

BOTANICAL CONCRETE

Sperimentazione su substrati di calcestruzzo per l'inverdimento verticale

BOTANICAL CONCRETE

Experimentation on concrete substrates for vertical greening

Lucas Büscher, Roman Polster, Heike Klussmann

ABSTRACT

La ricerca sul Botanical Concrete indaga con un approccio innovativo, basato sul design thinking, i materiali e la fitotecnologia, nei sistemi di inverdimento per pareti al fine di dare nuove funzioni al calcestruzzo e consentire l'insediamento superficiale permanente contemporaneamente di crittogame e tracheofite, due specie con diverse esigenze di substrato che si traducono in due distinti requisiti del calcestruzzo. Dalla combinazione dei risultati delle sperimentazioni sulle crittogame e sulle tracheofite si genera un approccio inedito e attento alle risorse per l'inverdimento verticale, capace di sfruttare le superfici impermeabili comunemente presenti negli spazi edificati per insediare la vegetazione, migliorare i microclimi locali, aumentare la biodiversità urbana e creare nuovi biotopi.

Botanical Concrete collaboratively investigates a fundamentally new approach to wall-based vertical greening systems, based on design thinking, materials research and phytotechnology, to functionalize concrete and allow the permanent establishment of cryptogams and tracheophytes on its surface, two species with different substrate demands requiring two different sets of parameters for functionalisation. Combining the results of research into cryptogams and tracheophytes produces a novel, resource-conserving approach to vertical greening, able to take advantage of the impermeable surfaces commonly found in built space to establish vegetation, improve local microclimates, increase urban biodiversity, and create new biotopes.

KEYWORDS

inverdimento verticale, substrato di calcestruzzo, calcestruzzo vivente, infrastruttura verde, bioricettività

vertical greening, concrete substrate, living concrete, green infrastructure, bio-receptivity

Lucas Büscher, Horticulturist, is a Research Associate at the Department of Landscape Architecture/Technology, University of Kassel (Germany). In his PhD thesis 'concrete habitat' he focuses on the functionalisation of concrete and its surface in the context of vertical green, targeted vegetation and vegetation dynamic and substrate development. E-mail: l.buescher@asl.uni-kassel.de

Roman Polster, Urban Planner, is a Research Associate at the research group Bau Kunst Erfinden, University of Kassel (Germany). His research centres on architectural engineering and the development of smart materials for the building and construction industry. In his PhD thesis, he focuses on the functionalisation of concrete and its surface in the context of vertical green and targeted greening. E-mail: polster@uni-kassel.de

Heike Klussmann is a Professor of Art and Architecture at the University of Kassel (Germany), where she directs the research group Bau Kunst Erfinden, which is dedicated to the development of innovative materials systems at the convergence of art, architecture and new technologies. She has taught and conducted research at the Art Center College of Design, Pasadena and the Monash University, Melbourne (Australia). E-mail: klussmann@asl.uni-kassel.de

Il benessere degli abitanti dei centri urbani ad alta densità è costantemente minato sia dall'effetto isola di calore (Deilami, Kamruzzaman and Liu, 2018) sia dal consumo e dall'impermeabilizzazione di suolo, tutti effetti e fattori in costante crescita (Statistisches Bundesamt, 2016) che comportano impatti negativi significativi sulla salute umana, sulla disponibilità di spazi aperti, sulla biodiversità e sull'offerta di biotopi (McDonald et alii, 2020). Il valore degli spazi verdi urbani e i loro effetti positivi psicologici e fisici sull'organismo umano sono ben documentati (Takano, Nakamura and Watanabe, 2002; Wong et alii, 2021), ma la ridotta disponibilità di aree verdi urbane non è sufficiente a incidere sul potenziamento della biodiversità o sul miglioramento del microclima. Il verde verticale può fornire un importante contributo nel fronteggiare le sfide emergenti dovute alla proliferazione delle superfici impermeabili a discapito degli spazi naturali (Statistisches Bundesamt, 2016), ma può anche risolvere criticità di natura socioculturale, qualitativa dell'aria (Ysebaert et alii, 2021) e legate al riscaldamento urbano (Manso et alii, 2021), incidendo sulla qualità dell'architettura e degli spazi aperti di una città resiliente.

A differenza degli interventi di inverdimento orizzontale quelli su superfici verticali superano la necessità di un collegamento al suolo o di un tetto verde poiché sfruttano la parete come struttura e allo stesso tempo possono fungere da elemento termoregolatore e per la ortocoltura. Per il mondo scientifico può essere di interesse la messa a punto di substrati che favoriscano l'insediamento e la crescita di piante su superfici impermeabili in sostituzione delle attuali non portanti come quelle in tessuto (Magistrat der Stadt Wien, 2019) o in plastica combinate con altri elementi funzionali in complessi componenti multistrato (FLL, 2018) che determinano un aumento dei costi di realizzazione e di gestione dei rifiuti e generano materiali non riciclabili. Nell'ottica di ottimizzare il rapporto costi-benefici (Riley, 2017; Eppel, 2018), il presente contributo riporta gli esiti di una sperimentazione sull'inverdimento di pareti in calcestruzzo, tracciando lo stato attuale della ricerca e delle tecnologie disponibili, formulando un inedito obiettivo per il progetto, descrivendo due approcci metodologici innovativi e discutendo su limiti e sviluppi futuri della ricerca.

Lo stato attuale della ricerca e le tecnologie disponibili | Il calcestruzzo è un materiale da costruzione consolidato per pareti e facciate, riciclabile (DAfStb Beton, rezyklierte Gesteinskörnung; 2010-09) e versatile grazie all'ampia gamma di miscele disponibili. Quando impiegato in esterno, il calcestruzzo è soggetto alla colonizzazione delle crittogame o delle piante vascolari che riescono a crescere sulla superficie danneggiata in prossimità dei giunti. Diversi sono gli studi sulla bioricettività del calcestruzzo: Manso Blanco (2014) si è concentrato esclusivamente sul valore del PH trascurando altri fattori specifici del sito; Veeger, Ottelé and Prieto (2021) hanno ottenuto risultati promettenti e illuminanti, dapprima realizzando un biofilm su campioni di calcestruzzo altamente alcalino privo di qualità strutturali, poi favorendo la bioricettività attraverso una miscela di aggregati e calcestruzzo di Portland e infine mettendo a punto un composito strutturale mediante la combinazione di miscele a base di argilla espansa

e calcestruzzo ad altissime prestazioni (UHPC).

La FLL (2018) riferisce dell'uso del calcestruzzo come substrato per la coltivazione delle piante, ma lo cita solo come materiale di rivestimento senza fornire specifiche tecniche e prestazionali, assimilandolo a uno tra i tanti componenti non strutturali di un involucro a strati. Se alcuni studi sull'inverdimento delle pareti hanno fornito risultati incoraggianti sull'impiego di calcestruzzo poroso in combinazione con substrati aggiunti (Ottelé, 2011; Riley et alii, 2019), per compensarne le limitate capacità portanti altre ricerche hanno previsto l'utilizzo di sistemi compositi multistrato o di superficie (Riley et alii, 2019; Respyre, n.d.). In generale le ricerche mostrano come l'aumento della bioricettività del calcestruzzo abbia determinato una significativa riduzione della resistenza a compressione e della durabilità del materiale, limitandone l'impiego in elementi strutturali. L'acqua rappresenta un elemento vitale per la vegetazione solitamente gestito con sistemi di irrigazione artificiale; alcuni progetti pilota (UCL, n.d.) stanno studiando uno stato di rivestimento del calcestruzzo che trattiene l'acqua grazie a particolari porosità, livello di acidità e sostanze nutritive contenute nell'impasto, utili a favorire l'insediamento di muschi, licheni e alghe. Il successo e la diffusione di tali sistemi dipendono in larga misura dalle condizioni climatiche e dai fattori specifici del sito, quali esposizione e umidità.

In sintesi, ad oggi l'ottimizzazione della bioricettività del calcestruzzo è possibile a fronte della perdita delle sue funzioni portanti; sono poi necessari sistemi di irrigazione artificiale, mancano dati generalizzabili sulla configurazione tridimensionale dei siti di germinazione e crescita delle specie vegetali e la ricerca sull'insediamento della tracheofite su superfici verticali in calcestruzzo è sottorappresentata.

Obiettivo, approccio interdisciplinare e metodologia | Il progetto di ricerca Botanical Concrete si propone di studiare un nuovo approccio all'inverdimento verticale per favorire l'insediamento permanente della vegetazione su superfici in calcestruzzo. I parametri materiali e ortocolturali definiti dalla ricerca costituiranno la base per una progettazione di pareti e facciate a prova di stagioni e condizioni atmosferiche e consentiranno modalità di insediamento non invasivo di specifici muschi e tracheofite sulle superfici verticali in calcestruzzo, impiegando soluzioni integrate a bassa tecnologia per limitare l'evaporazione dell'acqua.

Il Botanical Concrete si basa su un assunto originale: il calcestruzzo con funzione strutturale può essere modificato in modo da supportare attivamente l'insediamento mirato e la crescita su superfici verticali delle crittogame e tracheofite selezionate. Si tratta di un approccio innovativo e interdisciplinare che si avvale di competenze provenienti da diversi settori quali la pianificazione, l'architettura del paesaggio, il design, la scienza dei materiali, la fitotecnologia e la fitosociologia (attraverso ricerca di base e ingegneria applicativa per tutte le diverse fasi del processo edilizio) per funzionalizzare con la coltivazione di piante un materiale consolidato nel settore delle costruzioni che in futuro continuerà a essere utilizzato in forma riciclata. L'aggiunta di funzionalità bioricettive al calcestruzzo consente di ottenere vantaggi tecnologici, estetici ed ecologici, contribuendo anche a compensarne l'elevata impronta di carbonio.

Le crittogame e le tracheofite hanno esigenze di substrato diverse che, per funzionalizzare il calcestruzzo, comportano due distinti requisiti: per capire come realizzare un sistema di inverdimento verticale a parete architettonicamente ambizioso, efficiente nella gestione delle risorse ed efficace dal punto di vista ambientale è quindi necessario affrontare il tema da prospettive diverse. L'indagine interdisciplinare si basa su due approcci innovativi, ingegneristico e fitotecnologico, per valutarne in termini metodologici e di risultato sia l'idoneità del calcestruzzo strutturale come substrato per la vegetazione sia il potenziale estetico. L'approccio ingegneristico indaga sulla funzionalizzazione bioricettiva della superficie del calcestruzzo, particolarmente adatta alla colonizzazione delle crittogame, mentre l'approccio fitotecnologico analizza la vegetazione nel suo habitat naturale per modificare il calcestruzzo e renderlo un substrato adatto all'insediamento delle tracheofite.

Metodo 1: ingegneria dei materiali e colonizzazione delle crittogame | Per l'insediamento delle crittogame si è resa necessaria la realizzazione di un substrato di crescita (sotto forma di aggregato minerale come roccia lavica, pomice o zeolite; Fig. 1) sulla superficie esterna dell'elemento in calcestruzzo (Polster and Klusmann, 2019); in tal modo si realizza un microambiente localizzato utile alla crescita del muschio e si mantiene inalterata la miscela dei componenti del calcestruzzo con funzione strutturale. Le sperimentazioni condotte per l'integrazione del materiale minerale sulla superficie del calcestruzzo hanno permesso di mettere a punto i componenti impiegati (rivestimento della cassaforma, nastro di applicazione, disattivatore, aggregato, cassaforma e matrice di calcestruzzo): la Figura 2 illustra la procedura per la preparazione della matrice e la disposizione dell'aggregato.

Per riprodurre la crescita dei muschi sulle superfici in cemento è stata condotta una campagna di rilevamento (nelle regioni dell'Assia e della Baviera) dei muschi che crescono su substrati minerali di superfici esterne, documentandone e analizzandone la geometria tridimensionale, la struttura superficiale e la composizione per poi suddividerli in tre categorie (superfici verticali, giunti e fessure rocciose), prestando particolare attenzione ad angoli, dimensioni e altri parametri tecnici ai fini di una loro riproduzione sul calcestruzzo. Sono state ricavate tre geometrie con una profondità di 0-17 mm: una piana relativa alle superfici verticali delle pareti in calcestruzzo degradate dagli agenti atmosferici (Fig. 3), una concava presente nei giunti erosi e dilavati di muri in mattoni e pietra (Fig. 4), una a cuneo riferibile alle fessure presenti nelle formazioni rocciose (Fig. 5) causate dagli agenti atmosferici e dall'azione del gelo e del disgelo.

L'interazione tra i parametri specifici del materiale e la geometria del sito di crescita è stata testata utilizzando campioni di calcestruzzo ad alta e altissima resistenza, inizialmente sotto forma di pannelli con dimensioni di 100 x 100 mm e 200 x 200 mm e spessori di 20-30 mm, prodotti tramite stampo in polistirene e lattice con geometrie piane, lineari e a cuneo. Gli aggregati di lava e pomice (2-3 mm e 3-4 mm) sono stati prima puliti da sostanze estranee mediante lavaggio e poi collocati sulle matrici nell'area dei siti di crescita con un adesivo, necessario sia per fissare gli aggregati duran-



Fig. 1 | Washed aggregates: lava, pumice, zeolite (credit: BauKunstErfinden, 2018).

Fig. 2 | Seeding the form liner with lava aggregate, 2-3 mm diameter (credit: R. Polster, 2019).

te il getto di calcestruzzo sia per realizzare una loro distribuzione densa e omogenea sulle matrici (Fig. 6).

Le caratteristiche dell'aggregato e soprattutto la qualità, la granulometria e la composizione del materiale risultano di particolare importanza per la funzione del monostrato, al pari della profondità di inglobamento delle sue particelle nella superficie del calcestruzzo, sia per garantire l'ancoraggio dell'aggregato al calcestruzzo sia per fornire un'adeguata superficie 'aggrappante' per il muschio. Gli esperimenti condotti sulle geometrie piane, lineari e a cuneo hanno dimostrato che il metodo utilizzato consente la realizzazione di un monostrato di aggregati omogeneo sulla superficie del calcestruzzo (Fig. 7), mentre l'installazione di pannelli verticali in esterno ha consentito di studiare le fasi di colonizzazione e crescita del muschio dimostrando l'efficacia dell'azione congiunta del monostrato di aggregati e della struttura tridimensionale superficiale del calcestruzzo (Fig. 8).

Metodo 2: fitotecnologia e insediamento delle tracheofite | L'analisi delle specie vegetali spontanee presenti su superfici verticali quali rocce e pareti rappresenta il punto di partenza per creare le condizioni adatte all'insediamento delle tracheofite sul calcestruzzo nel quale lesioni, fessure, giunti e oggetti offrono spazi per la germinazione e la crescita della materia biologica. Il metodo descritto si basa su un esame fitosociologico di questi siti di crescita e delle comunità vegetali coinvolte, traducendo poi i risultati in parametri quantitativi e da valutare attraverso l'uso di campionature.

La vegetazione rocciosa e parietale si trova tipicamente in substrati poco profondi nei quali vi è un apporto idrico limitato; la germinazione avviene in luoghi isolati e la crescita tende a essere rada. Per consentirne la misurazione da ricondurre a un

modello di analisi è stata messa a punto una classificazione del materiale biologico in base a quattro parametri fondamentali del materiale, ossia la matrice del calcestruzzo, la macrostruttura tridimensionale, la superficie e il substrato di crescita, tutte variabili che permettono di gestire, in termini estetici e progettuali, il numero di siti di germinazione e crescita e la densità della vegetazione desiderati (Fig. 9).

Poiché la varietà di specie vegetali presenti sulle superfici verticali dipende anche dalle condizioni ambientali locali e varia notevolmente in base ai propaguli presenti (Brandes, 2013; Gausmann and Rosin, 2014) la campagna di rilevamento fotografico ha permesso di individuare le piante cosmopolite, colturali, ruderali e da pascolo come quelle che colonizzano più frequentemente i muri (Brandes and Brandes, 2010) e di predisporre un elenco con un ampio spettro di specie annuali e biennali capaci fiorire più volte. Il mix di sempreverdi, piante da fiore ed erbacee che si sviluppano sulla superficie del muro consente svariate opzioni progettuali in termini di colore, dimensioni, texture e struttura (Büscher, 2018), avendo però cura di selezionare le specie confrontandole in base a criteri rilevanti quali le condizioni di germinazione, vernalizzazione e stratificazione, i tempi di crescita e il potenziale di danneggiamento dei muri (generalmente più alto nelle piante legnose).

Sulla base della documentazione fotografica della vegetazione verticale spontanea è stato adottato un approccio innovativo che assimila il calcestruzzo a un orizzonte C (ad esempio la roccia; Polster et alii, 2020) e ripropone la sequenza di orizzonti A-C del suolo vergine. Per le piante vascolari selezionate, l'orizzonte C è integrato con un substrato aggiuntivo a grana fine, non legato al calcestruzzo, sviluppato appositamente per la sperimentazione e basato sull'orizzonte A presente in

natura nei substrati rocciosi e nei giunti delle pareti (Fig. 10). Nel modello proposto, il calcestruzzo deve funzionare come una parete rocciosa artificiale, immagazzinando acqua e fornendo un ancoraggio alle radici delle piante; allo scopo sono stati condotti test comparativi con diversi tipi di calcestruzzo: il calcestruzzo a grana 'non fine' ha una bassa capacità di carico del materiale ed è maggiormente soggetto a danneggiamento da parte delle radici legnose; quello (gettato in opera nella cassaforma in strati da circa 15-25 cm prima ricoperti da miscele di ghiaia-pietra lavica-argilla e poi compattati, secondo un metodo testato dagli autori) nel quale il substrato viene racchiuso in un 'nido' di 'cemento armato' è un'opzione esteticamente interessante, ma è relativamente costoso da produrre e ha consistenza che limita le forme che può assumere; l'UHPC non ha capacità di immagazzinare acqua a causa della sua densità.

Poiché secondo le classi di esposizione del calcestruzzo stabilite dalla German Concrete Standard (DIN EN 206-1/DIN 1045-2) è possibile produrre calcestruzzo normale con un rapporto acqua/cemento superiore a 0,4, permeabile al vapore e resistente al gelo e al disgelo, sono stati sviluppati e testati campioni in calcestruzzo realizzati con miscele diverse di aggregati con capacità di assorbimento dell'acqua differente: sabbia e ghiaia; sabbia, ghiaia e pomice; sabbia, ghiaia e calcestruzzo leggero frantumato; sabbia, ghiaia e mattoni frantumati. Sono stati quindi condotti test comparativi di germinazione per valutare la compatibilità delle piante con pomice, mattoni frantumati e calcestruzzo alleggerito frantumato, valutandone l'impiego con una granulometria fine (0-2 e 0-3 mm) sia come aggregati per calcestruzzo sia come substrati di crescita per le specie vegetali precedentemente selezionate. Tutti i materiali hanno mostrato un'idoneità di base all'insediamento della vegetazione e vitalità simile, sebbene si siano riscontrate delle differenze nella profondità di radicamento e nella crescita dei germogli ove presente la pomice rispetto ai materiali riciclati, i quali invece si sono dimostrati in grado di produrre strutture uniformemente piccole e resistenti in aree mirate (Fig. 11).

Sui muri e nelle fessure della roccia la pietra e la pianta stessa proteggono il substrato dal soleggiamento diretto impedendo l'evaporazione dell'acqua e fornendo una protezione naturale che è un obiettivo importante del progetto. Nei muri di Kassel sono state quindi misurate la larghezza e altezza degli incavi di germinazione – generalmente di piccole dimensioni, senza labbro superiore o inferiore (Figg. 12, 13) – effettuando confronti statistici e classificazioni per tipologia da tradurre in parametri strutturali. Non essendo sempre possibile confrontare i volumi degli incavi di formazione naturale sono stati condotti dei test su campioni in calcestruzzo che presentavano incavi di dimensioni diverse, impiegando casseforme e rivestimenti elastici riutilizzabili per replicare le potenzialità espressive delle specie vegetali in cavità puntiformi e lineari (Fig. 14).

Conclusioni | La ricerca sul Botanical Concrete dimostra che il calcestruzzo con funzione strutturale può supportare l'insediamento e la crescita di crittogame e tracheofite, risultato possibile grazie ai due differenti approcci metodologici adottati; tuttavia nel lungo periodo rimangono da valutare gli

effetti generati dai diversi fattori ambientali sulla vegetazione e la consistenza e integrità dei materiali. Attraverso un substrato con aggregati sulla superficie del calcestruzzo e un microrilievo tridimensionale è stato possibile realizzare una superficie bioricettiva per l'insediamento e la coltivazione di muschi, mentre con l'aggiunta di un substrato secondario a base di materiali riciclati e con una particolare geometria della superficie del calcestruzzo permeabile al vapore si sono create le condizioni favorevoli per l'insediamento e la germinazione delle tracheofite.

A livello metodologico è risultato fondamentale l'approccio interdisciplinare: l'individuazione di obiettivi e priorità condivisi, così come la scelta di lavorare collegialmente al di fuori dei confini disciplinari tradizionali, ha portato a una nuova prospettiva metodologica, creativa, scientifica e orientata alla pratica. I risultati ottenuti generano future opportunità di ricerca su questioni che riguardano l'apporto idrico, la variabilità della forma del materiale, il perfezionamento della cassaforma, la messa a punto di classificazioni strutturali e la metodologia di raccolta e restituzione di informazioni sui siti di insediamento della vegetazione. Sarà poi necessario confrontare con maggior dettaglio i requisiti delle crittogame e delle tracheofite e correlarli per meglio individuare sinergie e divergenze specifiche dei due approcci, prevedendo il coinvolgimento di un esperto di meteorologia per valutarne gli effetti microclimatici reali e la quantità di CO₂ che può essere assorbita da una parete in cemento inverdita, il tutto con la speranza che essa possa migliorare i microclimi locali e la qualità architettonica, sfruttare meglio le superfici impermeabili, aumentare la biodiversità urbana e creare nuovi biotopi.

With the densification of cities, urban dwellers are increasingly burdened both by the heat island effect (Deilami, Kamruzzaman and Liu, 2018) as well as by land consumption and sealing of land, steadily increasing factors (Statistisches Bundesamt, 2016) which have significant negative impacts on human health, open space availability, biodiversity, and biotope supply (McDonald et alii, 2020). The value of green space in the city and its positive psychological and physical effects on the human organism are well documented (Takano, Nakamura and Watanabe, 2002; Wong et alii, 2021), but the reduced availability of urban green areas is not sufficient to affect the enhancement of biodiversity or the improvement of the microclimate. Vertical greening can provide an important contribution in facing the emerging challenges due to the proliferation of impermeable surfaces with the consequent detriment of natural spaces (Statistisches Bundesamt, 2016) and can also solve socio-cultural issues, improve air quality (Ysebaert et alii, 2021), curtail urban warming (Manso et alii, 2021), thus affecting the quality of architecture and natural spaces in a resilient city.

Unlike horizontal greening methods, wall-based approaches allow the greening of vertical surfaces unconnected to the ground or a green roof, as they make use of the wall from a structural viewpoint and, at the same time, act as a thermoregulatory element for horticulture. There is therefore a scientific interest in creating substrates that are capa-

ble of establishing and growing plants on impermeable surfaces, in substitution of current, non-load-bearing substrates such as fabric (Magistrat der Stadt Wien, 2019) and plastic support frameworks that are combined with other functional layers to form complicated, multi-layered sandwich structures (FLL, 2018), which increase the costs

of waste management and produce materials that cannot be recycled. In view of optimizing the cost-benefit relationship, (Riley, 2017; Eppel, 2018), this paper describes the results of experimentation regarding the greening of concrete walls, summarizing the current state of research and technology to formulate an unprecedented objective, de-

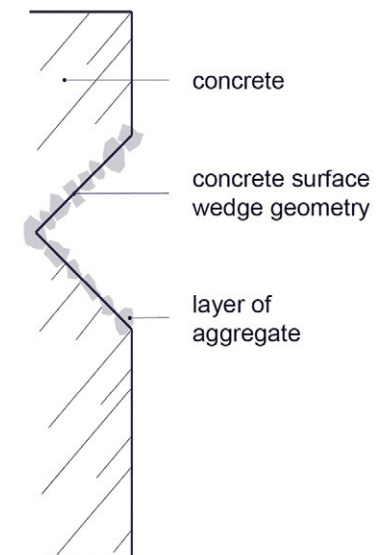
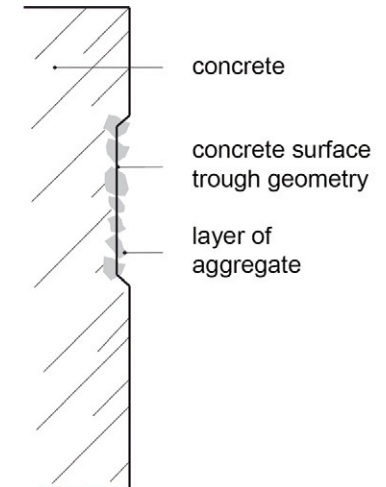
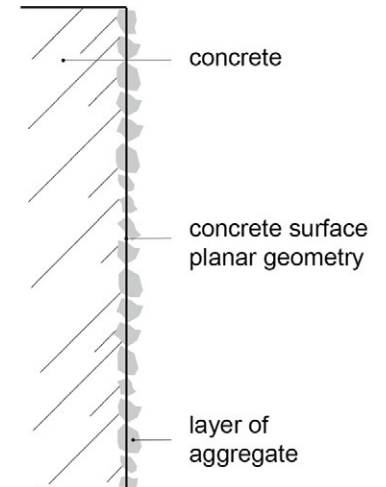


Fig. 3 | Microrelief of the wall with growing moss: translation of parameters into planar geometry with aggregate monolayer (credit: R. Polster, 2019).

Fig. 4 | Joint in a brick wall, Breitscheidstraße in Kassel (Germany): translation of parameters into trough geometry with aggregate monolayer (credit: R. Polster, 2019).

Fig. 5 | Natural crevice in rock, Upper Franconia (Germany): translation of parameters into wedge geometry with aggregate monolayer (credit: R. Polster, 2019).

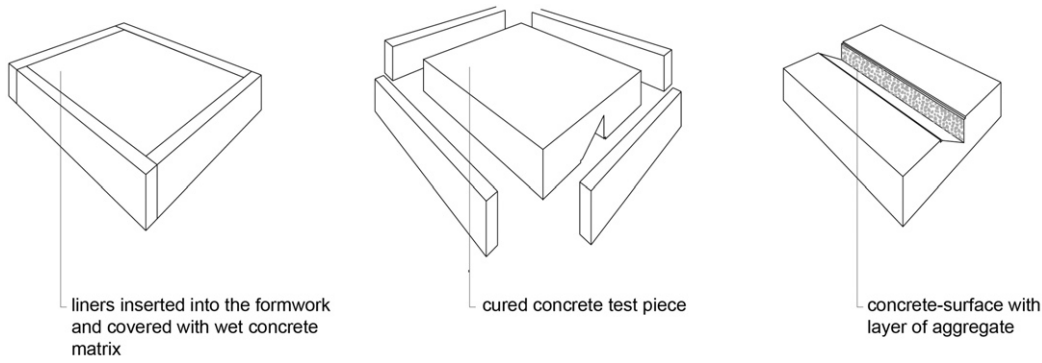


Fig. 6 | Schematic process of forming concrete matrix and subsequent treatment of cured concrete test piece (credit: R. Polster, 2019).

describing two innovative methodological approaches and discussing the limits and future developments for follow-up research.

The state of current Research and Technology | Concrete is well established as a building material for walls and facades; it is recyclable (DAfStb Beton, rezyklierte Gesteinskörnung:2010-09), and the wide range of concrete mix designs makes it adaptable to many different uses. Exterior building elements made of concrete are also receptive to colonization by cryptogams or vascular plants that are able to grow in the damaged mortar of joints in walls. There are various studies on the bio-receptivity of cement samples; Manso Blanco

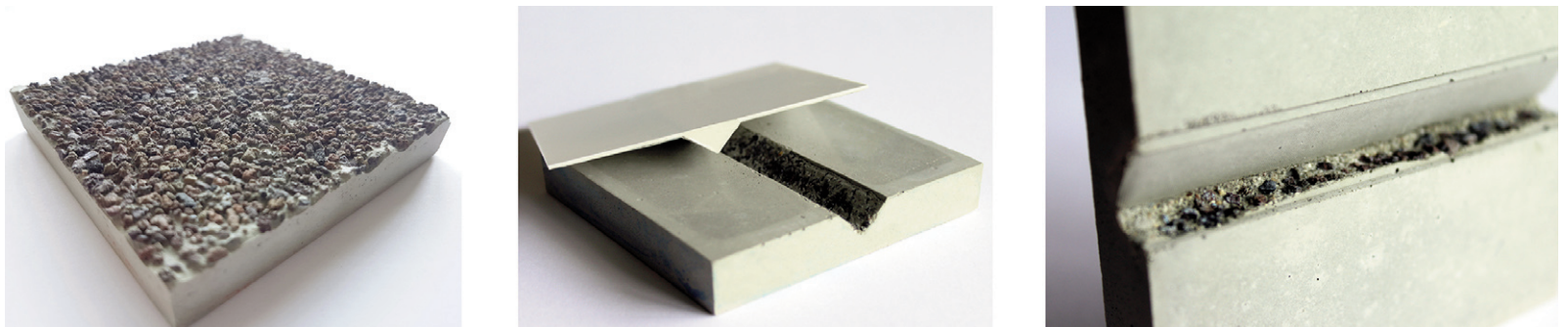


Fig. 7 | Test pieces showing aggregate monolayer in planar, trough, and wedge geometries (credit: R. Polster, 2019).



Fig. 7 | Test pieces showing aggregate monolayer in planar, trough, and wedge geometries (credit: R. Polster, 2019).



Fig. 9 | Naturally occurring vertical greening in a wide variety of leaf colours, growth habits, leaf shapes, and compactness: 'Cymbalaria muralis', 'Pseudofumaria lutea', and 'Asplenium ruta-muraria' (credit: L. Büscher, 2018).

(2014) focused exclusively on PH value, neglecting all other site-specific factors; Veeger, Ottelé and Prieto (2021) obtained encouraging and illuminating results, firstly succeeding in establishing biofilms on highly alkaline concrete samples without any structural qualities, then favouring bio-receptivity in concrete through the addition of aggregates to ordinary Portland cement, and finally creating a structural composite by combining these expanded-clay-based bio-receptive concrete mixes with ultra-high-performance concrete (UHPC), Veeger, Prieto and Ottelé (2021).

The FLL (2018) discusses the use of concrete as a substrate for cultivating plants, but mentions it only as a facing material, without giving any material and technical specifications and likening it to one of many non-structural components of a layered envelope. If certain studies have achieved results through the use of porous concrete in combination with additive substrates (Ottelé, 2011; Riley et alii, 2019), to compensate for the limited load-bearing capacities other studies have foreseen the use of multi-layered composite or surface-mounted systems (Riley et alii, 2019; Respyre, n.d.). In general, studies demonstrate how the process of increasing concrete's bio-receptivity determined a significant reduction of its resistance to compression and durability, limiting its suitability as a material for monolithic structural elements. Water is a vital factor for vegetation, which in the past has generally been addressed through the addition of artificial irrigation systems; pilot projects currently underway (UCL, n.d.) are investigating concrete cladding systems that combine water-retaining concrete with water-channelling surface morphologies to establish mosses, lichens, and algae. The success and distribution of such systems presumably depend to a great extent on local hydrological conditions and site-specific factors such as exposure, shade, and humidity.

In summary, today bioreceptive optimization of concrete is possible but it loses its load-bearing functions as a result; furthermore, artificial irrigation systems are needed or the water supply is not further quantified, generalizable data on the three-dimensional design of germination and growth sites are lacking, and research on the establishment of site-adapted tracheophytes on vertical concrete surfaces is underrepresented.

Objective, methodology and interdisciplinary approach | The Botanical Concrete research project aims to investigate a fundamentally new approach to wall-based vertical greening to allow the permanent establishment of vegetation on concrete surfaces. The material and horticultural parameters established through our research will serve as the basis for an all-season, all-weather, fail-safe design for walls and facades, allowing for the non-damaging establishment of mosses and selected tracheophytes on vertical concrete surfaces, and integrating low-tech solutions for irrigation to limit water evaporation.

Botanical Concrete is based on an original hypothesis: permanently installable, structurally performant types of concrete can be modified so that they are capable of actively supporting the targeted establishment and growth of cryptogams and selected tracheophytes on vertical surfaces. It is an innovative and interdisciplinary collaborative project, pooling expertise from the fields of planning,

landscape architecture, design, material science, phytotechnology and phytosociology (through basic research and application engineering for all of the different phases of the building process), to functionalize, through plant cultivation, a material that is proven and established in architecture and industry; a material which, given its versatility and the scarcity of alternatives, will continue to be used for vertical walls and building facades in the future. The addition of bio-receptive functionality to concrete can provide technological, aesthetic, and ecological benefits while also helping to offset the material's high carbon footprint.

Cryptogams and tracheophytes place different demands on their substrates, requiring two different sets of parameters to be able to functionalize concrete for both of these groups: in order to learn how to build an architecturally ambitious, resource-efficient, environmentally effective wall-based vertical greening system, it is therefore necessary to approach this question from divergent perspectives. The collaborative investigation is thus based on two novel approaches, material-engineering

and phytotechnological, both of which examine the fundamental suitability of structural concrete as a substrate for vegetation, as well as its design potential. The material-engineering approach investigates the bio-receptive functionalization of the concrete surface, which is especially well suited to colonization by cryptogams, whereas the phytotechnological approach analyses natural vegetation sites to modify concrete to make it a suitable substrate for tracheophytes.

Method 1: Material-engineering approach and cryptogam colonization | In the cryptogam-oriented approach, the necessary growth substrate is incorporated into the concrete element's surface during the fabrication process, in the form of a mineral aggregate such as lava, pumice, or zeolite (Fig. 1; Polster and Klussmann, 2019); the aim is to create an extremely localized micro-milieu that will enable and encourage the growth of moss, while the mixture of the concrete aggregates with structural function is kept unaltered. The experiments carried out with various methods

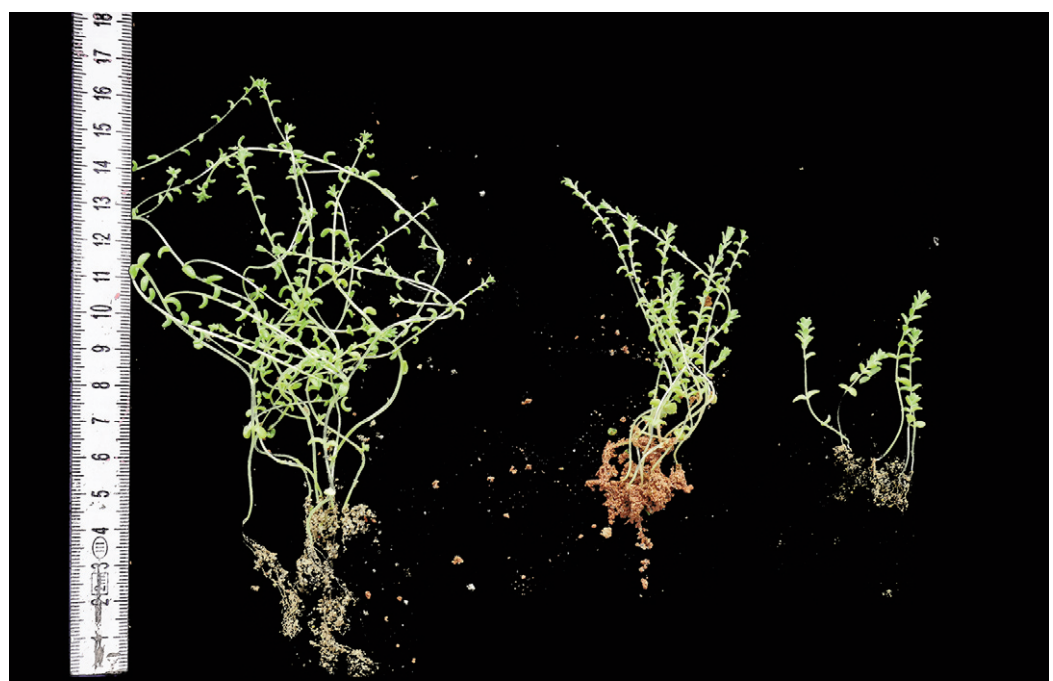
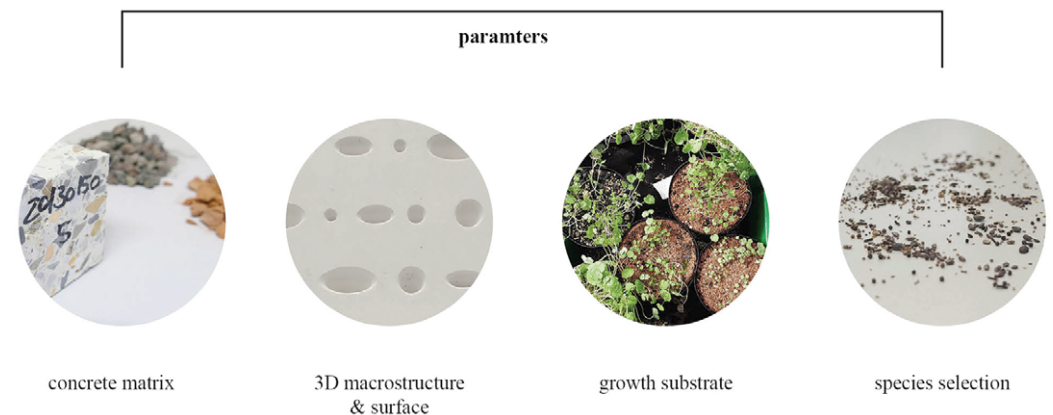


Fig. 9 | Naturally occurring vertical greening in a wide variety of leaf colours, growth habits, leaf shapes, and compactness: 'Cymbalaria muralis', 'Pseudofumaria lutea', and 'Asplenium ruta-muraria' (credit: L. Büscher, 2018).

Fig. 10 | Basic project parameters (credit: L. Büscher, 2022).

Fig. 11 | Variation in size of 'Sedum acre' grown on substrates containing 75 m% pumice, crushed lightweight concrete, and crushed brick (credit: L. Büscher, 2019).

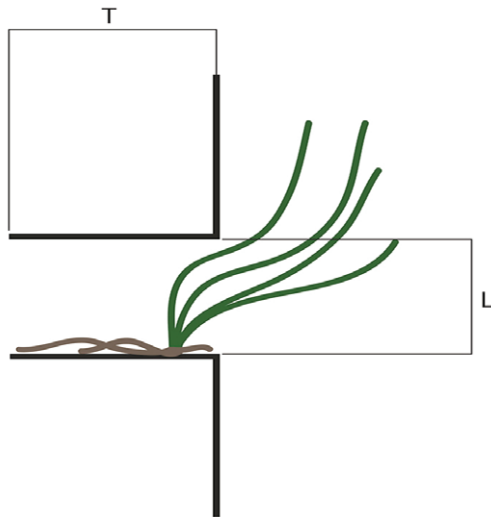


Fig. 12 | Type H1 germination site (copyright: Fachgebiet Landschaftsarchitektur | Technik, 2019).

Fig. 13 | 3D-printed form liner for creating punctiform recesses (credit: L. Büscher, 2021).

Fig. 14 | Successful germination on concrete test piece with linear recesses (credit: L. Büscher, 2022).

of incorporating aggregate material into the concrete surface have made it possible to fine-tune the components involved (form liner, application tape, deactivator, aggregate, formwork, and concrete matrix): Figure 2 shows the procedure for preparing the form liner and arranging the aggregate.

In order to reproduce moss growth sites on concrete surfaces, we began by studying mosses growing on mineral substrates in outdoor locations (Hessen and Bavaria), documenting and analysing their three-dimensional geometry, surface structure, and composition, and then divided the sites into three categories (vertical surfaces, wall joints, and rock crevices), paying particular attention to the angles and dimensions of the sites in adapting the geometries and other technical parameters of naturally occurring growth sites to concrete. It was possible to derive three geometries with a depth of 0-17 mm: a planar geometry related to vertical

surfaces of naturally weathered concrete walls (Fig. 3), a trough geometry based on old, washed-out, eroded joints in brick and stone walls (Fig. 4), and a wedge geometry based on crevices found in rock formations (Fig. 5), caused by weathering and freeze-thaw action. The interaction of the material-specific parameters and the geometry of the growth site was tested using high-strength and ultra-high-strength concrete specimens, initially as panels with dimensions of 100 x 100 mm and 200 x 200 mm and thicknesses of 20-30 mm, developed through form liners and formworks made of polystyrene and latex with planar, web and wedge geometries. The lava and pumice aggregates (2-3 mm and 3-4 mm) were previously cleaned of foreign matter by washing, and then placed on the form liners in the area of the growth sites with adhesive, necessary to fix the aggregates during concrete casting and setting and to produce a dense and homogeneous distribution of the aggregates on the form liners, then inserted into the formwork and covered with wet concrete matrix (Fig. 6).

The characteristics of the aggregate, and, above all, the quality, granulometry, and the composition of the material are particularly important for the function of the monolayer, on par with the optimal embedding depth, both to ensure that the aggregate is securely anchored in the concrete and to provide a suitably 'sticky' surface for moss to attach to. The tests conducted onto planar, trough and wedge geometries showed that the procedure illustrated above worked well as a method of producing a homogenous aggregate monolayer on the surface of the concrete (Fig. 7), while the installation of vertically oriented test pieces on selected areas of an exterior facade allowed for the observation of the colonization and growth of moss, demonstrating the combined effectiveness of the aggregate monolayer and the three-dimensional micro-structuring of the concrete surface (Fig. 8).

Method 2: Phytotechnology and tracheophyte establishment

The analysis of naturally occurring structures and plant species on vertical concrete surfaces such as rocks and walls represents the starting point to create the proper conditions for the establishment of tracheophytes on concrete, where cracks, crevices, joints, and ledges provide places to germinate and grow. The method described below is based on a phytosociological examination of these plant-growth sites and plant communities. The aim was to gain a fundamental understanding of the nature of germination and growth sites on vertical structures and the make-up of the plant communities involved, translating the findings into technically quantifiable parameters to be evaluated through the use of test pieces.

Rock-based and wall-based vegetation is typically found growing in shallow substrate layers on rock faces and rocklike materials with limited water supplies; germination and growth occur in isolated locations, and growth tends to be sparse. To obtain generalizable measurements of germination and growth sites, we developed a procedure for classifying the results of our analysis according to four basic material parameters: concrete matrix, 3D macrostructure, surface, and growth substrate. These parameters make it possible to manage, in aesthetic and design terms, the number of germination and growth sites and the vegetation density (Fig. 9).

Since the variety of plant species found on walls differs widely and reflects the local environment, depending on the propagules present there (Brandes, 2013; Gausmann and Rosin, 2014), the photographic survey analysis made it possible to identify cosmopolitan, cultigen, ruderal and grassland plants as the most important wall-colonizing species (Brandes and Brandes, 2010) and to compile a list comprising a broad spectrum of annuals and biennials, able to produce more blooms in the first two years. Furthermore, the mix of evergreens, flowering plants, and grasses, in combination with the wall surface, makes for a wide range of design options in terms of colour, size, texture, and structure (Büscher, 2018), with particular focus, however, on important criteria for species selection, such as comparable cultivation, vernalization and stratification conditions, time to maturity, and wall-damaging potential (generally higher in woody plants).

Based on the analysis of secondary data and photographs of naturally occurring vertical vegetation, we adopted a novel approach that treats the concrete as a C horizon (i.e., rock; Polster et alii, 2020) and tries to replicate the A-C horizon sequence of virgin soil. For our selected vascular plants, the C horizon is supplemented by an additional fine-grained, non-cement-bound substrate that was developed specifically for this project and is based on the naturally occurring A horizon found on rock substrates and wall joints (Fig. 10). In the proposed model, the concrete is intended to function as an artificial rock face, storing water and providing anchorage for plant roots. With this in mind, we conducted comparative tests of different concrete types and manufacturing methods: 'non-fine' concrete has a low load-bearing capacity and increased potential for damage, especially due to woody roots; rammed concrete (poured into the formwork in layers of approximately 15-25 cm first covered with a mixture of gravel-lava-stone-clay and then compacted, according to a method tested by the authors) in which the substrate is enclosed in a 'nest' of 'reinforced concrete is an aesthetically compelling option but comparatively expensive to produce, and its stiff consistency limits the forms it can take; UHPC has no water-storage capacity due to its extreme density.

Since, according to the exposure classes laid out in the German concrete standard (DIN EN 206-1/DIN 1045-2), it is possible to manufacture normal concrete with a w/c ratio greater than 0.4 which is both vapour-permeable and freeze-thaw resistant, we developed and tested concrete receptacles made with various aggregate mixes, and featuring varying water absorption levels: sand and gravel; sand, gravel, and pumice; sand, gravel, and crushed lightweight concrete; and sand, gravel, and crushed brick. This approach was chosen for further research.

We then conducted comparative germination tests to assess the compatibility of plants with pumice, crushed brick, and crushed lightweight concrete, under consideration as very fine aggregates (0-2 and 0-3 mm), both for plant-friendly concrete and as growth substrates for the previously selected plant species. We found that all three materials displayed basic suitability and similar vitality for the establishment of vegetation, although it was possible to note differences in rooting depth and shoot growth with the pumice as

compared to the recycled materials, which were instead able to produce uniformly small, resilient structures in targeted locations (Fig. 11).

On walls and in rock crevices, the substrate is shielded from direct insolation and accompanying evaporative water loss by the stone as well as the plant itself, a natural protection which also represents an important goal for the project. Therefore, while photographing plants growing on walls in Kassel, we also measured the widths and heights of the recesses found at germination sites (generally small, without a lip above or below; Figg. 12, 13), performed statistical comparisons, and classified them by type in order to then translate them into structural parameters. Since it was not possible to compare the volumes of the recesses, a series of trials were conducted with concrete test pieces featuring different-sized recesses, fabricated using permanent formwork behind the concrete, plus reusable elastic form liners to replicate the aesthetic variety of vegetation in both punctiform and linear recesses (Fig. 14).

Acknowledgements

The contribution is the result of a common reflection of the Authors. However, the paragraph 'Method 1: Material-engineering approach to cryptogam colonization' paragraph should be attributed to R. Polster, the paragraph 'Method 2: Phytotechnological approach to tracheophyte establishment' to L. Büscher.

References

- Brandes, D. (2013), "Mauern als Lebensraum für Pflanzen", in Siegesmund, S. and Sneath, R. (eds), *Naturstein in der Kulturlandschaft*, Mitteldeutscher Verlag, Halle (Saale), pp. 96-106. [Online] Available at: doi.org/10.24355/dbbs.084-201309121035-0 [Accessed 22 March 2022].
- Brandes, S. and Brandes, D. (2010), *Mauerflora in Dörfern des nördlichen Harzvorlandes (Sachsen-Anhalt) | Wall flora of villages in the northern foreland of the Harz mountains (Sachsen-Anhalt)*, Institut für Pflanzenbiologie, pp. 1-14. [Online] Available at: digibib.tu-bs.de/?docid=00032636 [Accessed 22 March 2022].
- Büscher, L. (2018), "Beton als vertikaler Lebensraum für Pflanzen – Vom gestalterischen Potenzial des Werkstoffs", in *Stadt und Grün | Das Gartenamt*, issue 05, pp. 45-50.
- Deilami, K., Kamruzzaman, M. and Liu, Y. (2018), "Urban heat island effect – A systematic review of spatio-temporal factors, data, methods, and mitigation measures", in *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, vol. 67, pp. 30-42. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.jag.2017.12.009 [Accessed 22 March 2022].
- Eppel, J. (2018), "Grüne Klimafassade – Utopie und Wirklichkeit", *Neue Landschaft*, issue 11, pp. 31-36.
- FLL – Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau (2018), *Fassadenbegrünungsrichtlinien – Richtlinien für Planung, Bau und Instandhaltung von Fassadenbegrünungen*, FLL, Bonn.
- Gausmann, P. and Rosin, R. (2014), "Flora und Vegetation der Mauern in den Stadtgebieten von Herne, Bochum, Hattingen und Witten (Ruhrgebiet, Nordrhein-Westfalen) unter besonderer Berücksichtigung der Farnpflanzen", in *Veröffentlichungen des Bochumer Botanischen Vereins*, vol. 6, issue 3, pp. 13-33. [Online] Available at: botanik-bochum.de/publ/OVBBV6_3_Gausmann_

Conclusions | The Botanical Concrete research has shown that functional structural concrete can support the establishment and the growth of both cryptogams and tracheophytes, made possible by the two adopted methodological approaches; however, in the long term, the effects generated by the various environmental factors on vegetation and the consistency and integrity of materials remain to be seen. Through the controlled incorporation of aggregates into the surface of the concrete, in conjunction with the construction of a three-dimensional microrelief, it was possible to create a bio-receptive surface for the establishment and cultivation of mosses, whereas by adding a secondary substrate made of recycled materials and with a specifically defined geometry to vapour-permeable concrete test pieces, we were able to create germination and growth sites for tracheophytes.

On the level of methodology, the interdisciplinary approach proved to be fundamental: the identification of shared objectives and priorities, together with the choice to collectively work out-

side traditional disciplinary combinations, has generated a new methodological, creative, scientific, and practice-oriented perspective on this field of research. The findings from our two approaches have raised follow-up questions for further research into expanding the water supply, varying the material form, refining the formwork, developing structural classifications, and gathering more detailed information on vegetation sites. A more in-depth comparison between the requirements of cryptogams and tracheophytes shall then be necessary, to correlate the findings and better identify specific synergies and divergences of the two approaches, also with the involvement of a meteorology expert to evaluate the microclimatic effects and the amount of CO₂ that can be absorbed by a vertical green envelope, in hope of improving local microclimates and architectural quality, make better use of impermeable surfaces, increase urban biodiversity, and create new biotopes.

Rosin_Mauern.pdf [Accessed 22 March 2022].

Magistrat der Stadt Wien (2019), *Fassaden & Vertikalbegrünung – Internationale & nationale Best-Practice-Beispiele*. [Online] Available at: wien.gv.at/stadtentwicklung/studien/pdf/e000037.pdf [Accessed 22 March 2022].

Manso Blanco, S. (2014), *Bioreceptivity optimisation of concrete substratum to stimulate biological colonisation*, PhD thesis, Universitat Politècnica de Catalunya. [Online] Available at: researchgate.net/publication/262938554_Bioreceptivity_Optimisation_of_Concrete_Substratum_to_Stimulate_Biological_Colonisation [Accessed 22 March 2022].

Manso, M., Teotónio, I., Silva, C. M. and Cruz, C. O. (2021), "Green roof and green wall benefits and costs – A review of the quantitative evidence", in *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 135, pp. 110-111. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.rser.2020.110111 [Accessed 22 March 2022].

McDonald, R. I. et alii, (2020), "Research gaps in knowledge of the impact of urban growth on biodiversity", in *Nature Sustainability*, vol. 3, issue 1, pp. 16-24. [Online] Available at: doi.org/10.1038/s41893-019-0436-6 [Accessed 22 March 2022].

Ottel, M. (2011), *The green building envelope – Vertical greening*, PhD thesis, Technische Universiteit Delft. [Online] Available at: repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid:1e38e393-ca5c-45af-a4fe-31496195b88d [Accessed 22 March 2022].

Polster, R., Büscher, L., Riehl, W. and Klussmann, H. (2020), "Botanical concrete – Novel composites for urban greening", in Leopold, C., Robeller, C. and Weber, U. (eds), *Research culture in architecture – Cross-disciplinary collaboration*, Birkhäuser, Basel, pp. 265-274. [Online] Available at: doi.org/10.1515/9783035620238 [Accessed 22 March 2022].

Polster, R. and Klussmann, H. (2019), "Moos auf Beton – BryoCrete", in *Beton Bauteile 2020 – Entwerfen Planen Ausführen*, Bauverlag, Gütersloh, pp. 196-202.

Respyre (n.d.), "Technology", in *gorespyre.com*. [Online] Available at: gorespyre.com/our-technology/ [Accessed 22 March 2022].

Riley, B. (2017), "The state of the art of living walls – Lessons learned", in *Building and Environment*, vol. 114, pp. 219-232. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.12.016 [Accessed 22 March 2022].

Riley, B., de Larrard, F., Malécot, V., Dubois-Brugger, I., Lequay, H. and Lecomte, G. (2019), "Living concrete

– Democratizing living walls", in *Science of the Total Environment*, vol. 673, pp. 281-295. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.04.065 [Accessed 22 March 2022].

Statistisches Bundesamt (2016), "Indikator Flächenanspruchnahme – Anstieg der Siedlungs- und Verkehrsfläche", in *Land- und Forstwirtschaft, Fischerei – Bodenfläche nach Art der tatsächlichen Nutzung*, Fachserie 3 Reihe 5.1, Statistisches Bundesamt, Wiesbaden. [Online] Available at: statistischebibliothek.de/mir/servlets/MCRFileNodeServlet/DEHeft_derivate_00029318/2030510157004.pdf [Accessed 22 March 2022].

Takano, T., Nakamura, K. and Watanabe, M. (2002), "Urban residential environments and senior citizens' longevity in megacity areas – The importance of walkable green spaces", in *Journal of Epidemiology Community Health*, vol. 56, pp. 913-918. [Online] Available at: doi.org/10.1136/jech.56.12.913 [Accessed 22 March 2022].

UCL (n.d.), "Building greener cities with poikilohydric living walls", in *ucl.ac.uk*. [Online] Available at: ucl.ac.uk/bartlett/architecture/about-us/innovation-enterprise/building-greener-cities-poikilohydric-living-walls [Accessed 22 March 2022].

Veeger, M., Ottel, M. and Prieto, A. (2021), "Making bioreceptive concrete – Formulation and testing of bioreceptive concrete mixtures", in *Journal of Building Engineering*, vol. 44, art. 102545, pp. 1-20. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.job.2021.102545 [Accessed 22 March 2022].

Veeger, M., Prieto, A. and Ottel, M. (2021), "Exploring the possibility of using bioreceptive concrete in building façades", in *Journal of Facade Design and Engineering*, vol. 9, issue 1, pp. 73-86. [Online] Available at: doi.org/10.7480/jfde.2021.1.5527 [Accessed 22 March 2022].

Wong, N. H., Tan, C. L., Kolokotsa, D. D. and Takebayashi, H. (2021), "Greenery as a mitigation and adaptation strategy to urban heat", in *Nature Reviews Earth & Environment*, vol. 2, issue 3, pp. 166-181. [Online] Available at: nature.com/articles/s43017-020-00129-5?proof=t%29 [Accessed 22 March 2022].

Ysebaert, T., Koch, K., Samson, R. and Denys, S. (2021), "Green walls for mitigating urban particulate matter pollution – A review", in *Urban Forestry & Urban Greening*, vol. 59, art. 127014, pp. 1-13. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.ufug.2021.127014 [Accessed 22 March 2022].