruch und Entsorgung sind in der Preisbilanz von Normalbeton auch enthalten, da auch die Gebäude abgebrochen und der Bauschutt entsorgt werden muss, wo auch die Kosten pro m<sup>3</sup> ins Gewicht fallen.

**Einkauf Frischbeton:** Laut Preisliste 2022 der Heidelberger Beton GmbH liegt der Preis für einen Kubikmeter Frischbeton C30/37 bei 152,8 €/m<sup>3</sup>. Auf diesen Preis wird bei Großbestellungen ein Rabatt von ca. 15 % angenommen, was zu einem Preis von 129,98 €/m<sup>3</sup> führt.

Pro Kubikmeter Normalbeton errechnet sich somit ein Gesamtpreis von ca. 151,85 € unter Berücksichtigung des Abbruchs und der Entsorgung des Bestandsmaterials.

**Tabelle 8: Kostenvergleich RC-Beton vs. Normalbeton**

Gesamtkosten m <sup>3</sup> RC-Beton					
Abbruch	€ Einheit	Materialaufbereitung	€ Einheit	Mischen	€ Einheit
Planungsaufwand	4,2 m3	Herstellung RC-GK	23,11 m3	Herstellung RC Beton	15 m3
Abbruch	10,9 m3	Transportkosten	8,424 m3	Belieferung Zuschlagstoffe	0 m3
Bauschutt sortenrein	5 m3	Entsorgung belastetes Material	12 m3	Einkauf Bindemittel (Zement)	38 m3
				Zusatzmittel	4 m3
				Belieferung Zusatzmittel und Zement	10 m3
20,06 €		43,54 €		66,50 €	
130,10 €					
Gesamtkosten pro m <sup>3</sup> Normalbeton					
Abbruch	€ Einheit	Entsorgung	€ Einheit	Einkauf	€ Einheit
Abbruch	8,15 m3	Entsorgung belastetes Material	12 m3	Einkauf Frischbeton mit Belieferung	130 m3
		Entsorgung nicht-belastetes Material	1,824 m3		
8,15 €		13,82 €		129,88 €	
151,85 €					

Mit der richtigen Planung in den frühen Phasen des Projekts können die Umweltauswirkungen durch das Recycling von Materialien vor Ort verringert und gleichzeitig die Baukosten gesenkt werden. Es ist wichtig zu betonen, dass dieser Fall, in dem RC-Beton günstiger ist als herkömmlicher Beton, nur möglich ist, wenn vor der Bauausführung eine umfassende Studie für den Materialkreislauf durchgeführt wird die den Materialfluss in der Kalkulation einbezieht und Strategien entwickelt werden, um diesen besonders nachhaltig und effektiv im Neubauprojekt zu verwerten. Nichtsdestotrotz ist dieser Preis für RC-Beton nur ein hypothetischer optimaler Preis, der nur angestrebt werden könnte, wenn in den frühen Phasen des Projekts Maßnahmen bezüglich Materialbewirtschaftung und Stoffstrommanagement ordnungsgemäß durchgeführt werden.

Wird Material mit Recyclingpotenzial einfach entsorgt, ohne seinem Sekundärrohstoffpotenzial gerecht zu werden, entstehen hohe Kosten durch stetig steigende Deponiegebühren. Laut AHO (Ausschuss der Verbände und Kammern der Ingenieure und Architekten für die Honorarordnung), können „die Deponiegebühren für den entstehenden Bauschutt die Kalkulation des Bauvorhabens wesentlich beeinflussen“ (AHO 2014). Hinzu kommt, dass der logistische Aufwand der Transportplanung sowie der ebenfalls stetig steigende Benzinpreis erhebliche Kosten verursachen, die durch Recycling vor Ort vermieden werden könnten. Schließlich steigen auch die Preise für Primärrohstoffe stetig, so dass die Wiederverwertung von Materialien vor Ort nicht nur ökologisch, sondern auch wirtschaftlich sinnvoll ist.



## 6. Zusammenfassung der Ergebnisse

Mit dieser Arbeit soll gezeigt werden, warum es wichtig ist, bereits in der Frühphase eines Projekts ein Stoffstrommodell zu entwickeln, um den Anteil an hochwertigen Recyclingmaterialien zu erhöhen und so den ökologischen Fußabdruck des Projekts zu verringern. Auf diese Weise wird versucht, die Bedeutung der Gebäude und Baustellen als Rohstofflager aufzuzeigen, da sie wertvolle Ressourcen enthalten. Bei der stofflichen Verwertung werden diese Sekundärrohstoffe zerkleinert, aufbereitet, sortiert und dem Kreislauf der Baustoffe wie RC-Beton, RC-Substrate oder auch Flüssigboden wieder zugeführt. Wie hier gezeigt wird, führen Projekte, bei denen das Material vor Ort recycelt wird, zu einer erheblichen Verringerung der Umweltbelastung, indem sie die Ausbeutung von Primärressourcen erheblich reduzieren, die Kreislaufwirtschaft durch die Schließung des Materialkreislaufs fördern, den Flächenverbrauch durch die Reduktion von Materialabbauarbeiten verringern und die CO<sub>2</sub>-Emissionen durch die Verringerung der LKW-Fahrten zur Anlieferung von Primärmaterial und zur Entsorgung von Bauabfällen reduzieren, was indirekt auch den Verkehr, die Luftverschmutzung und die Lärmemissionen verringert. Darüber hinaus steht die Durchführung des stofflichen Recyclings auch im Blickpunkt der Öffentlichkeit, was die gesellschaftliche Beteiligung an solchen Projekten fördert. Außerdem wird gezeigt, dass diese Projekte wirtschaftlich und ökologisch sinnvoll sind.

Diese Arbeit zeigt Schritte zur Entwicklung eines Stoffstrommodells, das als Leitfaden für die Entwicklung von Strategien für Materialrecyclingprojekte dient. Zunächst muss ein Flächenmodell erstellt werden, das alle physischen Faktoren der Baustelle analysiert, um eine räumliche Auswertung vorzunehmen und mögliche Synergien und physische sowie logistische Hindernisse für das Recycling von Materialien zu identifizieren. Dann wird ein Mengenmodell entwickelt, in dem die Materialquellen analysiert und die Ströme des Materials während des Projekts berechnet werden. Dazu werden Tabellen des Leibniz-Instituts für Raumentwicklung über die stoffliche Zusammensetzung von Gebäuden nach Baujahr und Nutzung verwendet, um die Materialströme der Gebäude aus ihrem Bruttorauminhalt zu berechnen. Diese Informationen werden mit Hilfe von Sankey-Diagrammen dargestellt. Der Materialstrom des Geländes wird aus der Zusammensetzung der Böden, der Belastung in den Böden und der Tiefe der Ausgrabungen im Projekt berechnet. Schließlich wird das Modell zeitlich ergänzt, um das anfallende Material und das für den Neubau eingesetzte RC-Material in Abhängigkeit von der Zeitphase des Projekts analysieren zu können. So kann festgestellt werden, ob genügend Lager- und Logistikflächen für das Recycling zur Verfügung stehen, um die Machbarkeit der Materialverwertung vor Ort im spezifischen Projekt bewerten zu können. Ergänzt

wird dieses Modell durch die Schaffung eines Recyclingzentrums, das für die Schließung des Materialkreislaufs entscheidend ist und nach BImSchG geregelt wird.

Dieses Modell wird durch das Projekt Fliegerhorst Erding validiert, das den Umbau des derzeitigen Militärstützpunktes in ein Wohn-, Misch- und Gewerbegebiet sowie Freiflächen ab 2025 vorsieht. Das Projekt soll ein Pilotprojekt für nachhaltige Stadtentwicklung durch die geeignete Verwendung von recycelten Baumaterialien sein. Das **Flächenmodell** im FHE zeigt die Verarbeitung der verfügbaren Flächeninformationen, offenbart aber die fehlenden spezifischen Informationen zur Bodenzusammensetzung und den vorhandenen Gebäudequerschnitten. Der Baustellenleitplan zeigt einige mögliche Konfliktpunkte im Projekt auf, wie z.B. Baumbestand vs. Kampfmittelbeseitigung, Leitungssituation vs. Baufeldfreimachung und Schadstoffbelastung vs. Materialrecycling. Das **Mengenmodell** zeigt eine grobe Schätzung des bei der Baufeldfreimachung anfallenden Materials: ca. 330.000 t Bauschutt (davon ca. 230.000 t mit RC-Potenzial), ca. 75.000 t Asphalt (recyclbar) und ca. 1,1 Mio. t Bodenaushub (davon ca. 650.000 t mit RC-Potential). Außerdem erfolgt eine Schätzung des Materialbedarfs für den Neubau, bei dem mit 330.000 Tonnen Baumaterial und rund 55.000 Tonnen Asphalt gerechnet wird. Darüber hinaus werden ca. 400.000 t für RC-Substrate, 350.000 t für Flüssigboden und 550.000 t für Schüttung veranschlagt. Die **zeitliche Stoffbilanz** zeigt, dass in der ersten Rückbauphase ca. 104.000 t, in der zweiten Rückbauphase ca. 57.000 t und in der dritten und letzten Phase des Rückbaus ca. 170.000 t Bauschutt anfallen. Anhand einer Materialtransportbilanz für das Projekt Fliegerhorst Erding wird davon ausgegangen, dass durch das Recycling und die Wiederverwendung von insgesamt 950.000 t Material vor Ort 1.680.000 km an LKW-Fahrten eingespart werden können, was 42 Fahrten um die Welt entspricht. So werden dank Recycling vor Ort 5.152,8 Tonnen Treibhausgasemissionen (CO<sub>2</sub>-Äquivalente) eingespart. Auf diese Weise zeigt das Recycling von Materialien in diesem Projekt ein großes Potenzial für die Anwendung von Nachhaltigkeitsmaßnahmen zur Umsetzung eines grünen Stadtentwicklungsprojekts. Daher wird deutlich, dass die Entwicklung eines Stoffstrommodells in der Frühphase eines Projekts von entscheidender Bedeutung ist, um Strategien zu entwickeln, die das Recycling hochwertiger Baumaterialien ermöglichen und voranbringen.



## 7. Fazit und Ausblick

Wie in dieser Arbeit gezeigt wird, ist die Verwendung eines Stoffstrommodells in den frühen Phasen des Projekts ein effektives und relevantes Instrument, um nachhaltige Strategien für seine Entwicklung zu entwerfen. Diese Arbeit entwickelt aus einem Flächen-, Mengen- und einem zeitlichen Modell ein Stoffstrommodell, um Synergien und mögliche Schwierigkeiten, die im Projekt auftreten können, bereits in der Planungsphase zu finden. So können frühzeitig Lösungen gesucht und Korrekturen in Planung und Betrieb des Recyclings vor Ort vorgenommen werden.

Es sollte beachtet werden, dass das Bauschuttrecycling sich noch in frühen Entwicklungsphasen befindet, sodass Änderungen in der Art und Weise wie Projekte geplant und verwaltet werden vorgenommen werden müssen. Das Recycling vor Ort muss von Anfang an betrachtet werden, und es ist wichtig, dass beim Projektmanagement ab der Planungsphase ein Recyclingteam gebildet wird, das die Materialströme steuert. Auf diese Weise bietet diese Arbeit eine mögliche Lösung, um Recycling vor Ort durchzusetzen. Dieses Stoffstrommodell ist jedoch nur eine erste Empfehlung, die bei weiter steigender Recyclingquote vor Ort durch weitere Informationen und Ideen ergänzt werden sollte. Vor allem soll die Genauigkeit des Modells iterativ gesteigert werden, indem genauere Informationen zur Materialzusammensetzung der Gebäude hinzugefügt werden. In dieser Arbeit gibt es immer noch Lücken zwischen dem theoretischen Teil, wie das Stoffstrommodell in ein Projekt integriert werden kann, um große Mengen an Recyclingmaterial vor Ort zu gewinnen, und der Realisierung des Projekts selbst, so dass dies nur eine Empfehlung ist, um eine Priorisierung von zirkulären Projekten zu erreichen. Die Modellvalidierung findet erst nach Abschluss des Bauvorhabens statt.

Bei der Anwendung des Modells am Fliegerhorst Erding sind aufgrund fehlender Daten noch Lücken zu vervollständigen. Je mehr Informationen über das Projekt gegeben sind, desto spezifischer kann das Stoffstrommodell sein, daher sollte dieses Modell erweitert werden, sobald spezifischere Informationen verfügbar sind.

Wie aus dem geologischen Profil des Deutsche-Bahn-Tunnels für das Projekt „Lückenschluss Erding – Flughafen München“ hervorgeht, besteht eine „gleichmäßige Horizontalität des Tertiärs“, wo Kies überwiegt. Dies eröffnet die Möglichkeit, das beim Vortrieb des Tunnelbaus anfallende Material im Recyclingzentrum des FHE aufzubereiten und recyceln zu können. Dazu ist es aber notwendig, die Materialqualität und die Korngrößenverteilung zu analysieren, damit das Aushubmaterial, falls es die nötigen Anforderungen erfüllt, als RC-Baustoffe sowohl im FHE-Konversionsprojekt als auch in angrenzenden Projekten verwendet werden kann.

Die Frage der Steuerung und Planung ist für die Umsetzung des stofflichen Recyclings von entscheidender Bedeutung. Wichtig ist, dass sich der Bauherr von Anfang an für die Umsetzung dieses Kreislaufgedankens einsetzt und dem Projektleiter klar ist, dass Stoffverwertung umgesetzt werden muss. Die projektspezifischen Rahmenbedingungen müssen in der Anfangsphase des Projektes definiert und geklärt werden. Auch Materialeigenschaften müssen zu Projektbeginn definiert werden, um die Projektplanung auf der richtigen Basis umzusetzen. Um ein optimales Endergebnis bei der Verwendung von RC-Baustoffen zu erzielen, sollten alle Baubeteiligten den Einsatz von Recycling unterstützen. Vor allem muss der Bauherr bereit sein, diese RC-Baustoffe in sein Grundstück einzubauen. Zudem müssen alle Planer bei ihren Arbeitsschritten die spezifischen Eigenschaften des Materials berücksichtigen. Schließlich braucht es einen Materiallieferanten, der die in den Normen geforderten Betoneigenschaften erfüllt, sowie einen Baumeister, der die Betonierarbeiten mit der nötigen Sorgfalt ausführt. Diese Anforderungen müssen jedoch für alle Betonbauten erfüllt werden (Kantonales Hochbauamt Thurgau 2021).

Auch im wirtschaftlichen Aspekt können RC-Baustoffe einen Vorteil gegenüber Primärrohstoffen haben. Allerdings müssen hier genauere Analysen durchgeführt werden, um den wirklichen prozentualen Vorteil aufzuzeigen. Es stellt sich jedoch heraus, dass die Deponiegebühren und die Preise für Benzin und Primärrohstoffe weiter steigen werden, wodurch RC-Baustoffe immer wettbewerbsfähiger werden.

Schließlich muss das Wissen über die Eigenschaften und Einsatzmöglichkeiten von Recyclingbaustoffen weiterentwickelt werden. Projekte scheitern oft an mangelndem Wissen und Missverständnissen über RC-Materialien. Wie gezeigt, schränkt die Befürchtung, belastetes Material aus Projekten mit Sekundärrohstoffen zu beschaffen, die Umsetzung weiterhin ein. Nach dem Stand der Technik muss jedoch vor der Materialaufbereitung eine ordnungsgemäße Untersuchung durchgeführt werden und anschließend müssen die kontaminierten Materialien getrennt und entsprechend den Richtlinien entsorgt werden, um sicherzustellen, dass nur nicht kontaminiertes Material in den Recyclingkreislauf eingeführt wird. Wichtig ist in Zukunft auch, zunächst zu prüfen, welche Baumaterialien vor Ort verfügbar sind, bevor der Neubau geplant wird. So kann die Gestaltung des Neubaus auf bestehenden Materialien aufbauen.

Eine wichtige Erkenntnis dieser Arbeit ist, dass es in Deutschland Handlungsbedarf in den Vorschriften und Normen zu Recyclingmaterialien gibt. In Deutschland gibt es gesetzliche Beschränkungen für Recyclingbeton. Aus diesem Grund ist es wichtig, die Vorschriften anderer Länder, wie z.B. der Schweiz, in denen die Umsetzung von Recyclingbeton priorisiert und erleichtert wird, zu berücksichtigen. So kann der Recyclingprozess

optimiert und vereinfacht werden. Auf der Weise können Regelungen an aktuelle Herausforderungen angepasst und Richtlinien angewendet werden, die nachhaltiges Bauen begünstigen und fördern.

Abschließend zeigt diese Arbeit, dass mit der richtigen Planung eines Stoffstrommodells in den frühen Phasen eines Projekts große Mengen hochwertiger RC-Baustoffe verarbeitet, verwertet und für den Neubau eingesetzt werden können. Auf diese Weise wird die Ausgangshypothese bestätigt. Es entsteht jedoch eine neue Forschungsfrage, die ausgehend vom Ausgangsmaterial des Bestandsgebäudes und den Anforderungen und Zielsetzungen des Neubaus die Herstellung eines hochwertigen Materials anstrebt. Um qualitativ hochwertiges Material zu verarbeiten, ist es notwendig zu wissen, welches Material aus dem Rückbau anfällt und welches Material für den Neubau benötigt wird. So kann von vornherein geplant werden, welche Kornfraktionen vor Ort verarbeitet werden können und welche importiert werden müssen. Diese Fragestellung ist für den Betrieb der stofflichen Verwertung vor Ort von entscheidender Bedeutung. Unter Berücksichtigung der Ausgangsstoffe sollen tiefere Untersuchungen durchgeführt werden, die ein Konzept entsprechend den zeitlichen und räumlichen Anforderungen erstellen, um die Recyclingquote zu erhöhen und optimieren.



## 8. Literaturverzeichnis

4. BImSchV (2013): Vierte Verordnung zur Durchführung des Bundes Immissionsschutzgesetz. Verordnung über genehmigungsbedürftige Anlagen - 4. BImSchV.

AHO (2014): Planungsbereich "Baufeldfreimachung/Rückbau". Heft Nr. 18. Leistungsbild und Honorierung. 2. vollständig überarbeitete Auflage: Bundesanzeiger Verlag.

Baustoff Recycling Bayern (2022): RC-Asphalt. In: Baustoff Recycling - Bayern.

Bayerischer Landtag (2017): Drucksache 17/15975. Beschluss des Bayerischen Landtags.

Bayerisches Landesamt für Umwelt (2005): Umweltpakt Bayern: Vereinbarung über die Verwertung von Bauschutt in technischen Bauwerken, 2.

Bayerisches Landesamt für Umwelt (2018): Recycling-Baustoffe. Bayern.

Bayerisches Landesamt für Umwelt (2021): Leitfaden für die Verfüllung von Gruben, Brüchen und Tagebauen.

Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz (2017): Einsatz von mineralischen Recycling-Baustoffen im Hoch- und Tiefbau. In: BTU Cottbus 2017, 2017.

Bayerisches Staatsministerium für Wohnen, Bau und Verkehr (2018): Zustimmungen im Einzelfall. Vorhabenbezogene Bauartgenehmigung.

Bergmeister, Konrad (2021): Nachhaltigkeit im Tiefbau. Kolloquium Forschung & Entwicklung für Zement und Beton 2021. Hg. v. BOKU Wien, Institut für konstruktiven Ingenieurbau. Forschung & Entwicklung für Zement und Beton.

BfGA (2022): CE-Kennzeichnung. Definition.

bmu (2012): Kreislaufwirtschaftsgesetz. Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen. Deutschland.

BRD (2015): Deutsches Ressourceneffizienzprogramm (ProgRess) II: Fortschrittsbericht 2012 – 2015 und Fortschreibung 2016 – 2019. Programm zur nachhaltigen Nutzung und zum Schutz der natürlichen Ressourcen.

BRD (2016): 87. Umweltministerkonferenz am 2. Dezember 2016. Unter Mitarbeit von Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit.

Brumme, Doreen (2016): Die Geschichte des Recyclings 1 - Die Antike. In: Der Wertstoff Blog.

btu (2020): Ehemalige Bayernkaserne: Baufeldfreimachung. Machbarkeitsstudie zur Herstellung von Recycling-Beton zum Einsatz im Hochbau.

Bundesministeriums der Justiz (2012): Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen.

Bundesministeriums der Justiz (2017): Verordnung über die Bewirtschaftung von gewerblichen Siedlungsabfällen und von bestimmten Bau- und Abbruchabfällen. Gewerbeabfallverordnung - GewAbfV. BGBl. I S. 896.

Byak (2013): Kalkulationshilfe Stundensätze Merkblatt 2 HOAI. Orientierungswerte der Obersten Baubehörde Bayerns sorgen für Schlagzeilen. HOAI 2013. München.

DAfStb (2010): rezyklierte Gesteinskörnung: 2010-09: DAfStb-Richtlinie Beton nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 mit rezyklierten Gesteinskörnungen nach DIN EN 12620.

dena (2021): Gebäude energieeffizient gestalten. Hg. v. Deutsche Energie-Agentur. Deutsche Energie-Agentur.

Detlef-Bar, Thomas (2022): Preis für Zement - so kalkulieren Sie die Kosten.

DIN 1045-2 (2008): Tragwerke aus Beton, Stahlbeton, Spannbeton -Teil 2. Beton - Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität - Anwendungsregeln zu DIN En 206-1.

DIN 1045-2 (2022): DIN 1045-2. Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton - Teil 2: Beton.

DIN 1054 (2021): Baugrund - Sicherheitsnachweise im Erd- und Grundbau. Ergänzende Regelungen zu DIN EN 1997-1.

DIN 1055-2 (2010): Bodenkenngößen. Kenngrößen für nichtbindige Böden. Gemischtkörnige Boden in erdfeuchtem Zustand und mitteldichter Lagerung.

DIN 4226-101 (2017): Rezyklierte Gesteinskörnungen für Beton nach DIN EN 12620- Teil 101: Typen und geregelte gefährliche Substanzen.

DIN EN 1991 (2010): DIN EN 1991-1-1: 2010-12. EN 1991-1-1: 2002 + AC: 2009 (D).

DIN EN 206 (2016): EN 206: 2013+A1: 2016. Beton - Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität. EN 206: 2013+A1: 2016.

DMU Consult (2020): Gesteinskörnungen DIN EN 12620/13043.

EAV (2016): Europäischen Abfallverzeichnis.

Eberhardt (2022): Technische Eigenschaften von Recyclingbeton. Schweiz.

Gruhler, Kari; Böhm, Ruth (Hg.) (2011): Ressourcenbezogene Kennwerte von Nichtwohngebäuden. Frauenhofer.

Günther, Thomas (2015): Baustellenmanagement im Anlagenbau. Von der Planung bis zur Fertigstellung.

Heidelberger Beton GmbH (2022): PREIS LISTE GÜLTIG AB 1. JANUAR 2022. HEIDELBERGER BETON GMBH REGION NORD WEST. In: Heidelberger Beton - HeidelbergCement Group.

Heinrich, Matthias Arnold (2018): Erfassung und Steuerung von Stoffströmen im urbanen Wohnungsbau – Am Beispiel der Wohnungswirtschaft in München-Freiham. Vollständiger Abdruck der von der Munich School of Engineering der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktor-Ingenieurs genehmigten Dissertation.

Hittmayr (2022): Betonmischanlagen. In: Hittmayr Baumaschinen.

Holcim (2018): Wir schliessen den Baustoffkreislauf. Wir schliessen den Baustoffkreislauf. In: Holcim (Schweiz) AG.

IÖR (2022): Informationssystem Gebaute Umwelt.

Kantonales Hochbauamt Thurgau (2021): Einsatz von Recyclingbeton im Hochbau. Frauenfeld, Schweiz.

König, Horst (2014): Maschinen im Baubetrieb. Grundlagen und Anwendung. Wiesbaden: 4. Auflage.

Krüger, W. (1984): Neue Recyclinganlage zur Herstellung von Baustoffen aus Bauschutt in Düsseldorf. In: Aufbereitungs-Technik (Nr. 10), S. 613-614.

KTH (2022): KTH presents its pilot building made of recycled concrete. Unter Mitarbeit von E. Stenberg, K. Gudmundson und T. Malmqvist. ReCreate Projects EU.

Landeshauptamt München (2017): Klimaneutralität 2050. München setzt sich neue Klimaschutzziele. München.

LfU Bayern (2017): Rohstoffsicherung. In: Bayerisches Landesamt für Umwelt.

Mettke, Angelika (2017): Einsatz von mineralischen Recycling-Baustoffen im Hoch- und Tiefbau. Unter Mitarbeit von Jacob Steffen und Michael Meetz.

Mettke, Angelika (2019): Leuchtturmprojekt aus Recyclingbeton. In: Recycling Magazin (Wissenschaft + Technik). Online verfügbar unter [http://www.rc-beton.de/vortraege\\_pdfs/RECYCLINGmagazin2010.pdf#:~:text=Die%20Qualit%C3%A4t%20der%20untersuchten%20RC-Betone%20ist%20mit%20Normalbetonen,28%20kg%20Fm3%20so-wie%20durch%20den%20w%20Fz-Wert%20%28%29%20C60%20erreicht.?msclid=7c6836c0d12311ec82d6a8b527979ea1](http://www.rc-beton.de/vortraege_pdfs/RECYCLINGmagazin2010.pdf#:~:text=Die%20Qualit%C3%A4t%20der%20untersuchten%20RC-Betone%20ist%20mit%20Normalbetonen,28%20kg%20Fm3%20so-wie%20durch%20den%20w%20Fz-Wert%20%28%29%20C60%20erreicht.?msclid=7c6836c0d12311ec82d6a8b527979ea1).

Möbius, Hans-Ulrich (2018): Recycling-Konzeption Baufeldfreimachung Bayernkaserne.

Moritz, Hans (2021): 6500 Wohnungen im Fliegerhorst. In: Merkur.de, 2021. Online verfügbar unter <https://www.merkur.de/lokales/erding/erding-ort28651/erding-6500-wohnungen-im-fliegerhorst-91001317.html>.

MPM AG & prpm Architekten: Neubau eines Wohngebäudes mit rezyklierten Gesteinskörnungen. Modellversuch. Unter Mitarbeit von MPM AG, Suess-Staller-Schmitt, prpm Architekten+Stadtplaner.

Müller, Anette (2018): Baustoffrecycling. Entstehung - Aufbereitung - Verwertung.

NABU (2019): Das Null-Hektar-Ziel: Es bleibt viel zu tun. Wie sieht nachhaltige Stadtentwicklung aus? Naturschutzband Deutschland.

Nisbau (2022): Mischanlagen.

RAL (2014): Definition des Begriffs Flüssigboden. In: RAL Gütegemeinschaft Flüssigboden e.V.

Rockster Austria International (2020): Steirischer Baustoff-Recycling setzt auf Rockster. In: Recycling Magazin.

Rohstofflager Stadt e.V. (2021): Urban Mining. München.

RStO-12 (2020): Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaus von Verkehrsflächen.

- Schach, Rainer; Otto, Jens: Baustelleeinrichtung. Grundlage-Planung-Praxishinweise-Vorschriften und Regeln. Wiesbaden: 4. Auflage.
- Schiller, G.; Deilmann, C. (2010): Ermittlung von Ressourcenschonungspotenzialen bei der Verwertung von Bauabfällen und Erarbeitung von Empfehlungen zu deren Nutzung. Dessau: Texte 56.
- Schlichenmayer, Arian (2021): Fliegerhorst Erding. Städtebaulicher Wettbewerb entschieden. Garten + Landschaft.
- Schmidt, Julian (Hg.) (2017): Recycling- und Verwertungskonzept für mineralische Restmassen auf dem Gelände der ehemaligen Bayernkaserne. Technische Universität München, Zentrum Geotechnik: München.
- Rojas Sonderegger, Thomas (2022): Kostenabschätzung Recyclingzentrum. Interview mit Reiner Schmidt. München.
- Schneider Bautabellen (2018): Bautabellen für Ingenieure. Mit Berechnungshinweise und Beispielen. 23. Auflage.
- Schüttler, Tobias (2014): Grundprinzipien der Satellitennavigation. In: Tobias Schüttler (Hg.): Satellitennavigation: Wie sie funktioniert und wie sie unseren Alltag beeinflusst. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 1–28.
- Schüttler, Tobias (Hg.) (2014): Satellitennavigation: Wie sie funktioniert und wie sie unseren Alltag beeinflusst. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- SIA (2021): Beton mit rezyklierten Gesteinskörnungen. SIA 2030:2021 Bauwesen. In: SIA - Schweizer Regel.
- Siemens AG (2011): German Green City Index – Analyse der Leistungen zwölf deutscher Großstädte im Bereich Umwelt- und Klimaschutz, S.57.
- Stadt Erding (2019): Fliegerhorst Erding. Online verfügbar unter <https://clmap.com/en/projects/7/fliegerhorst-erding/>.
- Stadt Erding (2020): Städtebaulicher Wettbewerb zur Entwicklung des Fliegerhorsts Erding. Stadt Erding. Famira-Parcsetich, Christian, 2020.
- Statista (2019): Höhe der Treibhausgas-Emissionen im deutschen Güterverkehr nach Verkehrsträgern im Jahr 2019. (in Gramm pro Tonnenkilometer). In: Statista.
- Statista (2022): Durchschnittliche jährliche Treibhausgasbilanz pro Person in Deutschland. (konsumbasiert; in Tonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalent; Stand: 2021).
- Technische Universität Wien (2022): STAN 2. Software for Substance Flow Analysis. STAN Version 2.7 (2022).
- The Noun Project: Icons and Photos For Everything. In: Noun Project Inc.
- TU Delft (2013): Concrete Recycling. Unter Mitarbeit von A. Gebremariam, A. Vahidi, F. Di Maio, M. Bakker, P. Berkhout und P. Rem.
- Umwelt Bundesamt (2012): EU-Bauproduktenverordnung. EU-BauPVO.
- Umwelt Bundesamt (2021): Abfallaufkommen.



Umwelt Bundesamt (2021): Treibhausgas-Emissionen in der Europäischen Union.

UN (2015): The Paris Agreement. Climate Action. In: United Nations.

UNEP (2018): Global Status Report. Towards a zero-emission, efficient and resilient buildings and construction sector.

UNEP (2020): Building sector emissions hit record high, but low-carbon pandemic recovery can help transform sector – UN report. Unter Mitarbeit von Keishamaza Rukikaire und Terry Collins. Hg. v. UNEP. United Nations Environmental Programme.

Verbraucher Zentrale (2022): Asbest: gefährlich und immer noch aktuell. In: Verbraucher Zentrale.

Völpel, Daniel (2020): Klimaneutraler Beton ist mittelfristig nicht in Sicht. Alternative Stoffe taugen bislang nur für Nischenanwendungen. In: EnBausa.

Wagner Healthcare (2022): Silikose: Ursachen, Symptome und Behandlung.



## 9. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Prozentuale Zusammensetzung der Bauabfälle in Bayern 2018 (links) und Prozentuale Verteilung über die verschiedenen Entsorgungswege für Bauabfälle in Bayern 2018 (rechts) (Bayerisches Landesamt für Umwelt 2018).....	2
Abbildung 2: Vereinfachte Verfahrensfließbilder einer mobilen Aufbereitungsanlage für mineralische Bauabfälle (links) und einer stationären Aufbereitungsanlage (rechts) (Müller 2018) .....	9
Abbildung 3: Gesteinskörnung DIN EN 12620/13043 - Siebung des Materials 0/16 (DMU Consult 2020).....	11
Abbildung 4: Brechanlage Rockster R1000S (Rockster Austria International 2020 (Rockster Austria International 2020).....	11
Abbildung 5:Prinzipskizzen von Windsichtern (links) und Prinzipskizzen von Leichtstoffabscheider mit Schwergutförderband (rechts) (Müller 2018).....	13
Abbildung 6: Einordnung der Sortierung in den Ablauf der Aufbereitung von Bauabfällen (Müller 2018).....	14
Abbildung 7: CIFAMOOVE 100- Semi-Mobile Betonmischanlage (Hittmayr 2022).....	20
Abbildung 8: Typ 1 Betonsplitt; Typ 2 Bauwerksplitt (Mettke 2017).....	23
Abbildung 9: Uneingeschränkter offener Einbau (links) und eingeschränkter offener Einbau (rechts) bei RW1-Material (Mettke 2017) .....	26
Abbildung 10: Einbau mit technischen Sicherungsmaßnahmen bei RW2-Material (Mettke 2017) .....	26
Abbildung 11: Ausschreibungsmuster für RC-Baustoffe im Hochbau (Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz 2017).....	27
Abbildung 12: Exemplarische Darstellung einer ZiE für RC-Beton für das Projekt Bayernkaserne, gütegesichert und zertifiziert durch Baustoff Recycling Bayern e.V. (Ettengruber 2019).....	29
Abbildung 13: Umweltstation Würzburg (Feess 2018) .....	30
Abbildung 14: Pädagogische Hochschule Thurgau (Kantonales Hochbauamt Thurgau 2021) .....	31
Abbildung 15: KTH-Recyclingbeton-Pilotgebäude (KTH 2022) .....	32
Abbildung 16: Stylisierte Darstellung des Baustellenleitplans in Kästen (Eigene Darstellung) .....	36
Abbildung 17: Verlustraten durch Sammlung und Aufbereitung (nach Baustoffgruppen) (Heinrich 2018).....	38
Abbildung 18: Verwendungszeiträume von ausgewählten Problemstoffen in Gebäuden (Heinrich 2018).....	39
Abbildung 19: Sankey Diagramm Materialzusammensetzung MFH 1919-1949 (Eigene Darstellung mit der STAN-Software).....	40
Abbildung 20: Fließbild RC-Materialien (eigene Darstellung nach DMU Consult GmbH 2022) .....	45
Abbildung 21: Mengenmodell Musterprojekt 1.500.000t aus Baufeldfreimachung und 1.600.000t für den Neubau .....	46
Abbildung 22: Terminplan Musterprojekt.....	47
Abbildung 23: Lagermaterial Musterprojekt mit dem Terminplan verknüpft .....	48
Abbildung 24: Recyclingzentrum Feeß (1 Hektar) und Recyclingzentrum Eberhardt (3 Hektar) (Google Maps) .....	49
Abbildung 25: Gesamtstoffstrommodell in 2D .....	51
Abbildung 26: Gesamtstoffstrommodell Säulendiagramm in 3D.....	52
Abbildung 27: Neubau eines Wohngebäudes mit rezyklierten Gesteinskörnungen (MPM AG & prpm Architekten).....	53
Abbildung 28: Entwicklungsstudie Fliegerhorst Erding (Stadt Erding 2020) .....	55
Abbildung 29: Überlagerung FHE und Bombentrichter (Eigene Darstellung nach Stadt Erding).....	57
Abbildung 30: Baustellenleitplan FHE (eigene Darstellung nach Stadt Erding) .....	59

Abbildung 31: Leitungssituation im FHE.....	60
Abbildung 32: Grünflächen und Baumbestand im FHE .....	61
Abbildung 33: Entfernungen des Materialtransports zum Fliegerhorst Erding .....	61
Abbildung 34: Überlagerung Kampfmittelsituation im FHE-Areal.....	63
Abbildung 35: Bodenaushubmenge Vertiefungsbereich (eigene Darstellung) .....	64
Abbildung 36: 3D-Modelle von Gebäuden nach Baujahr und Nutzung (eigene Darstellung) .....	65
Abbildung 37: Verkehrsflächen Bestandsbau Vertiefungsbereich des FHE (eigene Darstellung in AutoCAD).....	67
Abbildung 38: Verkehrsflächen Neubau Vertiefungsbereich des FHE (eigene Darstellung in AutoCAD).....	67
Abbildung 39: Mengenbilanz FHE.....	68
Abbildung 40: Neubau Vertiefungsgebiet (Stadt Erding) .....	69
Abbildung 41: Geschossanzahl und Gebäude für den Neubau (Eigene Darstellung nach Stadt Erding) .....	69
Abbildung 42: Stoffliche Zusammensetzung MFH 1991-2010.....	70
Abbildung 43: Recyclingzentrum FHE im Schelker-Bereich (Eigene Darstellung nach Stadt Erding und Google Earth Pro).....	71
Abbildung 44: Rückbauphasen FHE (Stadt Erding).....	72
Abbildung 45: Übersicht zu aktuell geltenden Regelwerken mit Zuordnung der Ebenen für RC-Baustoffe im Tief- und Erdbau (Mettke 2017) .....	XI
Abbildung 46: Stoffliche Zusammensetzung Mehrfamilienhaus (1949-1978) .....	XIII
Abbildung 47: Stoffliche Zusammensetzung Bürogebäude .....	XIII
Abbildung 48: Stoffliche Zusammensetzung Feuerwehrrhäuser und Rettungswache .....	XIV
Abbildung 49: Stoffliche Zusammensetzung Lagerhallen .....	XIV
Abbildung 50: Stoffliche Zusammensetzung Produktionshallen .....	XV
Abbildung 51: Geländemodellierung 3D FHE durch Blender Software .....	XV
Abbildung 52: AutoCAD Plan FHE .....	XVI
Abbildung 53: Baustellenleitplan FHE AutoCAD.....	XVII
Abbildung 54: Geländemodellierung FHE RIB iTWO Civil.....	XVII
Abbildung 55: Rückbauphasen im Projekt FHE (Eigene Darstellung nach Stadt Erding) .....	XVIII

## 10. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Betonrezept für 1 m <sup>3</sup> Normal-, RC- nach Norm, RC-Beton 100% (eigene Darstellung nach DMU Consult GmbH 2022).....	18
Tabelle 2: Klassierung von Bauabfällen (Eigene Darstellung nach EAV 2016) .....	22
Tabelle 3: Zulässige Anteile rezyklierte Gesteinskörnungen > 2 mm, bezogen auf die gesamte Gesteinskörnung (Vol.-%) (DIN 1045-2 2022) .....	24
Tabelle 4: Ermittlung der benötigten Lagerflächen in Abhängigkeit von Volumen und Reibungswinkel des Materials (eigene Darstellung).....	35
Tabelle 5: Überblick Umrechnungsfaktoren BRI-Gewicht für Gebäude je nach Baujahr und Nutzung .....	41
Tabelle 6: Flächennutzungsvergleich Bestandsbau und Entwicklungspläne im Vertiefungsbereich des FHE (eigene Darstellung) .....	62
Tabelle 7: Mengenermittlung Bauschutt aus dem Rückbau (eigene Darstellung).....	66
Tabelle 8: Kostenvergleich RC-Beton vs. Normalbeton.....	77
Tabelle 9: Überblick derzeit geltender Regelwerke für die Herstellung von Recycling-Beton (links) und Regelanforderungen an Recycling-Beton (rechts) (Mettke 2019) ....	XI
Tabelle 10: Innovation im Laufe der Großprojekte (Rohstofflager Stadt e.V. 2021)....	XII



# Anhang

## Kapitel 2.2. Rahmenbedingungen und Richtlinien für die Verwendung von RC-Baustoffen

### Regelwerken im Tiefbau und Hochbau

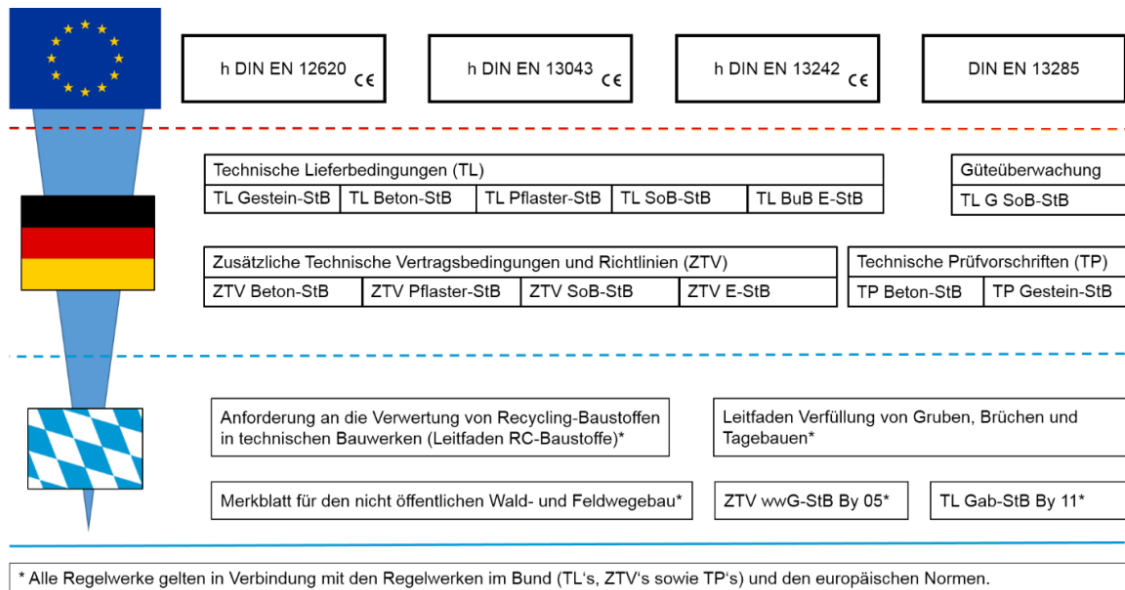


Abbildung 45: Übersicht zu aktuell geltenden Regelwerken mit Zuordnung der Ebenen für RC-Baustoffe im Tief- und Erdbau (Mettke 2017)

Tabelle 9: Überblick derzeit geltender Regelwerke für die Herstellung von Recycling-Beton (links) und Regelanforderungen an Recycling-Beton (rechts) (Mettke 2019)

Europäische Produktnorm / Deutsche Fassung	Mitteltende deutsche Normen und Regelwerke	Restriktionen	Feuchtigkeitsklassen DAfstb- Alkali- Richtlinie 2013-10	Expositionsklassen nach DIN EN 206-1:2001-07, Tabelle 1	DAfstb-Rili: Beton mit RC-GK 2010-09		
					Typ 1 Beton- splitt	Typ 2 Bau- werk- splitt	
<b>Gesteinskörnungen für Beton</b>							
DIN EN 12620:2008-07 Gesteinskörnungen für Beton; Deutsche Fassung EN 12620:2002+A1:2008	<b>Umweltverträglichkeit</b> DIN 4226-101:2017-08 Rezyklierte Gesteinskörnungen für Beton nach DIN EN 12620 - Teil 101: Typen und geregelte gefährliche Substanzen <b>Qualitätssicherung</b> DIN 4226-102:2017-08 Rezyklierte Gesteinskörnungen für Beton nach DIN EN 12620 - Teil 102: Typprüfung und Werks-eigene Produktionskontrolle <b>DAfstb-Richtlinie</b> „Vorbeugende Maßnahmen gegen schädigende Alkalireaktionen im Beton (Alkali-Reaktion)“, Ausgabe 2013-10	Zul. Anteile RC-GK > 2 mm bezogen auf gesamte Gesteinskörnung	WO (trocken)  WF (feucht)	Carbonatisierung <b>XC1</b>	≤ 45 Vol. %	≤ 35 Vol. %	
Beton	DIN EN 206:2017-01 Beton - Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität; Deutsche Fassung EN 206:2013+A1:2016			DIN 1045-2:2008-08 Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton - Teil 2: Beton - Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität – Anwendungsregeln zu DIN EN 206-1 <b>DAfstb-Richtlinie</b> „Beton nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 mit rezyklierten Gesteinskörnungen nach DIN EN 12620“, Teil 1, Ausgabe 2010-09	Kein Korrosionsrisiko <b>XC0</b> Carbonatisierung <b>XC1 – XC4</b>	≤ 35 Vol. %	≤ 25 Vol. %
					Frost ohne Taumittelnwirkung <b>XF1 + XF3</b> und im Beton mit hohem Wassereindringwiderstand  Schwacher chemischer Angriff <b>XA1</b>	≤ 25 Vol. %	
		Bau- technik	Korngröße der RC-GK		d ≥ 2 mm		
			Druckfestigkeit		≤ C 30/37		
		Regelanforderungen	Kornrohdichte		≥ 2.000 kg/m³ (± 150 kg/m³)		
			Wasseraufnahme nach 10 min		≤ 10 M.-%	≤ 15 M.-%	
			Säurelösliches Chlorid		≤ 0,04 M.-%		
			Säurelösliches Sulfat		≤ 0,8 M.-%		

## Kapitel 2.3. Case Studies zur hochwertigen RC-Betonbauweise

Tabelle 10: Innovation im Laufe der Großprojekte (Rohstofflager Stadt e.V. 2021)

Projekte Materialmenge	Import von Bauschutt	Selectiver Abbruch	Grobsortieren mit Bagger	Brechen Betruschutt	Brechen Mischbauschutt	Feinsortierung mit Robotik	Trockensieb- ung	Massieb- ung	Mischen von Substraten	Mischen von Beton	Export von Bauschutt
Flughafen Riem (1992-1996) 2.000.000 t	✓	✓	✓	✓							
Alte Messe München (1998-2007) 1.000.000 t		✓	✓	✓							
Anforderungen an die Verwertung von R-C- Bauschutt in technischem Bauwerken											
Allianz Arena (2002-2004) Forschungsberichte R-Beton und Gesteinskörnung Typ 1	✓			✓	✓	✓					✓
Kaserne Freising 500.000 t		✓	✓	✓	✓						
Bayerkaserne München (2014-2025) 2.000.000 t		✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓	
Einsatz von mineralischen RC-Baustoffen im Hoch- und Tiefbau StMUV											
Forschungsberichte R-Beton Gesteinskörnung Typ 2											
Schulzentrum München Riem (2017-2021) 200.000 t								✓		✓	
RC-Zentrum München	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
S-Bahn-Stammstrecke U5 (2017-2035) 10.000.000 t	(✓)	(✓)	(✓)	(✓)	(✓)	(✓)	(✓)	(✓)	(✓)	(✓)	(✓)

✓: erfüllt

(✓): in der Planung



## Kapitel 3.2. Stoffströme durch Gebäuderückbau

### Stoffliche Zusammensetzung Mehrfamilienhaus, die zwischen 1949 und 1978 in Westdeutschland gebaut wurden

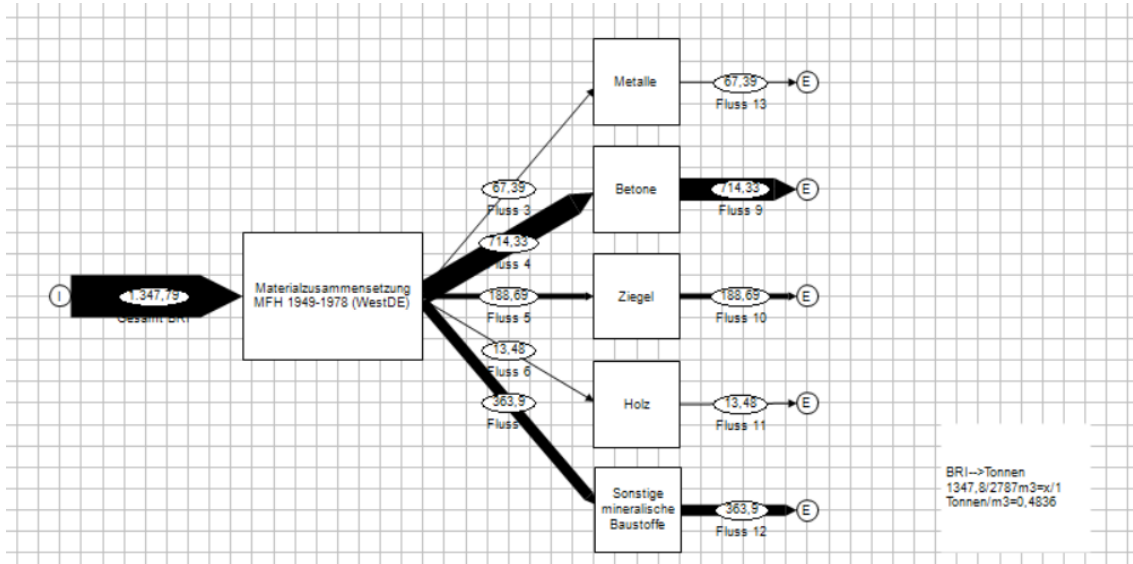


Abbildung 46: Stoffliche Zusammensetzung Mehrfamilienhaus (1949-1978)

### Stoffliche Zusammensetzung Bürogebäude

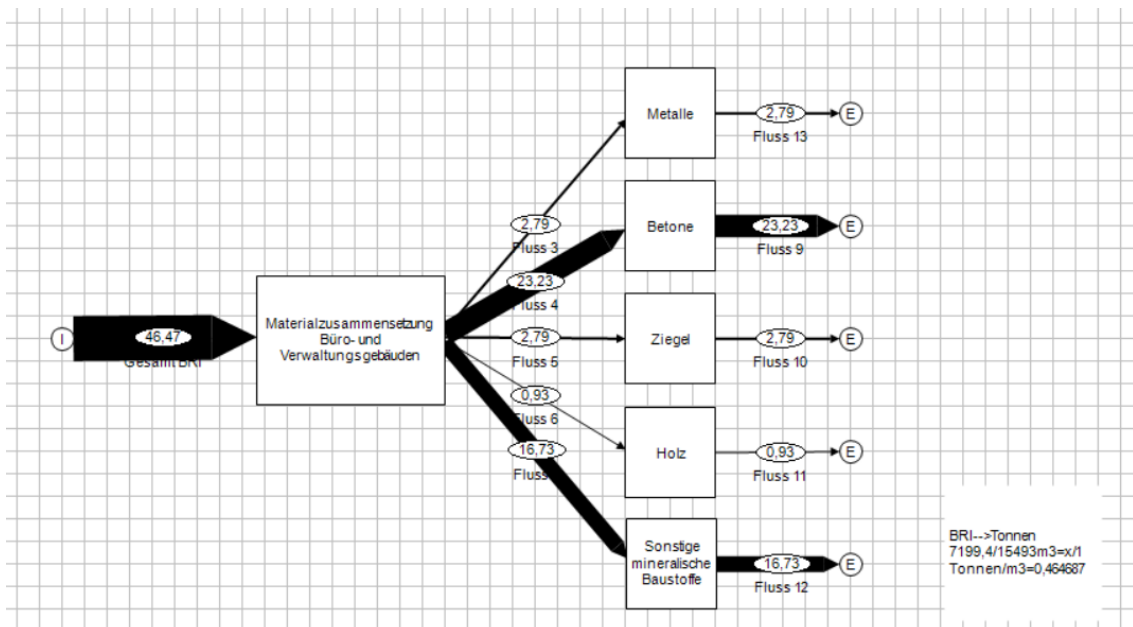


Abbildung 47: Stoffliche Zusammensetzung Bürogebäude

## Stoffliche Zusammensetzung Feuerwehnhäuser und Rettungswache

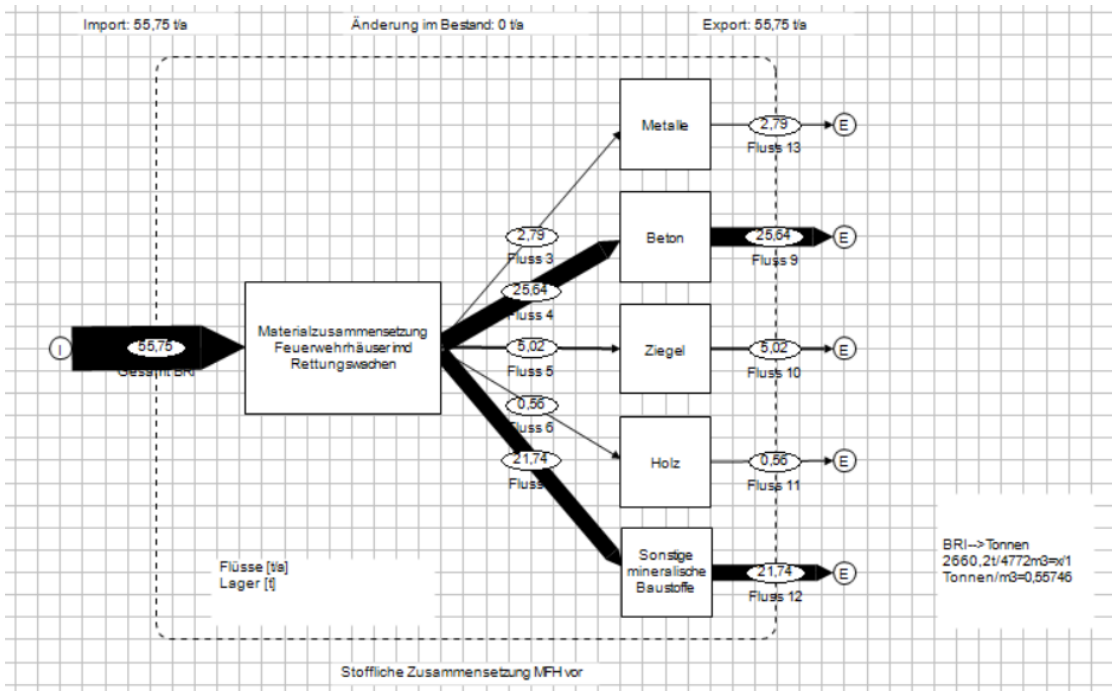


Abbildung 48: Stoffliche Zusammensetzung Feuerwehnhäuser und Rettungswache

## Stoffliche Zusammensetzung Lagerhallen

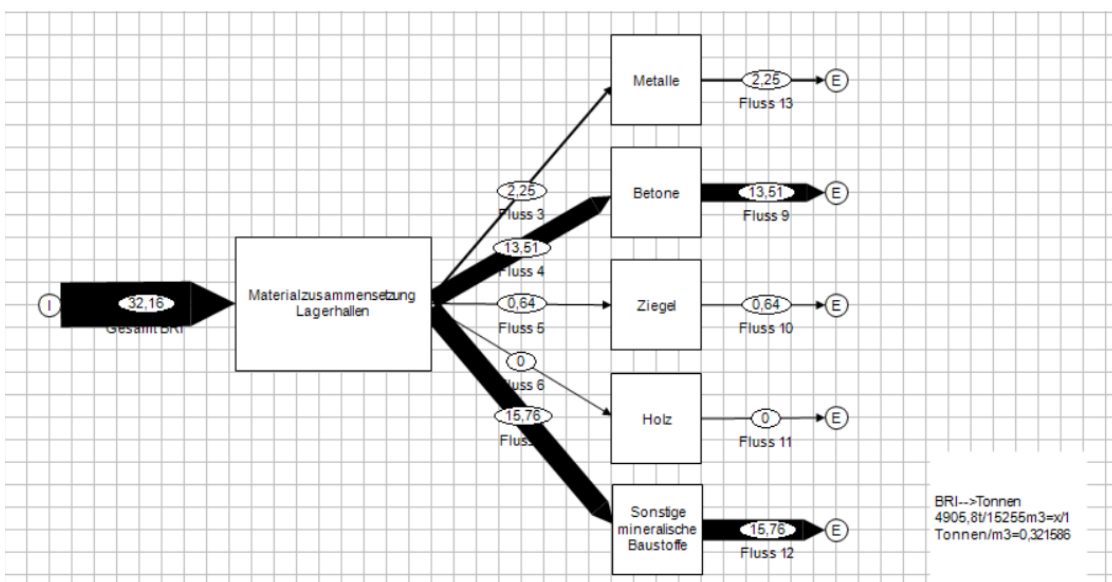


Abbildung 49: Stoffliche Zusammensetzung Lagerhallen

## Stoffliche Zusammensetzung Produktionshallen

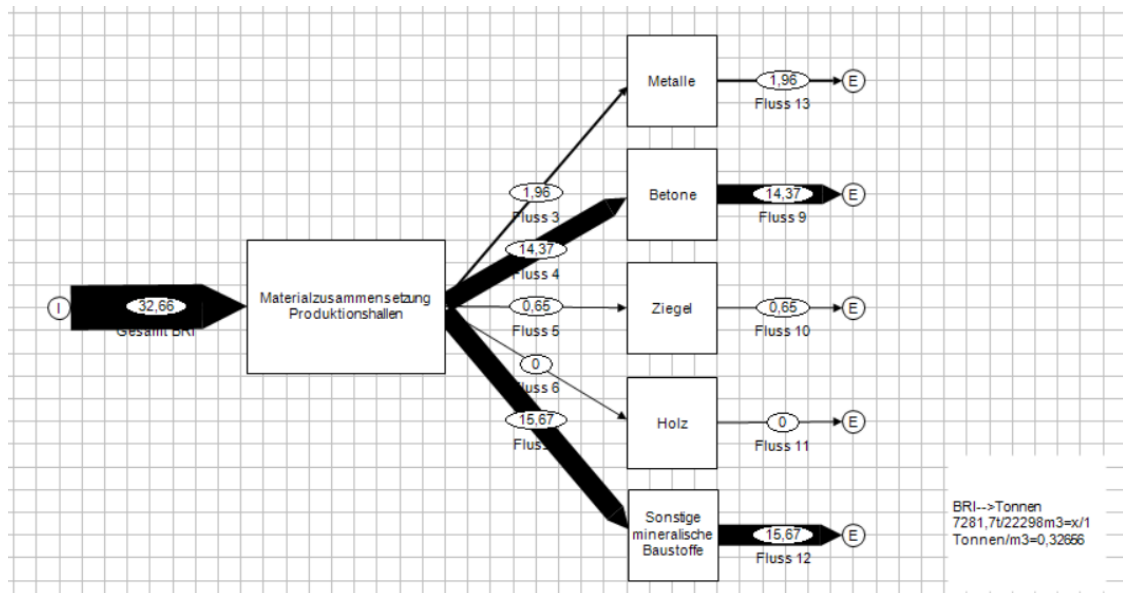


Abbildung 50: Stoffliche Zusammensetzung Produktionshallen

## Kapitel 4.

### Dokumentation CAD-Pläne

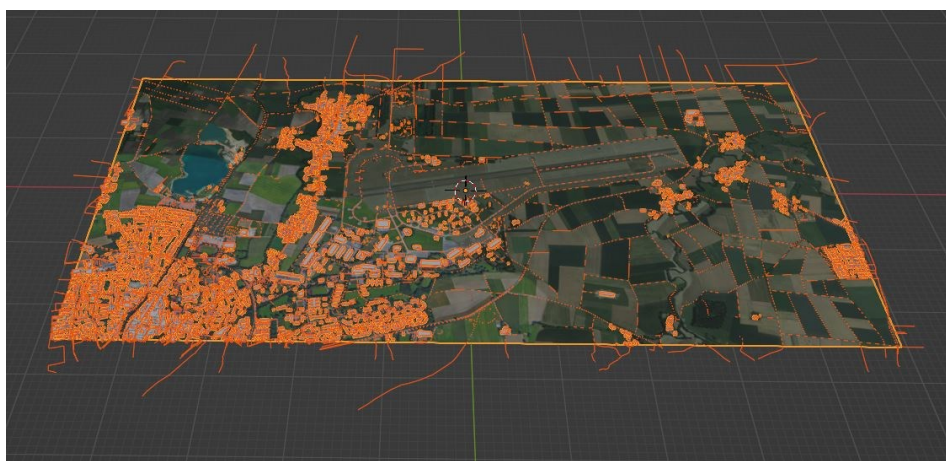
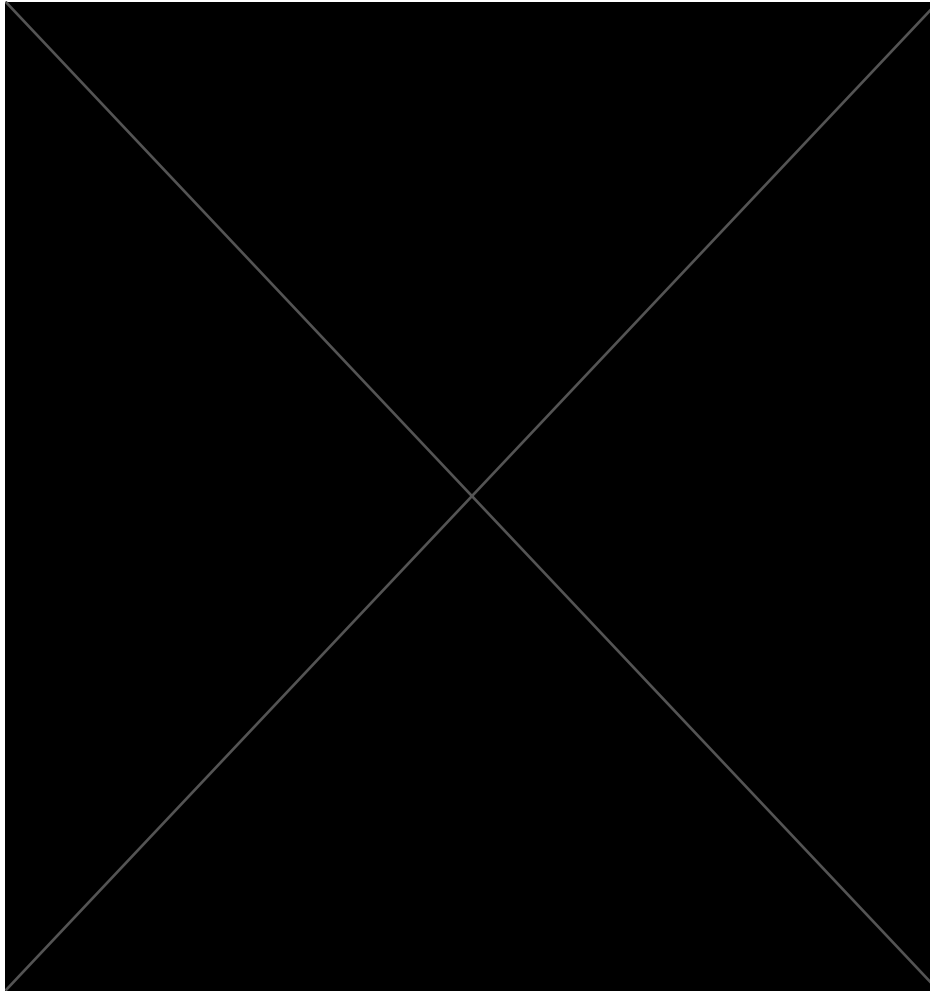


Abbildung 51: Geländemodellierung 3D FHE durch Blender Software

**AutoCAD Plan FHE**



**Abbildung 52: AutoCAD Plan FHE**

## Baustellenleitplan FHE AutoCAD



Abbildung 53: Baustellenleitplan FHE AutoCAD

## Geländemodellierung FHE RIB iTWO Civil

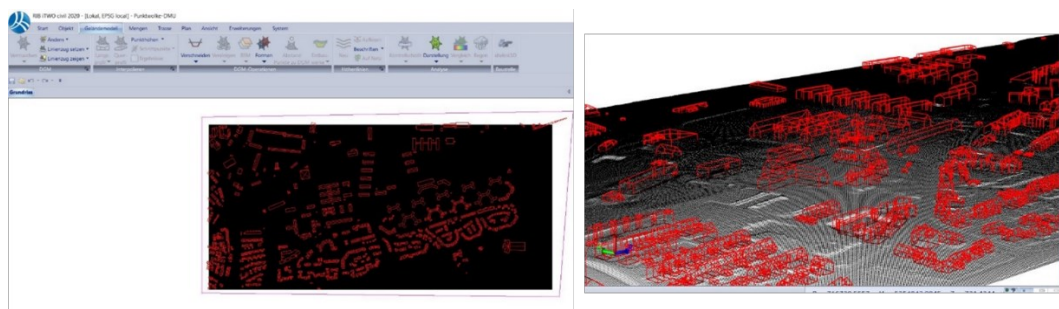


Abbildung 54: Geländemodellierung FHE RIB iTWO Civil

## Kapitel 4.6. Stoffbilanz im zeitlichen Verlauf des Fliegerhorsts Erding

### Rückbauphasen FHE (Stadt Erding)

	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031
Rückbauphase 1							
Rückbauphase 2							
Rückbauphase 3							

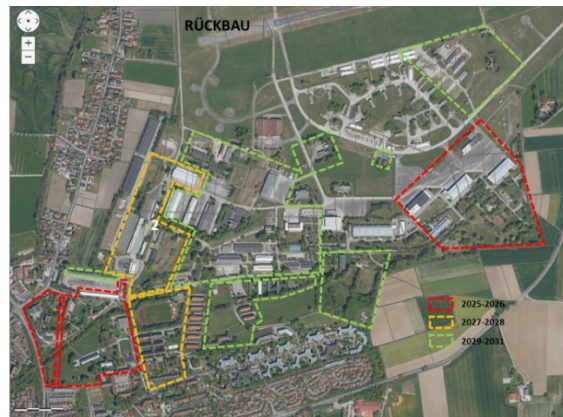


Abbildung 55: Rückbauphasen im Projekt FHE (Eigene Darstellung nach Stadt Erding)

Die folgenden Berechnungen wurden aus verschiedenen Layern in AutoCAD erstellt, wobei die Gebäude, die unterirdischen Bauten und die Abrissphasen überlagert wurden, um auszurechnen, wie viel Volumen die Gebäude in jedem der Rückbaubereiche einnehmen.

- Rückbauphase 1 Rot: BRI-Gebäude 304.310,8, BRI-Keller 12.284,1 --- (31,5%)
  - $331.322 \text{ t} \cdot 31,5\% = 104.366 \text{ t}$
- Rückbauphase 2 Gelb: BRI-Gebäude 165.083,1, BRI-Keller 6383,3 --- (17,1%)
  - $331.322 \text{ t} \cdot 17,1\% = 56.656 \text{ t}$
- Rückbauphase 3 Grün: BRI-Gebäude 495.799,1, BRI- Keller 20.716,8 --- (51,4%)
  - $331.322 \text{ t} \cdot 51,4\% = 170.300 \text{ t}$

Ausgerechnetes BRI Insgesamt:  $1.004.577 \text{ m}^3$ , Materialmengen insgesamt  $331.322 \text{ t}$ .

