

The renovation of the building stock in Europe: an essential opportunity to store carbon in buildings

Francesco Pittau*, Guillaume Habert,
Giuliana Iannaccone

Highlights

A large amount of insulation will be needed for building renovation in EU in the next years. CO₂ emission from material process can hinder the transition to low-carbon society. Storing carbon in building materials helps to delay the emissions over a very long time. Timber products are a good alternative to standard materials, but the forest regeneration is too long. A fast biomass regrowth is desirable to effectively remove the carbon from the atmosphere.

Abstract

In the next decades, a large share of residential buildings in EU-28 is expected to be renovated and a large amount of insulation materials will be produced. Bio-based materials are a valuable alternative to insulate the buildings and the biogenic carbon can be stored in the built environment for a relative long time. This article investigates the effect of massively storing carbon in construction when different bio-based materials are used. The results show that only bio-based material with a very fast regrowth, e.g. straw, have an effective potential in removing carbon from the air in a very short-time, and can contribute to achieve the Paris Agreement goals by 2050.

Keywords

Building renovation, Bio-based materials, Carbon Storage, Carbon removal technologies, Dynamic LCA

1. INTRODUCTION

It is a consolidated awareness that the construction sector and, more specifically, the building renovation sector plays a decisive role in achieving the European targets of reducing energy consumption and greenhouse gas (GHG) emissions. The main objective of the European Union is to decarbonise a large part of the building stock by 2050 [1]. A recent study confirmed that energy-efficient buildings after a deep renovation show multiple advantages at different scales: a significant reduction in overall energy demand and, as a result, a reduced operating costs of the system infrastructures [2]. More than 75% of the European building stock was built before 1980, i.e. before the introduction of the first energy regulation in most of the EU Countries. [3].

Francesco Pittau

ETH Zürich, Institut für Bau- und Infrastrukturmanagement, Chair of Sustainable Construction, Stefano-Francini-Platz 5, Zürich, 8093, Switzerland

Guillaume Habert

ETH Zürich, Institut für Bau- und Infrastrukturmanagement, Chair of Sustainable Construction, Stefano-Francini-Platz 5, Zürich, 8093, Switzerland

Giuliana Iannaccone

ABC - Dipartimento di Architettura, Ingegneria delle Costruzioni e Ambiente Costruito, Politecnico di Milano, via G. Ponzio 31, Milano, 20133, Italia

* Corresponding author
Tel.: +41-446330869;
fax: +41-446331088;
e-mail: pittau@ibi.baug.ethz.ch

Residential buildings represent the most important segment of this stock and are responsible for largest share of energy consumption in construction. A substantial share of the residential stock (more than 40%) - mainly concentrated in urban areas - dates back to before the 1960s and results in low levels of insulation and obsolete and inefficient heating systems. [4]. The strategies for the renovation of the exterior walls offer significant potential for energy savings by reducing heat losses on the largest surface area, both in the case of single-family houses and block apartments. However, when the primary energy requirements of the buildings are reduced due to retrofiting, the contribution to carbon emissions from the production of insulation materials increases [5]. At European level, an increasing materials flow is expected due to the need of renovation in the coming years. Thus, the carbon emissions for the production of building materials risks slowing down the transition to a low-carbon society and significantly reducing the carbon budget. [7], calculated for the transition period up to 2050 in order to meet the 2°C objective of the Paris Agreement [6].

2. STATE OF THE ART

Almost 80 million homes should be renovated in Europe by 2050 in the coming decades [8]. For this reason, it is possible to store a large quantity of carbon in the insulating materials that need to be installed on the facades to improve their thermal resistance [9]. The use of biogenic products can be a valid solution to improve the energy performance of the buildings, the aesthetics of the facades and, especially, to store carbon [10]. When wood is harvested from the forest and used as timber or insulating material, the biogenic carbon stored in the biomass is fixed in the product. If the wood comes from a sustainable forest, the same amount of carbon stored in the building is sequestered in the forest as a result of the tree regrowth. However, this process typically takes long cycles, between 45 and 180 years, depending on forest management and wood species [11,12]. On the contrary, agricultural crops require short periods to regrow, usually less than a year, and can be used as insulating material. During harvesting and production, a significant amount of biobased residues are produced and, therefore, are available as a bio-product, which can generate an additional value. In the EU-28, 116 million tonnes of straw are produced each year. [13]. Straw, if properly processed, is a valuable material for building insulation as it can meet both durability and thermal requirements [14]. Another multipurpose crop is the sativa cannabis, available mainly in Europe [15]. The shives, the woody inner core of the stem, can be

1. INTRODUZIONE

È una consapevolezza consolidata che il settore delle costruzioni e, più in particolare, quello delle ristrutturazioni edilizie svolge un ruolo decisivo per il raggiungimento degli obiettivi europei di riduzione dei consumi energetici e delle emissioni di gas serra (GHG). L'obiettivo principale dell'Unione Europea è quello di decarbonizzare gran parte del patrimonio edilizio entro il 2050 [1]. Uno studio recente ha confermato che gli edifici ad alta efficienza energetica dopo una profonda ristrutturazione presentano molteplici vantaggi a diverse scale: una notevole riduzione del fabbisogno energetico complessivo e, di conseguenza, una riduzione dei costi operativi delle infrastrutture di rete e del sistema elettrico [2]. Più del 75% del patrimonio edilizio europeo è stato costruito prima del 1980, vale a dire prima dell'introduzione dei primi regolamenti sul rendimento energetico in diversi paesi dell'UE [3]. Gli edifici residenziali rappresentano il segmento più importante di questo stock e sono responsabili della maggior parte dei consumi energetici del settore. Una quota consistente del patrimonio europeo, (oltre il 40%) – prevalentemente concentrata nelle aree urbane – risale a prima degli anni '60 e presenta bassi livelli di isolamento e sistemi impiantistici obsoleti e inefficienti [4]. Le strategie di riqualificazione dell'involucro edilizio verticale offrono un significativo potenziale di risparmio energetico grazie alla diminuzione delle dispersioni di calore su quella che è la superficie maggiore, sia nel caso di abitazioni monofamiliari che di condomini. Tuttavia, quando il fabbisogno di energia primaria di un edificio si riduce a causa di interventi di retrofiting, aumenta il contributo sulle emissioni di carbonio dovute alla produzione dei materiali isolanti [5]. A livello europeo è atteso un aumento del flusso di materiali in previsione degli scenari di ristrutturazione nei prossimi anni e, per questo motivo, l'emissione di carbonio per la produzione di materiali da costruzione rischia di rallentare la transizione verso una società a basse emissioni di carbonio e di ridurre significativamente il carbon budget [7], calcolato per il periodo di transizione fino al 2050 al fine di rispettare l'obiettivo 2°C dell'Accordo di Parigi [6].

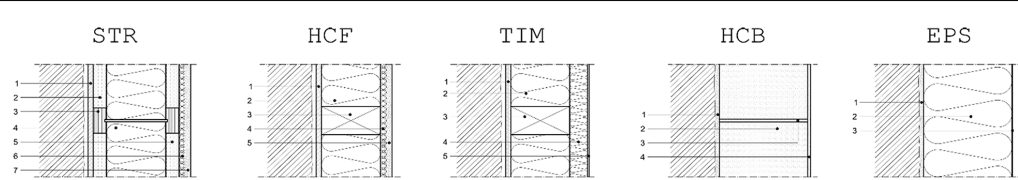
2. STATO DELL'ARTE

Nei prossimi decenni, quasi 80 milioni di abitazioni potrebbero essere oggetto di rinnovamento in Europa entro il 2050 [8]. Per questo motivo si apre la possibilità di immagazzinare una grande quantità di carbonio nei materiali isolanti che dovranno

used for the production of hempcrete blocks [16,17]. Some authors evaluated the consequences of using fast-growing biogenic materials, such as straw and hemp, for carbon storage in construction elements [18]. Differently to traditional construction solutions, walls insulated with fast-growing biogenic materials have shown a negative radiative forcer which contributes to restore the radiative balance of the Earth.

The objective of this work is to assess the contribution on climate change mitigation of carbon storage in different biogenic-based insulation alternatives when used for retrofitting existing facades. In particular, in order to properly consider the amount of carbon stored in products, a dynamic life cycle assessment (DLCA) was introduced to verify the contribution of different bio-based materials on the radiative forcing over time.

essere installati sulle facciate per migliorare la loro resistenza termica [9]. L'utilizzo di prodotti biogenici può essere una valida soluzione per migliorare le prestazioni energetiche degli edifici, l'estetica delle facciate e, soprattutto, per stoccare il carbonio [10]. Quando il legno viene prelevato dalla foresta e utilizzato come legno strutturale o materiale isolante, il carbonio biogenico incorporato nella biomassa viene fissato nel prodotto. Se il legno proviene da una foresta sostenibile, la stessa quantità di carbonio immagazzinata nell'edificio viene sequestrata nella foresta a seguito della ricrescita degli alberi. Tuttavia, questo processo richiede tipicamente lunghi cicli, tra 45 e 180 anni, a seconda della gestione forestale e delle specie legnose [11,12]. Al contrario, le



| Cod. | Material | Thickness mm | Density kg·m ⁻³ | Thermal conductivity (λ) W·m ⁻¹ ·K ⁻¹ | Mass kg·m ⁻² | Life span yr | Waste treatment category |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|-----------------|-------------------------------|----------------------------------------------------------------|----------------------------|-----------------|--------------------------|
| 01. STR - I-joist frame with pressed straw | | | | | | | |
| 1 | OSB | 18 | 650 | 0.13 | 12 | 60 | Wood |
| 2 | Light clay straw | 45 | 600 | 0.16 | 27 | 60 | Recycling potential |
| 3 | Timber I-joist | var* | 500 | 0.12 | var* | 60 | Wood |
| 4 | Straw chips | var* | 100 | 0.051 | var* | 60 | Fast decomposing |
| 5 | Light clay straw | 45 | 600 | 0.16 | 27 | 60 | Recycling potential |
| 6 | Reed mat | 20 | 145 | 0.06 | 3 | 30 | Fast decomposing |
| 7 | Lime plaster | 20 | 1800 | 0.67 | 36 | 30 | No potential |
| 02. HCF - Preassembled frame with injected hempcrete | | | | | | | |
| 1 | OSB | 18 | 650 | 0.13 | 12 | 60 | Wood |
| 2 | Injected hempcrete | var* | 200 | 0.054 | var* | 60 | Recycling potential |
| 3 | Timber frame | var* | 500 | 0.12 | var* | 60 | Wood |
| 4 | Reed mat | 20 | 145 | 0.06 | 3 | 30 | Fast decomposing |
| 5 | Lime plaster | 20 | 1800 | 0.67 | 36 | 30 | No potential |
| 03. TIM - Timber frame | | | | | | | |
| 1 | OSB | 18 | 650 | 0.13 | 12 | 60 | Wood |
| 2 | Glass wool | var* | 18 | 0.038 | var* | 40 | No potential |
| 3 | Timber frame | var* | 500 | 0.12 | var* | 60 | Wood |
| 4 | Wood fibreboard soft | 60 | 130 | 0.05 | 8 | 40 | Wood |
| 5 | Cover plaster | 6 | 1800 | 0.8 | 11 | 40 | No potential |
| 04. HCB - Hempcrete blocks | | | | | | | |
| 1 | Cement mortar | 10 | 1800 | 0.8 | 18 | 60 | No potential |
| 2 | Hempcrete blocks | var* | 330 | 0.07 | var* | 60 | Recycling potential |
| 3 | Light lime mortar | - | 500 | 0.1607143 | 6 | 60 | Recycling potential |
| 4 | Lime plaster | 20 | 1800 | 0.67 | 36 | 40 | No potential |
| 05. EPS - Expended polystyrene for external thermal insulation composite system (ETICS) | | | | | | | |
| 1 | Cement mortar | 1 | 1800 | 0.8 | 2 | 60 | No potential |
| 2 | EPS | var* | 16 | 0.04 | var* | 40 | Combustible |
| 3 | Base plaster | 2 | 1800 | 0.8 | 4 | 40 | No potential |

Figure 1. List of materials used in the five alternatives for the redevelopment of exterior walls.

3. METHODOLOGY

3.1. REFERENCE CONSTRUCTION ALTERNATIVES FOR THE ENERGY RENOVATION OF EXTERNAL WALLS

Five alternative construction solutions for the renovation of the exterior walls were taken as reference in this work and shown in Figure 1. The proposed strategy is a retrofit with additional insulation, which can be applied as external layer in order to improve the thermal resistance. The functional unit (FU) assumed for the life cycle impact assessment (LCIA) of the materials is identical for all considered alternatives and is defined as follows:

- 1 m² of exterior wall;
- identical thermal resistance (R_T);
- non-load bearing structure;
- identical fire safety level;
- building service life of 60 years, assumed as reference value for a standard residential building [19].

3.2. ANALYTIC MODEL FOR THE ANNUAL MATERIAL INTENSITY

The residential building stock in Europe is naturally mostly heterogeneous and, therefore, it was necessary to first adopt a thermal and geometric characterization method in order to simulate a large-scale renovation scenarios. Through the use of a simplified bottom-up approach, mainly supported by statistical data, the annual material intensity (input data) was estimated. Based on previous researches, a characterization based on homogeneous transnational areas (geoclusters) was introduced, which allowed to aggregate data and to fill the gaps in case of lack of information at the national level [20]. Specifically, the classification suggested by Birchall et al. was adopted [21]. This is based on aggregation by similar climatic conditions, which lead to identify seven macro-areas with homogeneous climatic conditions. For each Geocluster, the different construction typologies identified in TABULA [22] were aggregated and divided into two categories: a) single-family houses (SF) e b) multi-family houses (MF). For each building typology, a mean value of the ratio between the surface of the exterior walls (S_w) and the building floor area (S_p) was evaluated and the results were aggregated based on the two selected categories, as shown in Figure 2. In case of lack of explicit national data, data from other countries within the same Geocluster were considered as representative.

colture agricole richiedono brevi periodi di ricrescita, in genere meno di un anno, e possono essere utilizzate come materiale isolante per l'edilizia. Durante la raccolta e la produzione, una quantità significativa della biomassa delle piante viene scartata e, quindi, è disponibile come bioprodotto generando un valore aggiunto. Nell'UE-28, ogni anno si producono 116 milioni di tonnellate di paglia [13]. La paglia, se correttamente lavorata, è un materiale prezioso per l'isolamento edilizio poiché è in grado di soddisfare sia i requisiti di durabilità che termici [14]. Un'altra coltura multiuso è la cannabis sativa, disponibile soprattutto in Europa [15]. Il canapulo, il nucleo interno legnoso dello stelo, può essere utilizzato per la costruzione di blocchi legati con malte minerali [16,17]. Alcuni autori hanno valutato la possibilità di utilizzare materiali biogenici a crescita rapida, come paglia e canapa, per lo stoccaggio del carbonio nei nuovi elementi di costruzione [18]. A differenza dei sistemi costruttivi tradizionali, le pareti isolate con materiali biogenici a rapida crescita hanno mostrato un forzante radiativo negativo, contribuendo a ripristinare l'equilibrio radiativo della Terra.

L'obiettivo di questo lavoro è quello di valutare l'effetto sul cambiamento climatico dello stoccaggio del carbonio in diverse alternative di isolamento a base biogenica quando utilizzato per il retrofitting di facciate esistenti. In particolare, al fine di considerare correttamente la quantità di carbonio stoccata nei prodotti, è stata introdotta una valutazione dinamica del ciclo di vita per verificare il contributo dei diversi materiali biogenici nell'influenzare il forzante radiativo nel tempo.

3. METODOLOGIA

3.1. ALTERNATIVE COSTRUTTIVE DI RIFERIMENTO PER LA RIQUALIFICAZIONE ENERGETICA DELLE PARETI ESTERNE

Cinque soluzioni costruttive alternative per la riqualificazione energetica delle pareti esterne sono state assunte come riferimento in questo studio e mostrate in Figura 1.

La strategia proposta è quella di un recupero con isolamento aggiuntivo, che può essere applicato all'esterno delle pareti perimetrali al fine di migliorarne la resistenza termica. L'unità funzionale (UF) ipotizzata per la valutazione dell'impatto dei materiali e del ciclo di vita (LCIA) è identica per tutte le alternative esaminate ed è definita come segue:

- 1 m² di parete perimetrale;
- identica resistenza termica (R_T);

| | Geocluster | | | | | | | |
|-------------------------------|-------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | U.M. | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| Floor area | 10^6 m^2 | 2'406 | 3'203 | 3'059 | 2'979 | 5'398 | 1'775 | 781 |
| Multifamily (MF) | % | 58% | 69% | 33% | 15% | 35% | 40% | 40% |
| | S_w/S_f | 1 | 0.98 | 0.85 | 0.6 | 0.64 | 0.49 | 0.62 |
| Single family (SF) | % | 42% | 31% | 67% | 85% | 65% | 60% | 60% |
| | S_w/S_f | 1.34 | 1.34 | 1.38 | 0.76 | 1.03 | 1 | 1.13 |
| Renovation Rate (RR) | % | 0.10% | 0.80% | 2.00% | 0.30% | 1.40% | 0.50% | 0.90% |
| Walls yearly renovated | $10^6 \text{ m}^2/\text{a}$ | 2.05 | 25.57 | 68.55 | 6.81 | 65.21 | 6.47 | 5.53 |
| Current U-value of ext. walls | $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ | 1.9 | 1.42 | 1.36 | 1.6 | 1.14 | 1.07 | 0.44 |
| Min U-value from legislation | $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ | 0.54 | 0.33 | 0.35 | 0.29 | 0.27 | 0.29 | 0.18 |
| U-value target after retrofit | $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ | 0.38 | 0.22 | 0.24 | 0.18 | 0.17 | 0.16 | 0.15 |

1: Southern Dry (Spain and Portugal)
2: Mediterranean (Italy, Greece, Cyprus and Malta)
3: Southern continental (France, Bulgaria, Croatia and Slovenia)
4: Oceanic (United Kingdom, Ireland and Belgium)
5: Continental (Germany, Netherland, Austria, Hungary, Czech Republic and Luxemburg)
6: Northern continental (Poland, Denmark, Romania, Slovakia, Lithuania)
7: Nordic (Sweden, Finland, Latvia and Estonia)

Figure 2. Characterisation of the residential building stock for each Geocluster.

3.3. LIFE CYCLE ASSESSMENT FOR A DYNAMIC CARBON EMISSIONS/UPTAKE MODEL

The lack of time dependence and the treatment of the biogenic CO₂ are critical aspects in life cycle assessment (LCA) and carbon footprint calculations. Many LCA models are static and based on IPCC 2013 method tofor the characterization of the global warming potential (GWP) [23]. This implies that the effects of greenhouse gas emissions are considered for a time horizon of 100 years and that all emissions are taken as instantaneous at “time zero”. Furthermore, in this method the biogenic carbon emissions are excluded, as the carbon neutrality of forest products is assumed [24]. In this study, the dynamic LCA calculation model proposed by Levasseur et. al. was considered [25], which allows to take into account over time carbon uptake and GHG emissions.

3.4. LIFE CYCLE PHASES AND DATA AGGREGATION SCHEME

The LCA model was developed according to the EN 15804:2012 standard [26] and includes the following phases:

- production and construction (module A1-5);

- struttura non portante;
- identica sicurezza antincendio;
- vita utile di 60 anni, considerato come valore di riferimento per un edificio standard residenziale [19].

3.2. MODELLO ANALITICO PER LA DETERMINAZIONE DEL FLUSSO ANNUALE DI MATERIALI

Il patrimonio edilizio residenziale in Europa è naturalmente per gran parte eterogeneo e, per questo motivo, è stato necessario adottare preliminarmente un metodo di classificazione e caratterizzazione termica e geometrica al fine di simulare scenari di ristrutturazione su larga scala. Utilizzando un approccio semplificato di tipo “bottom-up”, supportato principalmente da dati statistici, è stato stimato il flusso annuale dei materiali (input data). Sulla base di precedenti ricerche, è stata introdotta una caratterizzazione basata su aree omogenee transnazionali (geoclusters) che ha permesso di avere dati aggregati e di colmare eventuali lacune in caso di mancanza di informazioni a livello nazionale [20].

Nello specifico, è stata adottata la classificazione suggerita da Birchall et al. [21], che si basa sull'aggregazione per condizioni climatiche simili, identificando così sette macro-aree con condizioni climatiche omogenee. Per ogni Geocluster sono state aggregate e suddivise in due

- use (modules B1 and B4);
- end of life (EoL) (module C1-4).

Figure 3 shows the general scheme of data analysis and aggregation. The ΔR_T required to meet the U-value required was assessed for each EU Member State, as well as the annual wall area that is expected to be renovated. For each geoclusters, the two values were aggregated and linked to the material inventory for the five alternative construction solutions, in order to define the annual material intensity and, consequently, the mass of greenhouse gases (GHG) emitted.

In parallel, in module B1, carbon uptake from two biosphere resources - forests and crops - were modelled and included in the analysis. Subsequently, a time matrix was defined and used as input for the dynamic impact assessment.

The results, expressed as instantaneous and cumulative radiative forcing (GWI), were converted into $\text{kgCO}_{2\text{-eq}}$ according to the IPCC method for measuring the global warming potential (GWP).

Finally, the results were aggregated with emissions for operational energy of non-renovated buildings, in order to assess the contribution of biogenic materials on the energy strategies for the overall reduction of $\text{CO}_{2\text{-eq}}$ in relation to the carbon budget still available for construction in Europe until 2050.

categorie le diverse tipologie costruttive identificate nel catalogo TABULA [22]: a) case unifamiliari (SF) e b) case plurifamiliari (MF). Per ogni tipologia di edificio è stato valutato un valore medio del rapporto tra la superficie delle pareti esterne (S_e) e la superficie di pavimento dell'edificio (S_f) e i risultati sono stati aggregati sulla base delle due categorie selezionate, come mostrato in Figura 2. In assenza di dati nazionali espliciti, i dati di altri Paesi all'interno dello stesso Geocluster sono stati considerati come rappresentativi.

3.3. VALUTAZIONE DEL CICLO DI VITA TRAMITE MODELLAZIONE DINAMICA DELLE EMISSIONI/ASSORBIMENTI

La mancanza di dipendenza dal tempo e il trattamento della CO_2 biogenica sono aspetti critici nei calcoli di valutazione del ciclo di vita (LCA) e dell'impronta di carbonio. La maggior parte dei modelli di valutazione di tipo LCA sono statici e adottano il metodo IPCC 2013 per caratterizzare il potenziale di riscaldamento globale (GWP) dei flussi di inventario [23]. Ciò implica che gli effetti delle emissioni di gas serra sono considerati per un orizzonte

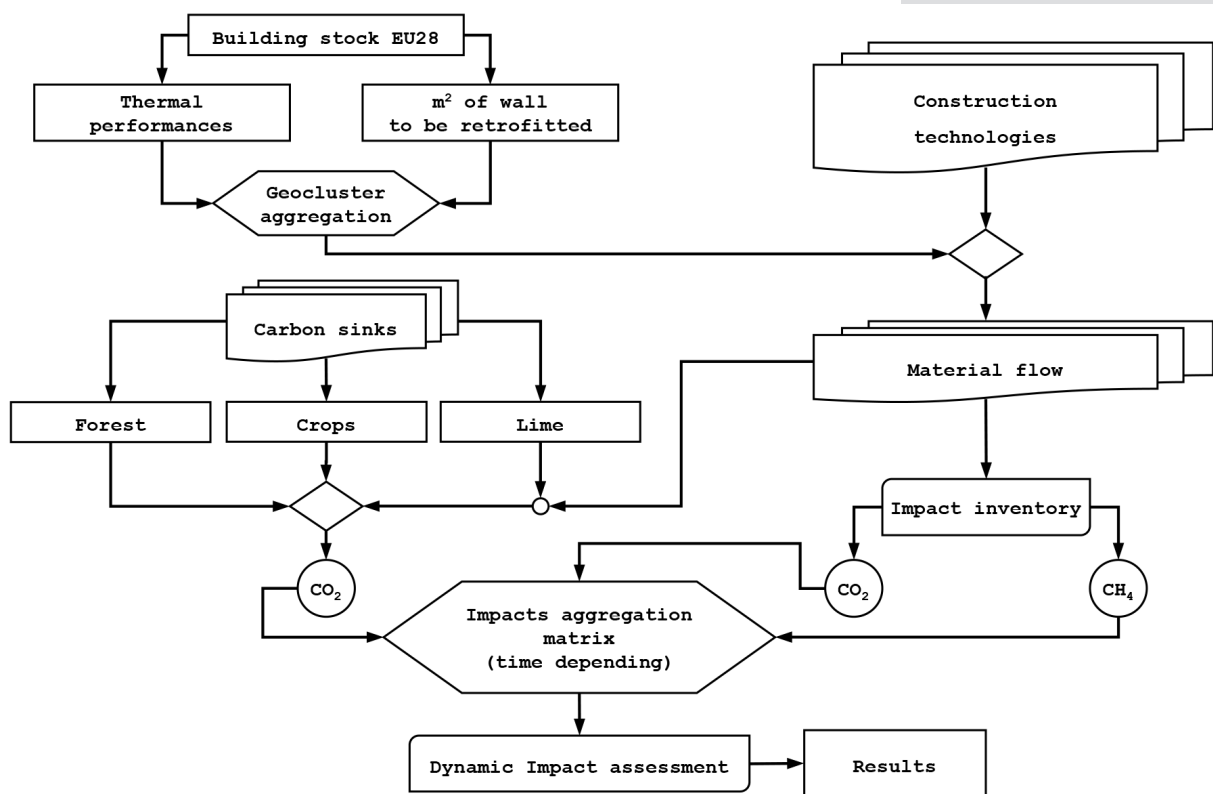


Figure 3. Scheme of the adopted methodology.

3.5. END OF LIFE MODEL

In general, the calculation of the GWI through a DLCA model is particularly sensitive to EoL scenarios. A full understanding of the variability of the results on the base of different disposal scenarios (DS) is necessary to be able to provide a deep interpretation. Four different waste treatments were assumed for the EoL:

- landfill;
- composting with biogas recovery;
- municipal incineration with energy recovery;
- recycling.

From the combinations of the different waste categories shown in Figure 1, the following three alternative disposal scenarios were defined:

- DS1: landfill;
- DS2: energy recovery;
- DS3: materials recycling.

4. RESULTS

The instantaneous radiative forcing, and consequently the dynamic GWP (GWP_{dyn}), were calculated for each wall alternative and for the three DSs through a DLCA calculation model [27]. The values are shown in Figure 4.

After an initial positive emission, the GWP impact of STR decreases rapidly, with a carbon neutrality achieved after only 4 years. Then, the effect of removing carbon from the atmosphere continues with the same positive trend. It is expected that by 2050, almost 100 Mt of CO_{2-eq} could be removed from the air due to the massive use of straw.

In 2050, the materials needed to renovate the residential building stock with HCF continue to lead to a positive emission, which is expected to be emitted cumulatively from 2018, while in 2100 the GWP registers a negative value. A similar trend is observed for HCB, although already in 2050 it reaches a negative GWP value due to the higher amount of carbon sequestered by the hempcrete blocks. For the last two alternatives, no carbon removal is expected by 2100, although a large amount of biogenic material is used in TIM.

In order to bring the analysis into a large-scale policy perspective, the results obtained were implemented to assess the significance in relation to the Community objectives for 2050 and 2100.

In order to compare the results of the analysis with the carbon budget, it was necessary to make three hypotheses on the effect of retrofit on primary energy requirements:

temporale di 100 anni e che tutte le emissioni sono assunte come istantanee al "tempo zero". Inoltre, in questo metodo le emissioni di carbonio biogenico dai materiali biogenici sono esclusi, in quanto si assume la "carbon neutrality" dei prodotti forestali [24]. In questo studio è stato considerato e implementato il modello di calcolo LCA dinamico (DLCA) proposto da Levasseur et al [25], che permette di tenere conto dei tempi di assorbimento del carbonio e delle emissioni di gas serra.

3.4. FASI DI ANALISI E SCHEMA DI AGGREGAZIONE DEI DATI

Il modello LCA è stato sviluppato secondo la norma EN 15804:2012 [26] e comprende le seguenti fasi:

- produzione e costruzione (moduli A1-5);
- utilizzo (moduli B1 e B4);
- fine vita (EoL) (moduli C1-4).

In Figura 3 viene mostrato lo schema generale di analisi e aggregazione dei dati.

Il AR_t necessario per rispettare i limiti previsti per il valore U in futuro è stato valutato per ogni Stato membro europeo, così come la superficie annua delle pareti che si prevede di rinnovare. I due valori sono stati aggregati per ciascuno dei sette geocluster e poi correlati all'inventario dei materiali per le cinque soluzioni costruttive alternative al fine di definire il flusso di materiale in entrata e, di conseguenza, la massa di gas serra (GHG) emessa annualmente. Parallelamente, nel modulo B1 sono stati modellate e incluse nell'analisi gli assorbimenti di carbonio da due risorse della biosfera: le foreste e le colture. Successivamente, è stata definita una matrice temporale che è stata utilizzata come input per la valutazione dell'impatto dinamico. I risultati, espressi in forzante radiativo istantaneo e cumulativo (GWI), sono stati convertiti in kg di CO_{2-eq} secondo il metodo IPCC per misurare il potenziale di riscaldamento globale (GWP). Infine, i risultati di emissione sono stati aggregati alle emissioni dovute all'uso degli edifici non ancora rinnovati, in modo da valutare il contributo delle strategie di riqualificazione energetica degli involucri esistenti con materiali biogenici alla riduzione globale di CO_{2-eq} in relazione al carbon budget ancora a disposizione per l'edilizia in Europa fino al 2050.

3.5. MODELLAZIONE DEL FINE VITA

In genere, il calcolo del GWI attraverso una DLCA è particolarmente sensibile agli scenari di fine vita. Una piena comprensione della variabilità dei risultati rispetto agli scenari di dismissione (DS) è necessaria per riuscire a fornire un'attenta

1. fossil emissions for the use of buildings after renovation are zero;
2. the intensity of CO_{2-eq} emitted per unit of energy produced remains constant over time;
3. no future redistribution of carbon credits between the various sectors were foreseen for the calculation of the carbon budget of construction and building sector.

The first hypothesis would obviously be linked to the type of heating system adopted and to the introduction of possible systems for the exploitation of renewable energies, solutions that do not fall within the boundaries of the assumed LCA system.

The results of the analysis for each solution and renovation scenario are shown in Figure 5.

In the evolution of cumulative emissions from the residential building stock during the 2018-2050 transition period, the decreasing trend in the slope of the curves is linked to the reduction of operational energy due to renovations, while the choice of the technical solution influences the distance between the curves. The transition is considered completed when one of the budget limits, 1.5 °C or 2 °C, is reached. In the analysis, in addition to the five alternative technologies, six renovation scenarios were taken as reference:

1. no renovation, which corresponds to a full stop of renovation from 2018;
2. business as usual, which corresponds to a renovation rate of 1% (current rate in Europe);
3. ren. rate x2 - x5, which indicates a change in the average European renovation rate from 2018 by 2 to 5 times more the average rate calculated in 2017, respectively.

interpretazione. Per il fine vita sono stati ipotizzati quattro diversi trattamenti dei rifiuti:

- deposito in discarica;
- compostaggio con produzione di biometano;
- incenerimento con recupero energetico;
- riciclo.

Dalle combinazioni di diversi trattamenti dei materiali illustrati in Figura 1, sono stati definiti i seguenti tre scenari alternativi di smaltimento:

- DS1: discarica;
- DS2: recupero di energia;
- DS3: riciclaggio di materiali.

4. RISULTATI

Il forzante radiativo istantaneo, e di conseguenza la GWP dinamica (GWP_{dyn}), è stata calcolata per ogni alternativa di parete e per i tre DS attraverso il modello di calcolo DLCA [27]. I valori sono mostrati in Figura 4.

Dopo un'emissione iniziale positiva, l'impatto GWP della STR diminuisce rapidamente, con una neutralità in termini di emissioni di carbonio che si raggiunge dopo soli 4 anni. Poi, l'effetto di rimozione del carbonio dall'atmosfera continua con la stessa tendenza positiva. Si prevede che entro il 2050, quasi 100 Mt di CO_{2-eq} potrebbero essere rimossi dall'aria per effetto dell'uso diffuso di paglia.

Nel 2050, i materiali necessari per rinnovare il parco edilizio residenziale con HCF continuano a portare a un'emissione positiva, che si prevede sarà emessa cumulativamente dal 2018, mentre nel 2100 il GWP registra un valore negativo. Una tendenza simile si osserva per l'HCB, anche se già nel 2050 raggiunge un GWP

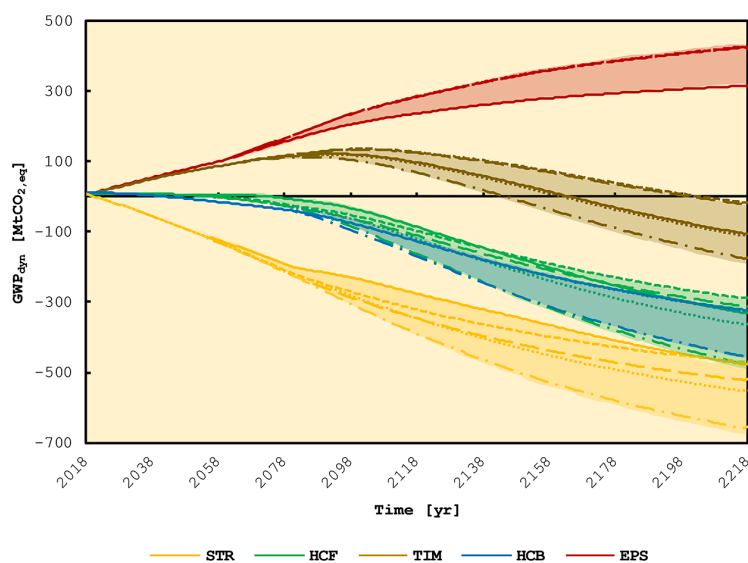


Figure 4. Dynamic GWP for all scenarios.

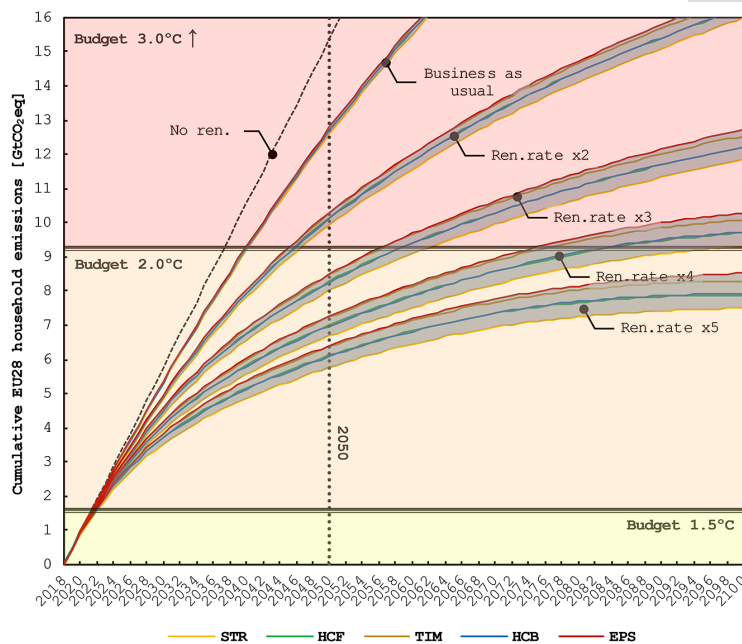


Figure 5. Scenarios of carbon mitigation of construction sector due to the renovation of the European residential building stock.

The results show that none of the scenarios can meet the 1.5°C budget, while under the current 1% renovation rate scenario, the 2°C budget would also be consumed well before the transition limit imposed by 2050. Starting from a 2% renovation rate, it is possible to respect the 2050 budget, although the contribution of storage is not significant for the achievement of long-term objectives. This contribution starts to be consistent from the ren. rate x3 scenario, where the use of straw as insulation would allow a delay of 6 years in consuming the budget, providing extra time for the development of carbon removal technologies, which are essential for the climate change mitigation [28].

5. CONCLUSIONS

Fast growing bio-based materials, e.g. hemp and straw, have considerable potential for carbon capture and storage when used as thermal insulation for the renovation of existing facades in EU-28.

The results show that they have much higher carbon removal potential than wood, which is an important strategy for achieving the objectives of the Paris Agreement. However, this benefit is irrelevant when compared to the total emissions from the use of existing buildings.

Therefore, in order to accelerate the transition and meet the carbon budget limits for reaching the 2°C target by 2050, it is necessary to increase the renovation rate of buildings in Europe. In fact, only with a drastic acceleration

negativo per via della maggiore quantità di carbonio sequestrata dai blocchi di calce e canapulo. Per le ultime due alternative non è prevista alcuna rimozione di carbonio entro il 2100, anche se nel TIM viene utilizzata una grande quantità di materiale biogenico. Al fine di proiettare l'analisi in una prospettiva politica ad ampia scala, i risultati ricavati sono stati implementati per valutarne la significatività in relazione agli obiettivi comunitari per il 2050 e 2100.

Per raffrontare i risultati dell'analisi con il carbon budget è stato necessario effettuare tre ipotesi sull'effetto del retrofit sul fabbisogno energetico primario:

1. le emissioni fossili per l'uso degli edifici a seguito del rinnovamento sono nulle;
2. l'intensità di $CO_{2,eq}$ emessa per unità di energia prodotta rimanga costante nel tempo;
3. nessuna redistribuzione futura di quote di carbonio tra i vari settori è stata prevista per il calcolo del carbon budget per l'edilizia.

La prima ipotesi sarebbe ovviamente legata al tipo di soluzione impiantistica adottata e dalla introduzione di eventuali sistemi di sfruttamento di energie rinnovabili, soluzioni che non rientrano comunque nei confini del sistema dell'analisi LCA.

I risultati dell'analisi per ogni tecnologia costruttiva e scenario di rinnovamento sono riportati in Figura 5.

Nell'evoluzione delle emissioni cumulate dal parco edilizio residenziale durante il periodo di transizione 2018-2050,

of the energy renovation of buildings is it possible to generate a significant benefit due to the long-term carbon storage in the building stock.

6. REFERENCES

- [1] DIRECTIVE (EU) 2018/844 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 30 May 2018 amending Directive 2010/31/EU on the energy performance of buildings and Directive 2012/27/EU on energy efficiency (Text with EEA relevance), n.d.
- [2] T. Boermans, G. Papaefthymiou, M. Offermann, A. John, F. Comaty, The role of energy efficient buildings in the EU's future power system, 2015.
- [3] T. Häkkinen, Systematic method for the sustainability analysis of refurbishment concepts of exterior walls, *Constr. Build. Mater.* 37 (2012) 783–790. doi:10.1016/j.conbuildmat.2012.07.084.
- [4] EUROPE'S BUILDINGS UNDER THE MICROSCOPE A country-by-country review of the energy performance of buildings, 2011.
- [5] G.A. Blengini, T. Di Carlo, The changing role of life cycle phases, subsystems and materials in the LCA of low energy buildings, *Energy Build.* 42 (2010) 869–880. doi:10.1016/j.enbuild.2009.12.009.
- [6] R. Millar, M. Allen, J. Rogelj, P. Friedlingstein, The cumulative carbon budget and its implications, (2016). doi:10.1093/oxrep/grw009.
- [7] R. Rovers, T. Lützkendorf, G. Habert, Staying below 2 (1,5) degrees of Global warming: a (near) 0-CO₂ built environment. Expert explorations of CO₂ consequences for the built environment. v.1.1, 2017.
- [8] N. Heeren, S. Hellweg, Tracking construction material over space and time: Prospective and geo-referenced modeling of building stocks and construction material flows, *J. Ind. Ecol.* 00 (2018). doi:10.1111/jiec.12739.
- [9] D. Wiedenhofer, J.K. Steinberger, N. Eisenmenger, W. Haas, Maintenance and Expansion: Modeling Material Stocks and Flows for Residential Buildings and Transportation Networks in the EU25, *J. Ind. Ecol.* 19 (2015) 538–551. doi:10.1111/jiec.12216.
- [10] L. Gustavsson, S. Haus, M. Lundblad, A. Lundström, C.A. Ortiz, R. Sathre, N. Le Truong, P.E. Wikberg, Climate change effects of forestry and substitution of carbon-intensive materials and fossil fuels, *Renew. Sustain. Energy Rev.* (2017). doi:10.1016/j.rser.2016.09.056.
- [11] B. Lippke, E. Oneil, R. Harrison, K. Skog, L. Gustavsson, R. Sathre, Life cycle impacts of forest management and wood utilization on carbon mitigation: knowns and unknowns, *Carbon Manag.* 2 (2011) 303–333. doi:10.4155/cmt.11.24.
- [12] O.R. Maser, J.F. Garza-Caligaris, M. Kanninen, T. Karjalainen, J. Liski, G.J. Nabuurs, A. Pussinen, B.H.J. De Jong, G.M.J. Mohren, Modeling carbon sequestration in afforestation, agroforestry and forest management projects: The CO₂FIX V.2 approach, *Ecol. Modell.* 164 (2003) 177–199. doi:10.1016/S0304-3800(02)00419-2.
- [13] Eurostat, Main annual crop statistics, (2017) 1–7.
- [14] J.-P. Costes, A. Evrard, B. Biot, G. Keutgen, A. Daras, S. Dubois, F. Lebeau, L. Courard, Thermal Conductivity of Straw Bales: Full Size Measurements Considering the Direction of the Heat Flow, *Buildings.* 7 (2017) 11. doi:10.3390/buildings7010011.
- [15] M. Carus, L. Sarmento, The European Hemp Industry: Cultivation, processing and applications for fibres, shivs and seeds, 2016.
- [16] A. Arrigoni, R. Pelosato, P. Melià, G. Ruggieri, S. Sabbadini, G. Dotelli, Life cycle assessment of natural building materials: the role of carbonation, mixture components and transport in the environmental impacts of hempcrete blocks, *J. Clean. Prod.* 149 (2017) 1051–1061. doi:10.1016/j.jclepro.2017.02.161.
- [17] R.G. Martinez, Hygrothermal Assessment of a Prefabricated Timber-frame Construction Based in Hemp, *Procedia Environ. Sci.* 38 (2017) 729–736. doi:10.1016/j.proenv.2017.03.155.
- [18] F. Pittau, F. Krause, G. Lumia, G. Habert, Fast-growing bio-based materials as an opportunity for storing carbon in exterior walls, *Build. Environ.* 129 (2018) 117–129. doi:10.1016/j.buildenv.2017.12.006.
- [19] P. Mayer, BLP Durability Assessment, London, 2005. <http://www.componentlife.com/>.
- [20] M.M. Sesana, B. Cuca, G. Iannaccone, R. Brumana, D. Caccavelli, C. Gay, Geomapping methodology for the GeoCluster Mapping Tool to assess deployment potential of technologies for energy efficiency in buildings, *Sustain. Cities Soc.* 17 (2015) 22–34. doi:10.1016/j.scs.2015.02.006.

si nota come l'andamento decrescente della pendenza delle curve sia legato alla riduzione dell'energia operativa dovuta alle ristrutturazioni, mentre la scelta del sistema tecnologico influenza la distanza tra le curve. La transizione è considerata conclusa quando si raggiunge uno dei limiti di budget, 1.5 °C o 2 °C. Nell'analisi, oltre alle cinque tecnologie alternative, vengono presi come riferimento sei scenari di rinnovamento:

1. No renovation, che corrisponde a una cessata attività nel 2018 del rinnovamento delle facciate;
2. Business as usual, che corrisponde a un tasso di rinnovo dell'1% (valore medio europeo del 2017);
3. Ren. rate $x_2 - x_5$, che indicano una variazione del tasso di rinnovo medio europeo a partire dal 2018 rispettivamente da 2 a 5 volte maggiore rispetto al valore medio calcolato nel 2017.

Dai risultati ottenuti si nota come nessuno degli scenari sia in grado di rispettare il budget 1.5 °C, mentre con lo scenario attuale di tasso di rinnovamento dell'1% anche il budget 2°C verrebbe consumato ben prima del limite della transizione imposto al 2050. A partire da un incremento del tasso del 2% è possibile rispettare il budget 2050, sebbene il contributo dello stoccaggio non sia significativo per il raggiungimento degli obiettivi a lungo termine. Tale contributo inizia ad essere sensibile a partire dallo scenario Ren. rate x_3 , dove l'utilizzo della paglia come materiale isolante permetterebbe un ritardo di 6 anni nel raggiungimento del budget, fornendo del tempo extra per lo sviluppo di tecnologie di rimozione del carbonio, indispensabili per la mitigazione dei cambiamenti climatici [28].

5. CONCLUSIONI

I materiali biologici a rapida crescita, come la canapa e la paglia, hanno un notevole potenziale di cattura e stoccaggio del carbonio quando vengono utilizzati come isolamento termico per il rinnovo delle facciate esistenti nell'UE-28. I risultati mostrano che esse hanno un potenziale di assorbimento del carbonio maggiore rispetto al legno, il che rappresenta una strategia importante per il conseguimento degli obiettivi dell'accordo di Parigi sul clima. Tale beneficio, risulta tuttavia irrilevante se rapportato alle emissioni totali generate dall'uso degli edifici esistenti. Per tale motivo, al fine di accelerare la transizione e rispettare i limiti del carbon budget per il raggiungimento dell'obiettivo 2 °C entro il 2050, è necessario incrementare il tasso di rinnovamento degli edifici in Europa. Infatti, solamente con

- [21] S. Birchall, I. Wallis, D. Churcher, S. Pezzutto, R. Fedrizzi, E. Causse, D2.1a - Survey on the energy needs and architectural features of the EU building stock, (2014) 230. http://www.inspirefp7.eu/wp-content/uploads/2014/08/WP2_D2.1a_20140523_P18_Survey-on-the-energy-needs-and-architectural-features.pdf.
- [22] T. Loga, B. Stein, N. Diefenbach, TABULA building typologies in 20 European countries - Making energy-related features of residential building stocks comparable, *Energy Build.* 132 (2016) 4–12. doi:10.1016/j.enbuild.2016.06.094.
- [23] V. Krey, O. Masera, G. Blanford, T. Bruckner, R. Cooke, K. Fish-Vanden, H. Haberl, E. Hertwich, E. Kriegler, D. Müller, S. Paltsev, L. Price, S. Schlömer, D. Uerge-Vorsatz, D. Van Vuuren, T. Zwickel, Annex II: Metrics & Methodology., *Clim. Chang. 2014 Mitig. Clim. Chang. Contrib. Work. Gr. III to Fifth Assess. Rep. Intergov. Panel Clim. Chang.* (2014) 1281–1328. http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg3/ipcc_wg3_ar5_annex-ii.pdf.
- [24] F. Cherubini, Biogenic carbon emissions and climate impact dynamics, (2015).
- [25] A. L'Homme, P. Lesage, M. Margni, L. Deschênes, R. Samson, Considering time in LCA: Dynamic LCA and its application to global warming impact assessments, *Environ. Sci. Technol.* 44 (2010) 3169–3174. doi:10.1021/es9030003.
- [26] CEN/TC350, EN 15804:2012, (2012).
- [27] F. Pittau, G. Lumia, N. Heeren, G. Iannaccone, G. Habert, Retrofit as a carbon sink: The carbon storage potentials of the EU housing stock, *J. Clean. Prod.* (2019). doi:10.1016/j.jclepro.2018.12.304.
- [28] S. Fuss, J.G. Canadell, G.P. Peters, M. Tavoni, R.M. Andrew, P. Ciais, R.B. Jackson, C.D. Jones, F. Kraxner, N. Nakicenovic, C. Le Quéré, M.R. Raupach, A. Sharifi, P. Smith, Y. Yamagata, COMMENTARY: Betting on negative emissions, *Nat. Clim. Chang.* 4 (2014) 850–853. doi:10.1038/nclimate2392.

una drastica accelerazione del rinnovamento energetico degli edifici è possibile generare un beneficio significativo dovuto allo stoccaggio del carbonio a lungo termine nel parco edilizio.