



Zwischenbericht vom 22.07.2022

Einfluss von Begrünung der Gebäudehülle auf die Energiebilanz und den thermischen Komfort von Gebäuden und Areale

IVECT – Impact de la végétalisation sur le bilan énergétique et le confort thermique des bâtiments et quartiers



Quelle: Evelyn Trachsel, Stadtgärtnerei Zürich



Datum: 22.07.2022

Ort: Sitten

Subventionsgeberin:

Bundesamt für Energie BFE
Sektion Energieforschung und Cleantech
CH-3003 Bern
www.bfe.admin.ch

Ko-Finanzierung:

HES-SO Valais/Wallis / Institut Energie und Umwelt
Rue de l'Industrie 23, CH-1950 Sitten
www.hevs.ch

Subventionsempfänger/innen:

HES-SO Valais/Wallis / Institut Energie und Umwelt
Rue de l'Industrie 23, CH-1950 Sitten
www.hevs.ch

ZHAW Zürich / Institut für Umwelt und Natürliche Ressourcen
Grüntalstrasse 14, CH-8820 Wädenswil
www.zhaw.ch

CREM
Rue Marconi 19, CH-1920 Martigny
www.crem.ch

Autor/in:

Klaus Kreher, HES-SO Valais/Wallis, klaus.kreher@hevs.ch
Baljeet Kaur Taak, HES-SO Valais/Wallis, baljeet.taak@hevs.ch
Evelyn Trachsel, ZHAW, trae@zhaw.ch
Jakob Rager, CREM, jakob.rager@crem.ch

BFE-Projektbegleitung:

Nadège Vetterli, nadege.vetterli@anex.ch

BFE-Vertragsnummer SI 502160-01 IVECT:

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren dieses Berichts verantwortlich.



Zusammenfassung

Begrünte Gebäudehüllen sind Low-Tech-Massnahmen, die einen positiven Einfluss auf die Energiebilanz von Gebäuden haben. Neben akustischen Verbesserungen und Luftqualitätsanstieg (im Areal) sind Energieeinsparungspotentiale (Gebäude und Areal) nachgewiesen. Ziel dieses Projekts ist es den Einfluss von Begrünungen auf die Energieeffizienz von Gebäuden und Arealen zu quantifizieren und zur Berechnung von Energiebilanzen in Simulationstools zu integrieren. Der Fokus wird hierbei auf die Parameter Oberflächentemperaturen und Umgebungstemperaturen der begrünten Gebäudehüllen gesetzt, da diese Parameter durch die spezifischen Pflanzenoberflächen, Abstrahlungs- und Absorptionsverhalten, sowie die Verdunstungsleistung der Pflanzen stark beeinflusst werden. Umsetzungshindernisse sollen identifiziert und Begleitmassnahmen zur Umsetzung definiert werden.

Résumé

Les enveloppes de bâtiment végétalisées sont des mesures low-tech qui ont un impact positif sur le bilan énergétique des bâtiments. Outre les améliorations acoustiques et de la qualité de l'air (quartiers), des potentiels d'économie d'énergie (bâtiments et quartiers) ont été démontrés. L'objectif de ce projet est de quantifier l'influence de la végétalisation sur l'efficacité énergétique des bâtiments et des quartiers et de l'intégrer dans des outils de simulation pour le calcul des bilans énergétiques. L'accent est mis sur les paramètres de températures de surface et températures ambiantes des enveloppes végétalisées des bâtiments car ces paramètres sont fortement influencés par les surfaces spécifiques des plantes, l'intensité du rayonnement, le taux d'absorption ainsi que par la capacité d'évaporation des plantes. Les obstacles à la mise en œuvre doivent être identifiés et des mesures d'encouragement définies.

Summary

Green building envelopes are low-tech measures that have a positive influence on the energy balance of buildings. In addition to acoustic improvements and an increase in air quality (districts), energy saving potentials (building and districts) have been proven. The aim of this project is to quantify the influence of greenery on the energy efficiency of buildings and areas and to integrate it into simulation tools for the calculation of energy balances. The focus here is on the parameters surface temperatures and ambient temperatures of the green building envelopes, since these parameters are strongly influenced by the specific plant surfaces, radiation and absorption behavior, and the evaporation performance of the plants. Obstacles to implementation will be identified and accompanying measures for implementation will be defined.



Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	3
Résumé	3
Summary	3
Inhaltsverzeichnis	4
1 Einleitung	5
1.1 Ausgangslage und Hintergrund	5
1.2 Motivation des Projektes	5
1.3 Projektziele	6
2 Vorgehen und Methode	7
2.1 Übersicht der Workpackages	7
2.2 Methode und Forschungsfragen.....	7
2.3 Beschreibung der Simulationstools	10
3 Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse	12
3.1 WP0 – Projektleitung	12
3.2 WP1 – Zusammenführung bestehender Daten.....	12
3.3 WP2 – Pflanzenkatalog zu den typisierten Quartieren und den Begrünungstypen für Fassaden	16
3.4 WP3 – Messung der Verdunstungsleistung von Kletterpflanzen bei bodengebundenen oder linearen sowie bei fassadengebundenen Systemen	21
3.5 WP4- Messung der Oberflächentemperatur von verschiedenen Begrünungstypen sowie Messung der gefühlten Kühlleistung (PET) von Fassadenbegrünungen in Trogbepflanzungen, lineare Systeme	24
3.6 WP5 – Implementierung Indikatoren und Simulationsmethodik.....	28
3.7 WP6 – Fallstudien Gebäudesimulation	30
3.8 WP7 bis WP10.....	32
4 Bewertung der bisherigen Ergebnisse	33
5 Weiteres Vorgehen	33
6 Nationale und internationale Zusammenarbeit	33
7 Publikationen	33
8 Literaturverzeichnis	34



1 Einleitung

1.1 Ausgangslage und Hintergrund

Weltweit wird über die Auswirkungen von Begrünungen und begrünte Gebäudehüllen geforscht. Neben akustischen Verbesserungen und Luftqualitätsanstieg (im Areal) sind Komfortgewinne und Energieeinsparungspotentiale (Gebäude und Areal) nachgewiesen.

Ziel dieses Projekts ist es den Einfluss von Begrünungen auf die Energieeffizienz von Gebäuden und Arealen zu quantifizieren. Zum einen regulieren die Pflanzen ihre Temperatur durch Evapotranspiration. Dies sorgt für eine Luftabkühlung rund um die Blätter und das Substrat. Dieses Phänomen kann genutzt werden, um den Kühlbedarf mittels Klimaanlage zu reduzieren. Die Verschattung, die durch die Begrünung gewährleistet wird, gibt ihren Teil dazu. Zum anderen stellt das Substrat eine zusätzliche Schicht dar, die auf die Speicherkapazität des Gebäudes Einfluss hat sowie auf den äusseren Oberflächenwiderstand. Heiz- und Kühlungsbedarf werden dadurch verändert.

Verschiedene Parameter wurden in den bestehenden Studien untersucht wie Oberflächentemperatur (Djedjig,2013; Pérez et al., 2011; Karima & Saliha, 2010; Hui, 2009), Temperatur der Luftschicht zwischen Vegetation und bauliche Substanz (Djedjig,2013; Pérez et al., 2011), Energiebilanz (Djedjig,2013; Jacquet, 2010; Hui, 2009), Innentemperaturen (Karima & Saliha, 2010), Lebensdauer der Abdichtungsmembrane (Jacquet, 2010) usw. Dabei wurde entweder eine Fassadenbegrünung oder eine Dachbegrünung unter die Lupe genommen. Da die meisten Studien experimentale Messwerte auswerten, sind die klimatischen Bedingungen miteinzubeziehen.

Eine detailliertere Literaturübersicht ist unter dem Punkt 3.2 (WP1) enthalten. Die Messwerte und Daten dieser Forschungen können je nach Klimaregion und Genauigkeit als Vergleichswerte dienen.

1.2 Motivation des Projektes

In Abgrenzung zu anderen national und international laufenden Projekten, zielt das hier formulierte Projekt vor allem auf die Anwendung und Realisierung von Begrünungsmassnahmen, um mittels LOW- oder NO-Tech-Massnahmen einen Mehrwert zu generieren und den Energieverbrauch von Gebäuden und Arealen deutlich zu senken. Mit NO-Tech werden überwiegend die Pflanzen definiert und mit LOW-Tech, die Tatsache, dass die Baukonstruktion den Energieverbrauch beeinflusst und die Gebäudetechnik dabei simpel gehalten wird (Bewässerung). Mit Hilfe eines multidisziplinären Projektteams und einem multidisziplinären Lösungsansatzes sollen zum einen die technischen Auswirkungen quantifiziert werden, um diese dann in die Simulationsmethodik implementieren zu können. Zum anderen sind aber die typologischen, sozialen und reglementarischen Regeln Grundlage für ein Verständnis der Bedürfnisse und somit der sozialen und rechtlichen Akzeptanz der Massnahmen. Wird dies multidisziplinär klassifiziert und aufgezeigt, ergeben sich die massgeblichen Handlungsszenarien, die für die Umsetzung und die effiziente Anwendung dieser Energieeinsparungsmassnahmen notwendig sind. Diese sollen am Ende des Projekts für eine breite Anwendung von einzelnen Begrünungsmassnahmen bis hin zu vollbegrüntem Gebäudehüllen führen, die nachhaltig und robust weitreichende Verbesserungen der Energieeffizienz von Gebäuden und Arealen bringen.



1.3 Projektziele

1. Die Auswirkung von Begrünungen und begrünten Gebäudehüllen zur Steigerung der Energieeffizienz von Gebäuden (Schwerpunkt Sanierung) aufzeigen.
 - a. Bestehende Messstrecken (Messprofile) mit dem Ziel der Typisierung von Gebäuden auswerten und eigene Messstrecken an Referenzgebäuden bestätigen und absichern.
 - b. Bestehende Berechnungsansätze zur Bestimmung der Jahresenergiebilanz mit spezifischen Aspekten der Begrünungsmassnahmen ergänzen und auswerten.
 - c. Klassifizierung und Typisierung von Begrünungsmassnahmen an Gebäuden.
 - d. Auswirkungen auf Sanierungs-, Gebäude- und Arealplanungen hinsichtlich möglicher Energieeinsparungen quantifizieren und aufzeigen.
2. Die Auswirkungen von Begrünungen und begrünten Gebäudehüllen zur Steigerung der Energieeffizienz von Arealen aufzeigen mit dem Fokus auf Areale, die durch reglementarische Beschränkungen hinsichtlich technischer Installationen betroffen sind.
 - a. Bestehende Berechnungsansätze zur Bestimmung der Jahresenergiebilanz für die Arealplanung ergänzen. Dabei sollen mittels CitySim zusätzliche Einflussparameter berücksichtigt werden, die sich mit der näheren Umgebung eines Gebäudes befassen wie die Interreflektion zwischen mehreren Gebäuden oder der Windprofil, der durch die verschiedenen Hindernisse (Bäume, Gebäude, usw.) beeinflusst wird. Der Inseleffekt steht dabei im Mittelpunkt. Diese Aspekte sind mit klassischen Berechnungen des Energiebedarfs auf Gebäudeebene nicht zu ermitteln.
 - b. Messstrecken, die von der Stadt Zürich beauftragt und ausgewertet wurden integrieren und hinsichtlich der Relevanz für Areale simulieren und auswerten.
3. Klimatische und ortsbezogene Veränderungen und Besonderheiten (Auswirkung des Klimawandels, allgemeine klimatische Bedingungen) zur klassifizieren und typisieren, um arealspezifische Aspekte für eine Energieeffizienzsteigerung berücksichtigen zu können.
4. Analyse der Biodiversität von möglichen Bepflanzungen und begrünten Gebäudehüllen mit dem Ziel die positive Wirkung der Begrünung zu erhöhen und ein bauliches Schadenspotential zu minimieren.
 - a. Vergleich von Wachstums- und Verdunstungseigenschaften von Pflanzen, und bestmögliche Begrünungs- und Bepflanzungsmassnahmen zu bestimmen und zu klassifizieren.
 - b. Bereits erfolgte Messungen der ZHAW und der Stadt Zürich integrieren und auswerten.
 - c. Saffflussmessungen und Verdunstungsleistungsmessungen an diversen Pflanzen durchführen.
 - d. Thermographiemessungen an Gebäuden
5. Studie und Bewertung von sozialen, wirtschaftlichen und rechtlichen Einflussfaktoren, welche die Anwendung von Begrünungen und begrünten Gebäudehüllen als Installation zur Steigerung der Energieeffizienz von Gebäuden und Arealen beeinflussen. Ziel ist, diese Faktoren als Entscheidungshilfe klassifizieren und beurteilen zu können und für eine Förderung von Begrünungsmassnahmen zu nutzen.



2 Vorgehen und Methode

2.1 Übersicht der Workpackages

Das Vorgehen, das in diesem Projekt angewandt wird, beruht auf zwei wesentliche Aspekte: Simulationen und Messungen an Begrünungsmassnahmen, um die Simulationen zu validieren und zu verfeinern.

Das Projekt ist in zehn WPs aufgeteilt. Die Details zu den WPs befinden sich im Anhang 1.

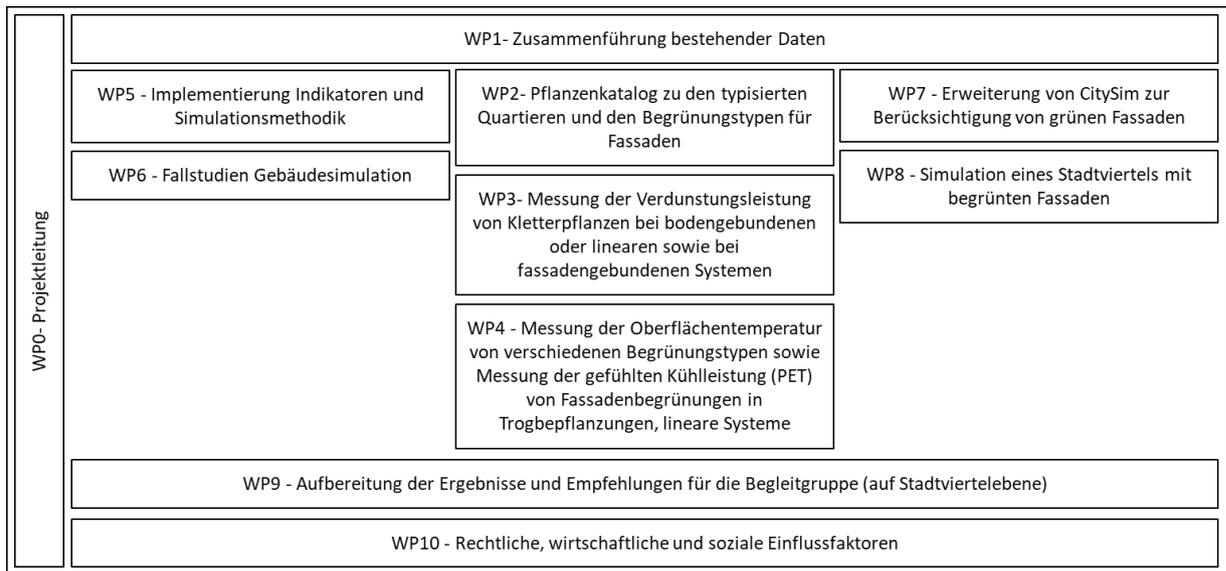


Abbildung 1: Übersicht der Workpackages

2.2 Methode und Forschungsfragen

Im WP1 wird eine Bestandsaufnahme durchgeführt. Ziel ist es bestehende Daten zu sichten und aufzuarbeiten. Dabei werden sowohl Resultate aus verschiedenen Arbeiten der Projektpartnern ausgewertet wie auch aus einer Literaturübersicht. Es geht darum zu ermitteln was schon gemacht wurde, unter welchen Bedingungen, mit welchen Daten und mit welchen Resultaten. Dies soll uns helfen die nötigen Inputparameter für die Simulationen von Begrünung auf Gebäude- und Arealebene zu bestimmen bzw. zu verfeinern. Darüber hinaus dienen diese externen Daten als Vergleichswerte.

Gleichzeitig werden die nötigen Messstrecken definiert (Safflussmessungen, Temperaturverläufe usw.) basierend auf die nötigen Inputparameter.

Referenzgebäude und Areale müssen zudem definiert werden auf denen die Simulationen durchgeführt werden sollen. Einerseits werden Gebäude/Areale simuliert, auf denen die Messstrecken gemacht werden (um die Simulationen mit den Messungen zu kalibrieren), andererseits werden die Simulationen auf andere Referenzgebäude und Areale erweitert (andere Gebäudetypen, massive vs. leichte Baukonstruktion, Neu- oder Altbauten, usw.) um den Einfluss der Begrünung auf die Energiebilanz zu ermitteln.



Die WPs 2-4 fokussieren auf die Pflanzenauswahl und die Messstrecken.

WP2 befasst sich mit der Frage: Welche standortgerechte, langlebige Bepflanzung erbringt, durch einen hohen Deckungsgrad, den gewünschten Klimaeffekt?

Dabei werden verschiedene Begrünungstypen ausgesucht (fassadengebundene oder bodengebundene Begrünung, usw.) sowie verschiedene Pflanzenarten. Diese werden in einem ersten Schritt nach unterschiedlichen Kriterien ermittelt wie allgemeine Anwendung, Herkunft oder physiologische Eigenschaften der Pflanzen usw. Die Wahl der Begrünungsart und Pflanzenart hängt auch davon ab, was an welchen Standort existiert. Die Messungen müssen an bestehenden begrünten Gebäudehüllen gemacht werden, da die Begrünung mehr oder weniger ausgeprägt sein soll (nicht in der ersten Wachstumsphase). Anfangs werden deshalb auch nur Fassadenbegrünungen untersucht. Dachbegrünungen werden je nach Möglichkeit dazukommen. Ein Pflanzenkatalog wird dazu erstellt.

In WP3 rückt die Kühlleistung von Pflanzen im Vordergrund. Ist die Kühlleistung durch Verdunstung einzelner Kletterpflanzen, verschiedener Pflanzenarten und Begrünungsmassnahmen quantitativ signifikant?

Dafür werden Saftflussmessungen mittels Lysimeter an einzelnen Kletterpflanzen und an gesamte Fassadenbegrünungen durchgeführt. Dies ermöglicht es die Verdunstungsleistung einer Pflanzenart bzw. einer Fassadenbegrünung zu ermitteln, Vergleiche zwischen verschiedene Arten von Kletterpflanzen zu erstellen und die Kühlleistung zu evaluieren. Dieselben oder ähnliche Datenaufnahmen werden an Fassadengebundenen Systemen erhoben (modulare und flächige Bauweise).

Darüber hinaus soll eine Antwort auf folgende Frage gefunden werden: Welchen quantitativen Einfluss hat die Kühlleistung durch Verdunstung sowie die entstandene Verschattung auf die Temperatur zwischen der Begrünung und der baulichen Substanz, die Oberflächentemperatur einer Fassade sowie das Innenklima? In WP4 wird dafür die Oberflächentemperatur von Fassadenbegrünungen mittels Wärmebildkamera ermittelt, um auch einen bildnerischen Überblick über die Kühlleistung zu erhalten. Zudem wird die Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit, Windgeschwindigkeit und mittlere Strahlungswärme (PET-Messungen) kontinuierlich erhoben, um die Kühlleistung hinter der Begrünung aufzuzeigen.

Diese Messungen dienen dazu die Simulationen zu verfeinern bzw. zu kalibrieren da sie einige der Inputparameter der Simulationen darstellen.

In WP 5, das gleichzeitig zu den WPs 2-4 durchgeführt werden kann, geht es darum das für das Projekt verwendete Simulationstool (auf Gebäudeebene) zu erweitern damit es die Aspekte der Begrünung miteinbezieht.

Die Fragestellung lautet: Inwiefern können die Inputparameter einer Begrünung im Simulationstool bSol implementiert werden, welche Simulationsmethodik sollte festgelegt werden, um eine Begrünung auf Gebäudeebene am treuesten wiederzugeben und welche Indikatoren sind am besten geeignet, um die Resultate der Simulationen zu veranschaulichen?

Bei bSol handelt es sich um einen klassischen Simulationstool, das einen Energiebedarf berechnet. Das heisst es werden U-Werte, Flächen, Energiebezugsfläche (EBF), Verschattungsfaktoren usw. eines Gebäudes eingetragen, um einen Wärme- bzw. Kältebedarf zu berechnen (nach SIA380/1 oder auch nicht). Das Tool beinhaltet keine Parameter, die es direkt ermöglichen den Einfluss einer Begrünung miteinzuberechnen. Das erste Ziel dieses WPs ist hiermit eine Methodik festzulegen, die es ermöglicht die Begrünungsparameter wie Kühlleistung (Verdunstungsleistung), Entwicklung der Oberflächentemperatur und der Verschattung der Fassaden, usw. in den Computersimulationsprogramm bSol zu integrieren.



Dabei stellt sich zum Beispiel heraus, dass die Kühlleistung nur mittels einer Berechnung der Verdunstungsleistung möglich ist (zum Beispiel nach Penman-Monteith). Diese Berechnung kann nicht direkt in bSol durchgeführt werden. Sie muss vorab erstellt werden und in bSol einfließen.

Ob und wie ein Parameter der Begrünung in bSol integriert werden kann, kann nur durch Tests im Tool selbst eruiert werden. Falls ein Parameter nicht direkt integriert werden kann (wie die Verdunstungsleistung zum Beispiel) sollen indirekte Wege klar definiert und festgelegt werden. bSol ermöglicht es den Verlauf der Innentemperatur zu ermitteln, die Jahresenergiebilanz sowie die Spitzenlasten bei Kälte und Wärme.

Zweites Ziel dieses WPs ist zu eruieren, ob zusätzliche Indikatoren nötig sind, um die Gebäudesimulationen in Hinblick auf die Jahresenergiebilanz miteinander zu vergleichen oder um die darauffolgende Arealimulationen mittels CitySim zu vervollständigen. Um dies zu beurteilen, werden die nötigen Input- und Outputparameter der zwei Simulationstool verglichen und falls nötig erweitert.

WP6 befasst sich mit den Fragen: Welchen quantitativen Einfluss haben die Begrünungsmassnahmen auf die Jahresenergiebilanz eines Gebäudes? Können die Begrünungsmassnahmen nach Effizienz klassifiziert werden und falls ja, welche Begrünungsmassnahmen weisen bei welchen Gebäudetypen eine höhere Effizienz auf?

In diesem WP werden Gebäudesimulationen an den definierten Referenzgebäuden durchgeführt. Diese beruhen auf der festgelegten Methodik und den gewählten Input- und Outputparameter (WP1).

An jedem Gebäudetyp werden Simulationen mit und ohne Begrünung durchgeführt, um den Einfluss der Begrünung zu berechnen. Die Inputparameter, die für die Begrünung relevant sind, können und sollen mittels der Messungen (WP2-4) verfeinert werden (Kühlleistung oder Verschattung einer bestimmten Pflanzenart bei einer bestimmten Begrünungsart usw.). Nachdem alle Simulationen durchgeführt wurden, können die Begrünungsmassnahmen nach deren Effizienz an verschiedene Gebäudearten klassifiziert und typisiert werden, dies ist das eigentliche Ziel des WPs 6.

Wie bei WP5 für die Gebäudeebene, geht es in WP7 darum die Erweiterung des Simulationstools CitySim für die Integration der Aspekte der Begrünung auf Arealenebene in Angriff zu nehmen. Inwiefern können die Inputparameter einer Begrünung im Simulationstool CitySim implementiert werden, welche Simulationsmethodik sollte festgelegt werden, um eine Begrünung auf Arealenebene am treuesten wiederzugeben und welche Indikatoren sind am besten geeignet, um die Resultate der Simulationen zu veranschaulichen? Hier sind zum Beispiel Albedo und Interreflektion zwischen den Oberflächen der näheren Umgebung (begrünt oder nicht begrünt) wichtige Parameter, die neu in CitySim integriert werden müssen. Der Wärmeinseleffekt ist hierbei auch ein wichtiger Parameter.

Nachdem die Aspekte der Begrünung auch in diesem Tool integriert wurden, kann auch auf eine weitere Forschungsfrage geantwortet werden: Welchen Einfluss haben Begrünungsmassnahmen auf die Jahresenergiebilanz eines Areals, das Energieeinsparungspotential sowie den Wärmeinseleffekt? Dafür werden in WP8 Simulationen auf Arealenebene erstellt (Areal ohne begrüntes Gebäude, Areal mit nur einem einzigen begrüntes Gebäude, mit mehreren begrüntes Gebäuden, mit unterschiedlichen Begrünungsmassnahmen auf den verschiedenen Gebäuden usw.). Der Einfluss zwischen den Gebäuden ist hier der Mehrwert.

Die Resultate werden dann zusammengefasst, diskutiert und präsentiert (WP9).

Letztendlich basierend auf den Resultaten, kann auf die letzte Forschungsfrage geantwortet werden: Welche Gründe können gegen und für eine Begrünung bestimmt werden (speziell in Hinsicht auf die Jahresenergiebilanz, Komfort, usw.)? Welche Begleitmassnahmen sind notwendig, um zu einer hohen Akzeptanz von Begrünungsmassnahmen zu führen? Wie können diese Massnahmen in den bestehenden Beurteilungskriterien integriert werden?

Dabei sollten nicht nur energetische Aspekte in Betracht gezogen werden, sondern auch soziale und wirtschaftliche Aspekte.



2.3 Beschreibung der Simulationstools

bSol

bSol ist eine Simulationssoftware für die Energieoptimierung von Gebäuden. Sie beinhaltet mehrere Funktionen und Parameter wie Klimadaten, Verschattungen, Solargewinne, thermo-physikalische bauliche Elemente, stündliche Verwaltung von Betriebsanweisungen (Heizung, Klimatisierung, usw.).

Nebst den Funktionen, die es ermöglichen den thermischen Komfort der Bewohner zu optimieren ist in bSol ein Berechnungsmodell nach SIA380/1 (Heizwärmebedarf) eingefügt sowie eine Darstellung der Überhitzungsgefahr im Sommer nach SIA 382/1.

Um eine Fassadenbegrünung mit Hilfe des Tools zu simulieren, muss auf verschiedene Parameter geachtet werden wie saisonale Verschattung, Oberflächentemperatur, äusserer Oberflächenwiderstand usw.

CitySim

CitySim Solver ist eine Software, die im Labor für Solarenergie und Bauphysik der EPFL von Dr. Jérôme Kämpf entwickelt wurde. Sie soll in den Bereichen Energie und Umwelt eine Entscheidungshilfe bieten, indem sie eine Modellierung von Energiesystemen auf Stadtviertelebene ermöglicht.

Inputs:

Um Simulationen durchzuführen, benötigt CitySim nur eine geringe Anzahl von Informationen wie:

- Stündliche Klimadaten
- Daten über den Umgebungsprofil und Horizontwinkel, aufgenommen vom Zentrum der untersuchten Szene
- 3D-Daten und thermo-physikalische Eigenschaften der Gebäude (Heiz- und Kühlungs-systeme, Eigenschaften von Baumaterialien, usw.) und der Umgebung (Boden, Begrünung, usw.).

Modell:

Das von CitySim verwendete Modell hat die Besonderheit, dass es die stochastische Natur der Anwesenheit und des Verhaltens der Bewohner berücksichtigt.

Darüber hinaus berücksichtigt er auch den Einfluss, den die Umwelt auf ein Gebäude haben kann. Einerseits wird die Bestrahlung einer Oberfläche durch die Interreflexion der Sonnenstrahlung an Flächen beeinflusst, die Teil der näheren Umgebung der genannten Oberfläche sind. Andererseits wird der Einfluss der Verschattung, die diese Oberfläche abgibt auf die Bestrahlung der anderen Flächen berücksichtigt.

In ihrer These hat Dr. Silvia Coccolo CitySim ein Modul hinzugefügt, mit dem das Potenzial der Verdunstungsleistung der Pflanzen sowie die erzeugten Schatten bewertet werden können.

Durch Felduntersuchungen und Software zur Energieanalyse von Gebäuden wie ESP-r konnten die von CitySim vorgeschlagenen Lösungen validiert werden [1]. Darüber hinaus hat es seine Relevanz durch seinen erfolgreichen Einsatz in zahlreichen Projekten wie OSCARS, CCEM-UMEM, CCEM-IDEAS4cities und SolCAD bewiesen.

Um Fassadenbegrünungen miteinzuberechnen, benötigt CitySim ein paar Änderungen wie:

- Anpassung des Bestrahlungsmodells, um die Änderung der Albedo der Vegetationsoberfläche zu berücksichtigen
- Anpassung der thermischen Trägheit des Gebäudes
- Integration der Verdunstungsleistung in das Modell, um die Auswirkungen auf eine Wärmeinsel besser abschätzen zu können

Idealerweise werden die Resultate dieser Simulationen durch Messstrecken validiert.

Output:



CitySim ist in der Lage, den Energiebedarf von Gebäuden zu simulieren.

Es ist auch in der Lage, die Energieressourcen dieser Gebäude aus erneuerbaren Quellen zu bestimmen, einschließlich des durch die städtische Umgebung induzierten Strahlungsaustauschs, der durch eine Reihe von häufig verwendeten Energieumwandlungssystemen erzeugt wird.

Im SolCAD-Projekt wurde mit CitySim die Oberflächenstrahlung bewertet, wie in Abbildung 2 dargestellt.

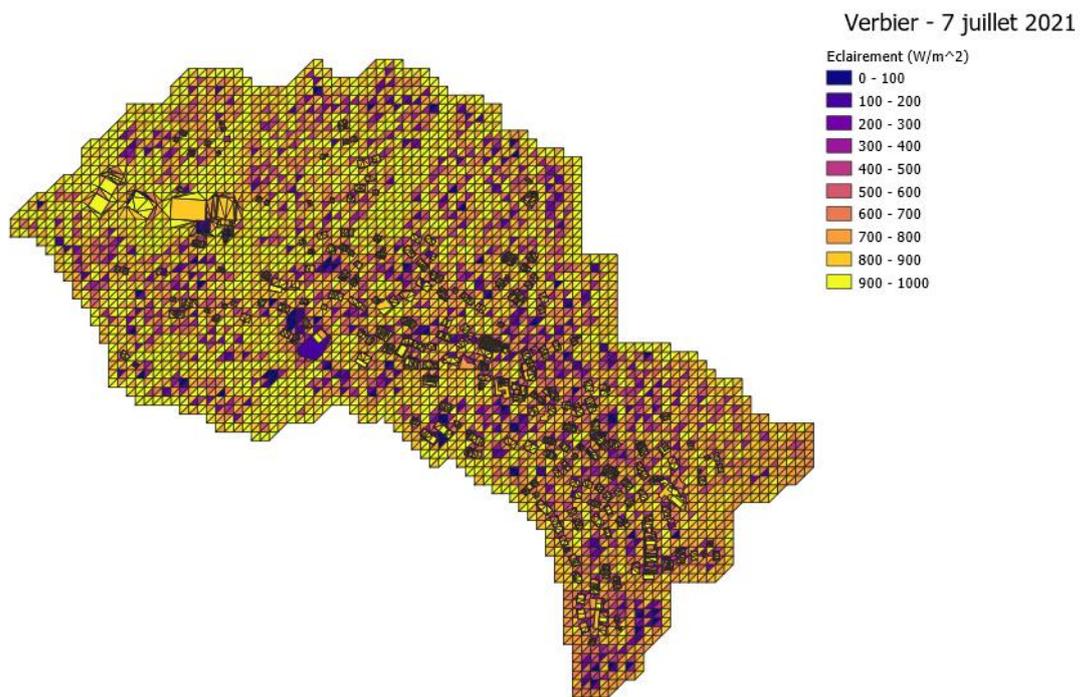


Abbildung 2: Verbier: Sonneneinstrahlung am 6 Juli um12h.

Fazit

CitySim ist eine Software zur Simulation von Energieflüssen auf Stadtviertelebene. Durch die geringe Anzahl der Eingabedaten ermöglicht sie eine einfache Handhabung.

Die verwendeten Modelle bieten einen akzeptablen Kompromiss zwischen Simulationszeit und Genauigkeit der Ergebnisse.



3 Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Die geleistete Arbeit und die erzielten Ergebnisse werden nach den Arbeitspaketen und den Entwicklungszielen, wie sie im ursprünglichen Projektantrag von 2020 angegeben wurden, gegliedert.

3.1 WP0 – Projektleitung

Das Projekt wird grösstenteils bilateral verwaltet, mit Ausnahme der allgemeinen Sitzungen, die etwa alle 6 Monate stattfinden um alle Projektpartner über den aktuellen Stand, aktuelle Probleme und die nächsten Schritte zu informieren.

3.2 WP1 – Zusammenführung bestehender Daten

Die Zusammenführung bestehender Daten beinhaltet nebst der Literaturübersicht auch Daten, die die Projektpartner von vorherigen Projekten erhalten haben. Darüber hinaus wurden auch die gewählten Tools beschrieben, damit Inputparameter und Outputparameter für die verschiedenen Partnern klar sind.

3.2.1 Literaturübersicht zum Vergleich

Eine umfassende Literaturübersicht wurde durchgeführt, um Richt- und Vergleichswerte zu finden. Diese ermöglichen zum einen die Simulationen zu verfeinern, zum anderen die erwarteten Energieeinsparungen in einem ersten Schritt zu schätzen und Methoden zu vergleichen. Klima, Modell, Pflanzenart, Zeitpunkt der Messung, benutzte Messgeräte usw. sind in diesen Studien oft verschieden und müssen stets in Betracht gezogen werden.

In diesem Abschnitt werden ein paar Studien erwähnt:

In der Forschung von *Djedig (2013)* wurden Messwerte an dem Climabat-Modell an der Universität La Rochelle ausgewertet (ozeanisches Klima) mit dem Ziel den hygrothermischen Einfluss von begrünten Gebäudehüllen auf den Innenraum und dem urbanen Mikroklima zu bewerten. Das Climabat-Modell simuliert eine städtische Umgebung im Massstab 1:10 mit fünf identischen fensterlosen und schlecht isolierten Gebäuden. Die Fassaden sind östlich und westlich ausgerichtet. Die benutzten Pflanzenarten sind dabei Sedum, Minze, Thymian, Immergrün, Glockenblumen und Mittagsblumen.

Die wichtigsten Resultate sind:

- Reduzierung der Oberflächentemperatur der Fassaden mit Spitzenreduktionen von 15°C. Diese Temperatur variiert mit der Höhe der Messpunkte (Unterschiede von 5°C). Nachts hingegen ist die Oberflächentemperatur ungefähr 2°C höher durch die Verminderung der langwellige Strahlungsverluste. Im Winter ist die Reduzierung der Oberflächentemperatur weniger markant.
- Positiven Einfluss auf die Energiebilanz der Gebäude. Einerseits wird eine negative Energiebilanz im Sommer observiert (der ausgehender Wärmefluss durch die begrünte Wand ist grösser als der eingehender Wärmefluss) dies resultiert in ein Kühlungseffekt. Andererseits ist diese Bilanz im Winter positiv synonym von einer besseren Wärmedämmung. Die Gesamtbilanz (Nutzenergiebedarf) liegt -20% tiefer als die Bilanz eines identischen Referenzgebäude ohne Begrünung.
- Einfluss von Begrünung ist abhängig von der Gebäudehüllzahl.

Pérez, Rincón, Vilam González & Cabeza (2011) sind zuvor bereits auf ähnliche Resultate gestossen. In ihrer Forschung wurde die Entwicklung verschiedener Pflanzenarten studiert sowie den Einfluss der



Verschattung. Dabei wurden mehrere Container mit begrünten Flächen versehen. Die gewählten Pflanzenarten sind Efeu, Geissblatt, Rebe und Clematis. Das Klima ist ein kontinentales Mittelmeerklima (Spanien).

Nach einem Jahr wurden folgende wichtigen Resultate erhalten:

- Reduzierung der Oberflächentemperatur zwischen 5.5°C und 15.2°C (Spitzenwert in September)
- Erhöhung der Temperatur zwischen der Begrünung und der baulichen Substanz von 3.8°C im Winter (im Vergleich zur Aussentemperatur) und Reduktion der Luftfeuchtigkeit zwischen der Begrünung und der baulichen Substanz von 8% (im Vergleich zur äusseren Luftfeuchtigkeit).
- Reduktion der Temperatur zwischen der Begrünung und der baulichen Substanz von 1.4°C im Sommer (im Vergleich zur Aussentemperatur) und Erhöhung der Luftfeuchtigkeit zwischen der Begrünung und der baulichen Substanz von 7% (im Vergleich zur äusseren Luftfeuchtigkeit).

Die Oberflächentemperaturen waren auch Bestandteil der Studie von *Karima & Saliha (2010)*. Jedoch war das Hauptthema der Einfluss von Begrünung auf den thermischen Komfort. Dabei wurde die Innentemperatur in zwei identische Zimmer, eines mit Begrünung, eines ohne, gemessen, dies in einem Mittelmeerklima (Tunesien).

Die Resultate sind:

- Das Zimmer mit Begrünung ist stets kühler (Maximum von 4.4°C Temperaturunterschied zum vegetationslosen Zimmer).
- Die Oberflächentemperatur des Zimmers mit Begrünung erreicht ungefähr 30°C, die des anderen Zimmers 40°C.

Jacquet (2010) hat sich, nebst der Frage zur Energiebilanz, auch mit den technischen Aspekten eines begrünten Daches beschäftigt, speziell auf die Lebensdauer einer Verdichtungsmembrane. Dabei wurden drei Abschnitte auf ein begrüntes Dach erstellt: ein bewässerter Abschnitt, ein trockener Abschnitt und ein Referenz Abschnitt (ohne Begrünung).

Vier Parameter wurden untersucht: die Höchsttemperatur der Verdichtungsmembrane, die Temperaturschwankungen an dieser Membrane, der Wärmefluss durch das Dach und die Energieeffizienz des Daches. Die Schlussfolgerungen sind:

- Reduktion der Höchsttemperaturen an der Membrane (25% trockener Abschnitt und 27% bewässerter Abschnitt)
- Reduktion der Temperaturschwankungen an der Membrane
- Reduktion des Wärmeflusses durch das Dach
- Energieeinsparungen für die Heizung und Klimaanlage (37.7% jährlich für den trockenen Abschnitt und 47.2% für den bewässerten Abschnitt)

Dabei ist zu beachten, dass die Messungen in einem gemässigt kalten Klima gemacht wurden (Montreal).

Messungen an begrünte Dächer wurden zuvor schon von *Hui (2009)*, durchgeführt mit dem Ziel den Einfluss einer Begrünung auf den U-Wert zu quantifizieren und auf die Temperaturschwankungen.



Die Messungen wurden auf vier verschiedenen Standorten mit begrünten Dächern in Hong Kong gemacht. Auf jedem Dach war ein Abschnitt ohne Begrünung, ein Abschnitt mit kurzer Vegetation und ein Abschnitt mit hoher Vegetation vorgesehen.

Tabelle 1: Temperaturunterschiede bei unterschiedlichen Dach- bzw. Begrünungstypen, Hui, 2009, S.35

Site	Date	Fluctuations des températures journalières [°C] (Température maximale journalière - Température minimale journalière)			
		Ambiant	Toit nu	Toiture végétale (plantes courtes)	Toiture végétale (plantes hautes)
Ngau Tau Tok (NTK) Building	03.08.2009	5.4 (35.7 - 30.0)	25.4 (54.1 - 28.7)	8.5 (37.2 - 28.7)	7 (33.8 - 28.8)
APB Centre 4/f	08.08.2009	7.4 (36.1 - 28.7)	13 (42.9 - 29.9)	3.2 (31.5 - 28.3)	N/A
Yuen Long Govt Primary school	16.08.2009	7.3 (34.8 - 27.5)	17.8 (43.4 - 25.6)	5.6 (36.0 - 30.4)	1.0 (30.1 - 29.1)
St. Bonaventure Catholic Primary School	08.09.2009	7.7 (34.0 - 26.3)	31.3 (55.8 - 24.5)	18.1 (44.4 - 26.3)	11.3 (36.1 - 24.8)

Die Begrünung ermöglicht es Temperaturschwankungen zu reduzieren und die Oberflächentemperatur zu minimieren. Dabei ist die gute Bewässerung der Pflanzen ausschlaggebend.

Darüber hinaus wurden Simulationen durchgeführt, um das thermische Verhalten dieser Dächer zu evaluieren und den Einfluss der Begrünung auf den U-Wert zu quantifizieren (zwischen 16%-42%).



3.2.2 Daten als Inputparameter

Die relevanten Inputparameter für die Simulationen sowohl auf Gebäudeebene als auch auf Arealebene, die momentan identifiziert worden sind, sind zusammenfassend:

Tabelle 2: Inputparameter Simulationen

Gebäudeebene (Simulationen mittels bSol)	Arealebene (Simulationen mittels CitySim)
Im Simulationstool schon enthalten	Im Simulationstool schon enthalten
Stündliche Klimadaten	Stündliche Klimadaten
Horizontwinkel	Umgebungsprofile und Horizontwinkel
Thermo-physikalische Eigenschaften der Gebäude	3D-Daten
	Thermo-physikalische Eigenschaften der Gebäude
	Thermo-physikalische Eigenschaften der Umgebung
Nötige Anpassungen im Simulationstool	Nötige Anpassungen im Simulationstool
Kontakttemperaturen (Änderungen durch Verdunstungsleistung)	Anpassungen des Bestrahlungsmodells, um die Änderung der Albedo der Vegetationsoberfläche zu berücksichtigen
Verschattungen	Anpassung der thermischen Speicherkapazität des Gebäudes
Äussere Oberflächenwiderstand	Integration der Verdunstungsleistung in das Modell, um die Auswirkungen auf eine Wärmeinsel besser abschätzen zu können
Speicherkapazität	
Eventuell: Anpassung der U-Werte	

3.2.3 Referenzgebäude und Areale

Dieser Punkt wurde bis anhin noch nicht abgearbeitet, weil der Zugriff auf Datenbanken, die für die geplanten Arbeiten erforderlich sind, noch nicht hergestellt werden konnte. Dies stellt nach der zeitlichen Übersicht (Gantt-Planung) eine Verspätung dar. Sollte kein Zugriff zu bestehenden Datenbanken möglich sein, werden womöglich die Referenzgebäude nach SIA 2024 simuliert.



3.3 WP2 – Pflanzenkatalog zu den typisierten Quartieren und den Begrünungstypen für Fassaden

3.3.1 Analyse der Quartiertypen

Ist noch ausstehend. Wird auf die Quartiere, welche simuliert werden sollen, angewendet.

3.3.2 Analyse der Begrünungstypen der Fassaden

Die Begrünungstypen werden nach der *FLL-Richtlinie Fassadenbegrünung (2018)* eingeteilt (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). Klimatisch genauer untersucht wurden im Projekt bis jetzt die bodengebundene Begrünung, die fassadengebundene Begrünung in Regalbauweise (Tröge) sowie in flächiger Bauweise (siehe WP 3 und 4).

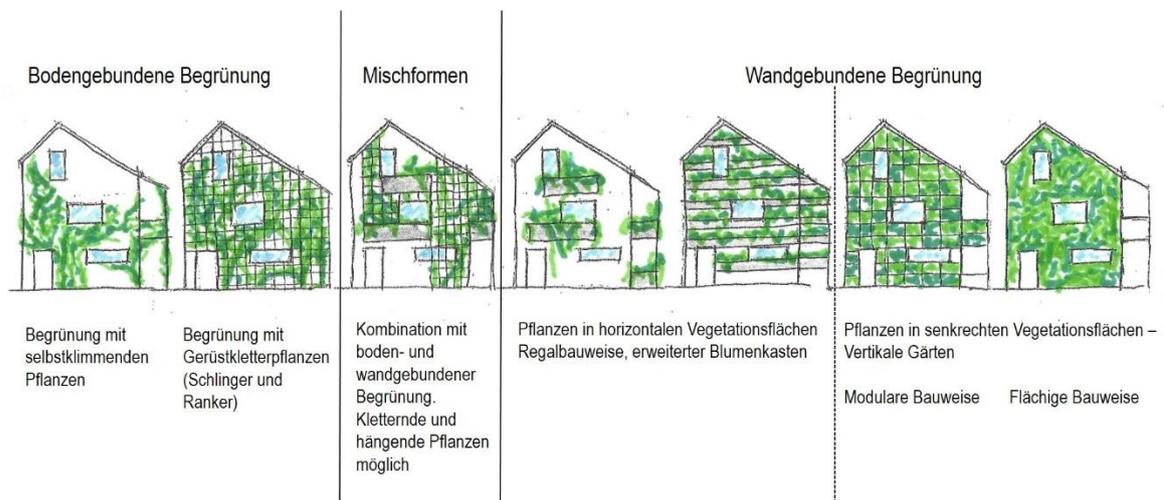


Abbildung 3: Einteilung der Begrünungstypen nach FLL 2018. (Grafik: Emanuel Geissmann)

In der folgenden Tabelle werden die verschiedenen Begrünungstypen betreffend ihre Vor- und Nachteile und der mikroklimatischen Wirkung verglichen. Die Wirkung auf das Mikroklima wird hier auf Grund von Erfahrungswerten der Forschungsgruppe Pflanzenverwendung angenommen und muss mittels konkreter Messungen noch bestätigt werden. Wie aktuelle Messungen zeigen, ist die positive mikroklimatische Wirkung am effektivsten, wenn die Pflanzenwahl auf Exposition, Substrat und Nährstoffe sowie Wasserzufuhr abgestimmt und so die optimale Entwicklung der Pflanzen gefördert wird (Hertig & Trachsel 2021).



Tabelle 3: Vergleich der Begrünungssysteme für Fassaden. In Anlehnung an Köhler 2012, ergänzt durch E. Trachsel.

	Lineare Bauweise, Regalbauweise		Modulare Bauweise	Flächige Bauweise
	Grosse Kübel, Gabionen	Kübel klein, Kästen		
Gestaltung / Bepflanzung	Stauden, Kleingehölze, bedingt auch Kletterpflanzen	Stauden und Kleingehölze, Moose	Stauden, gut flächendeckende Stauden mit Rhizom- und Ausläuferbildung, Halbsträucher	v.a. Epiphyten und bodendeckende Stauden, bedingt horstig wachsende Arten
Substrate	Strukturstabil, mit mind. 60% mineralischem Anteil. Gut wasserführend.	Strukturstabil, mit mind. 60% mineralischem Anteil. Gut wasserführend	Strukturstabil, mineralischer Anteil über 60%, auch erdlose Substrate wie Steinwolle	Erdlose Bauweise (Geovliese)
Bewässerung	Abhängig von den Pflanzenarten, meist 1-mal täglich	Je nach Kastengrösse ein bis 2-mal täglich	Mehrmals täglich empfehlenswert	Kleine Mengen, jedoch stündlich
Vorteile	Rel. grosses Bodenvolumen, Vorteil für klimatische Überbrückung	Austauschbarkeit einzelner Abschnitte	Module können je nach Bauweise ausgetauscht werden	Leicht, frei formbar, variable Oberflächenmodellierungen
Nachteile	Schwer, statische Zwischenstufen einplanen	Schnelle Aufheizung der Gefässe möglich – Isolierung mitplanen	Theoretische Austauschbarkeit ist oft eingeschränkt	Pflanzenwurzeln sind besonders stark den Temperaturschwankungen ausgesetzt
Mikroklimatische Wirkung	Durch hohe Diversität an Arten, auch hohe Verdunstungsrate.		Mikroklimatische Wirkung ist abhängig von der Pflanzenwahl in Kombination mit dem Substrat und dessen Wasserrückhaltekapazität	Mikroklimatische Wirkung hängt vom Bewässerungsintervall ab, also wie viel Wasser den Pflanzen zur Verfügung steht.



3.3.3 Pflanzenauswahl und Pflanzenkatalog

Der Pflanzenkatalog wurde mit Fokus auf die Kletterpflanzen ausgearbeitet. Erste Analysen zeigen, dass insbesondere Arten aus dem Steppenklima sowie an Wechselfeuchte Standorte angepasste Arten in der Stadt auch in Zukunft resilient sein werden.

Die Untersuchungen werden im Laufe des Projektes auch auf die krautigen Arten ausgeweitet. Für die Gehölze (Sträucher) wird die bestehende Liste des Bundesverbandes Gebäudegrün zur Eignung für Dachbegrünung (2019) beigezogen, da die Anforderungen bei der Verwendung in der Regalbauweise beinahe identisch sind.

Stadtklima und Kletterpflanzen

Die Klimaszenarien (CH2018) der Schweiz zeigen, dass die Niederschlagsmenge im Sommer deutlich abnehmen wird. Zusätzlich wird das Klima in der Stadt für die Kletterpflanzen durch den Einfluss der Abgase und Aerosole auf die natürliche Luftzusammensetzung sowie durch die Abstrahlung der Wärme der Gebäude, verschärft (Roloff 2013, S. 169). Diese klimatischen Bedingungen haben einen direkten Einfluss auf die Verwendung der Kletterpflanzen in der Stadt. Sie müssen trotz Hitze- und Dürreperioden vulnerabel und resilient sein. Damit ein funktionsfähiges Vegetationssystem entstehen kann, sind die Pflanzen idealerweise durch ihren natürlichen Standort an diese Stressfaktoren angepasst. Das aktuelle Sortiment der im Handel erhältlichen Kletterpflanzen sowie die meisten in der Schweiz indigenen Arten genügen diesen Anforderungen nicht mehr.

Für Stadtbäume sind Versuche für die Eignung im Stadtklima bereits abgeschlossen. Für Kletterpflanzen sind solche Untersuchungen noch ausstehend. Im vorliegenden Projekt wird erstmals eine Auswahl an möglichen Klimaerwärmung-resistenten Arten gemacht. Dabei wurden die in der Schweiz indigen heimischen Arten, sowie handelsübliche und weniger bekannte Arten untersucht.

Die Gehölze, so auch die Kletterpflanzen, werden auf Grund ihres natürlichen Vorkommens in sogenannte gärtnerische Lebensbereiche der Gehölze anhand von Kennziffern eingeteilt (Kiermeier 1995) (Abbildung). Dieses Kennziffern System vereinfacht die standortgerechte Verwendung der Arten. Bei der Analyse und Bewertung der Kletterpflanzen haben sich besonders Arten aus dem Lebensbereich der Steppengehölze sowie aus den Auen- und Uferwälder als für das Stadtklima geeignet erwiesen. In einem nächsten Schritt werden die Kennziffern der Lebensbereiche mit den Zeigerwerten der Arten verglichen.

Die Steppengehölze sind durch ihre Anpassung an trocken-warme Lagen (xerotherme Lagen) gut an das Stadtklima angepasst. Sie sind langsam wachsend, trockenheitsverträglich und langlebig. Die Auengehölze können als Pionierarten schnellwachsende und als gut transpirierende Begrünung eingesetzt werden. Zudem können sie kurze trockene Phasen ebenso überstehen wie Starkregenereignisse (Roloff 2018, S. 37-38).

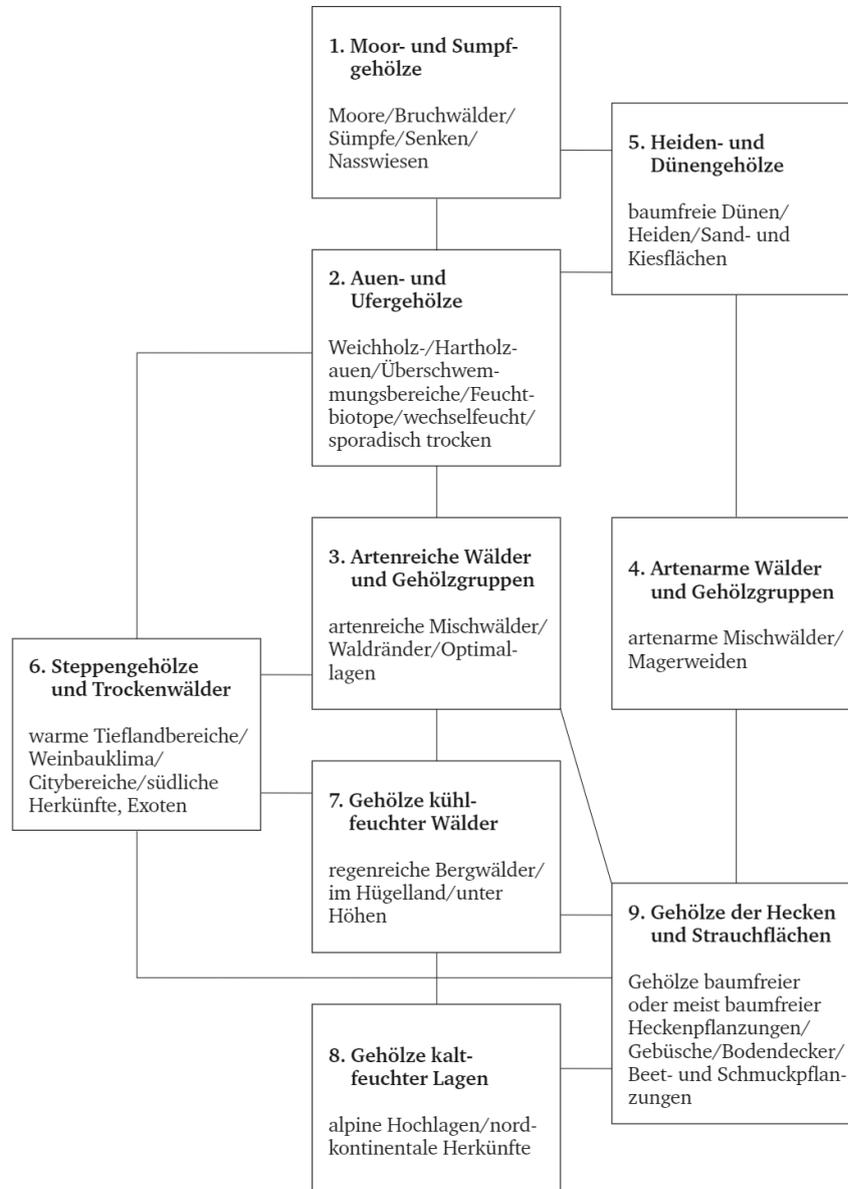


Abbildung 4: Die Lebensbereiche der Gehölze und ihre Zusammenhänge (nach Kiermeier 1996 in Roloff 2018)

Die Bewertung der Arten erfolgt nach dem gleichen Prinzip wie bei den Stadtbäumen (Roloff 2013). Für die Auswahl möglicher zukunftsfähigen Arten werden die Kletterpflanzen nach ihrem Lebensbereich sowie den Klima- und Bodenfaktoren eingeteilt und bewertet. Die Bodenfaktoren geben dabei Aufschluss, wie gut eine Art an Trockenheit angepasst ist. Eine wichtige Rolle dabei spielt auch die Winterhärte, wobei diese auf die aktuellen und zukünftigen Verhältnisse mit erwarteten 2°Grad Erwärmung bewertet werden. Zudem werden Aussagen zur Bewässerungsintensität gemacht, welche im direkten Zusammenhang mit dem Wasserbedarf der Pflanze steht. Eine entscheidende Rolle spielt auch die Toleranz gegenüber Abstrahlung und Hitze. Die Bewertung der Arten ist noch nicht vollständig abgeschlossen. Sie wird für alle Steppengehölze sowie weitere Arten mit Potenzial zur Verwendung im urbanen Raum durchgeführt. Insgesamt werden 60 Arten geprüft. Beispielhaft wird in der Tabelle 4 eine Bewertung wiedergegeben sowie sechs wichtige heimische und europäische Zukunfts-Arten mit



Potenzial für das Stadtgrün aufgeführt. Arten aus Asien und Nordamerika werden ebenso beachtet und im Abschlussbericht aufgeführt.

Tabelle 4: Beispiel der Wertung der Trocken- und Salztoleranz sowie Winterhärte anhand *Lonicera etrusca*. Die Wertung 1 und 2, resp. 1.667 zeigt eine auch in Zukunft gut geeignete Art für das Stadtklima. Allerdings muss die Salztoleranz noch geprüft werden. (Nach Roloff 2013, angepasste Kriterienliste an Kletterpflanzen)

	Trockentoleranz			Winterhärte				S	H
	L	B	K	W	F	FX	FH		
<i>Lonicera etrusca</i>	L	B	K	W	F	FX	FH	S	H
Einordnung	6	1	4	8a	(x)		(x)	(x)	4
Wertung	1	1	1	2	2	1	2	2	
Gesamtwertung			1				2	2	
Gesamtwertung 2030			1				1.667	2	

Legende

L Lebensbereich	1 sehr gute Eignung
B Bodenfaktoren	2 gute Eignung
K Klimafaktoren	3 mittlere Eignung
W Winterhärtezone	4 beschränkte Eignung
F Frostempfindlichkeit 2021	
FX Frostempfindlichkeit 2030	
FH Frosthärte	
S Salztoleranz	
H Höhe in Meter	

Wertung

Tabelle 5: In der Schweiz einheimische und europäische Kletterpflanzen mit Potenzial für das Stadtklima



Clematis flammula, LB 6.3.1.9
Mittelmeergebiet bis Russland,
Iran
(Bild: Baumschule Horstmann)



Clematis viticella, LB 6.3.4.9
Tessin, S-Europa, Kleinasien,
Syrien
(Bild: Baumschule Horstmann)



Lonicera etrusca, LB 6.1.4.9
(9.1.5.5), Tessin, S-Europa
(Bilde: www.freenatureimages.eu)





3.4 WP3 – Messung der Verdunstungsleistung von Kletterpflanzen bei bodengebundenen oder linearen sowie bei fassadengebundenen Systemen

Während die Beschattung der Gebäudehüllen eine tragende Rolle für die Regulierung des Gebäudeklimas einnimmt, wird das Potenzial einer begrünten Fassade zur Kühlung des Aussenraumklimas massgeblich durch ihre Transpirationskapazität (Verdunstungspotential) sowie ihrer Strahlungsbilanz beeinflusst (Besir & Cuce, 2018; Hoelscher et al., 2016; Koyama et al., 2015). Mittels Saftflussmessungen an Kletterpflanzen und dem Einsatz von Lysimeter an Trogsystemen werden die evapotranspirative Kühlleistungen ermittelt.

3.4.1 Saftflussmessungen

Erste Saftflussmessungen wurden im Sommer 2020 in der Stadtgärtnerei Zürich sowie im MFO Park in Oerlikon an gut etablierten Kletterpflanzen durchgeführt. Pro Standort wurden für jeweils für zwei Wochen die Saftflussraten drei verschiedener Pflanzenarten gemessen. Dazu wurden an den Stämmen der zu untersuchenden Pflanzen Saftflusssensoren (SFM1, ICT-International) angebracht, welche mittels der Heat-Ratio-Methode den Xylemfluss der Gehölze in einem 10 Minutentakt aufzeichneten. Bei Pflanzen mit verzweigtem Stammfuss wurden zwei Sensoren angebracht, wobei die Saftflusswerte beider Stämme für die spätere Analyse addiert wurden. Für die Berechnung des tatsächlichen Saftflusses sind weitere Angaben zur Anatomie des Stammes, insbesondere zur Borkendicke notwendig. Zur Bestimmung der Borkentiefe wurde ein flachköpfiger Schraubenzieher sanft in die jeweiligen Stämme geschlagen, bis sich der Klang beim Einschlagen änderte. Die Einschlagstiefe entspricht dabei der Borkentiefe.

In der Stadtgärtnerei sind die drei Arten (*Actinidia arguta* 'Issai', *Vitis* 'Seyval Blanc', *Vitis labrusca* 'Magliasina' gemäss einem Pairwise-Wilcoxon-Test (Man Whitney U Test), mit Ausnahme des Zeitintervalls zwischen 7 und 8 Uhr, alle Pflanzen signifikant unterschiedlich zueinander hinsichtlich ihrer mittleren Saftflussraten ($p < 0.05$). Dieser durchschnittliche Tagesverlauf ist auf der Abbildung graphisch dargestellt. Die höchsten Saftflussraten werden im Schnitt bei *Actinidia* beobachtet mit einem Peak im Zeitintervall von 18-19 Uhr (123.63 ml h^{-1}). Die tiefsten durchschnittlichen Saftflussraten werden durchgehend bei der *Vitis* 'Seyval B' beobachtet.

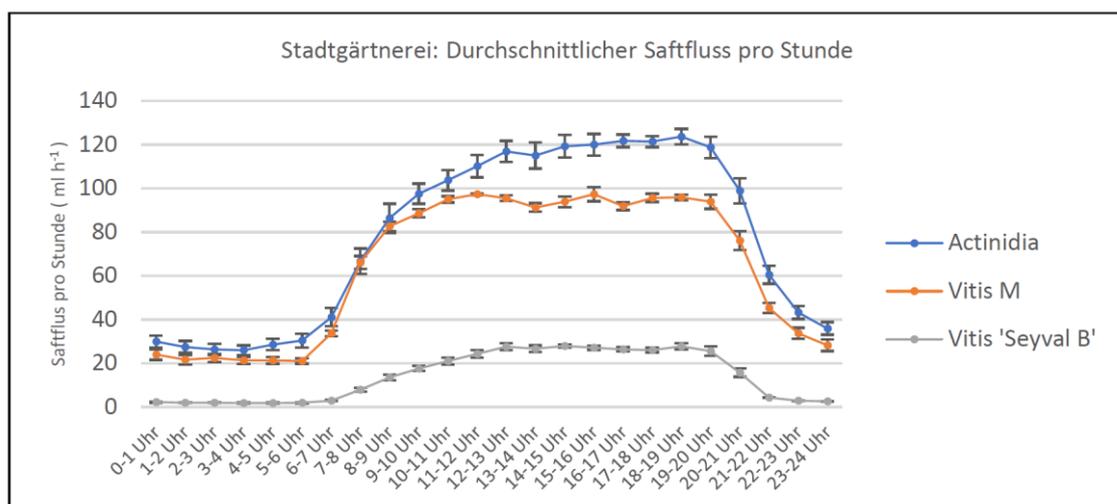


Abbildung 5: Durchschnittlicher Tagesverlauf der stündlichen Saftflussraten (inkl. Standardfehler) von drei Kletterpflanzen in der Stadtgärtnerei Zürich für die Messperiode vom 30.6.2020 – 12.7.2020. (Erstellt in Microsoft Excel, 2018) (Heti&Trachsel 2021)



Beim MFO Park wurde eine Wisteria sowie zwei Rosen genauer untersucht. Wie bei den Arten in der Stadtgärtnerei sind gemäss einem Pairwise-Wilcoxon-Test (Man Whitney U Test) in allen Zeitintervallen, mit Ausnahme der Stunden 3-4 Uhr, 4-5 Uhr und 6-7 Uhr, alle Pflanzen signifikant unterschiedlich zueinander hinsichtlich ihrer mittleren Saftflussraten ($p < 0.05$). Dieser durchschnittliche Tagesverlauf ist auf Abbildung zu sehen. Die höchsten Saftflussraten werden im Schnitt bei der *Wisteria* beobachtet, mit einem Peak im Zeitintervall von 16-17 Uhr ($977.99 \pm 16.52 \text{ ml h}^{-1}$). Die Rosen zeigen eine deutlich geringere Saftflussrate als die *Wisteria*, was unter anderem auch auf ihre Physiologie und natürlichen Lebensraum zurückgeführt werden kann. Rosen sind an trockene Bedingungen angepasst und haben einen Verdunstungsschutz durch das eher ledrige Blatt. Die *Wisteria* wird dem Lebensbereich der Auengehölze zugeteilt und kann als Pionier- und Wasserpumpendes Gehölz hohe Verdunstungsraten erreichen.

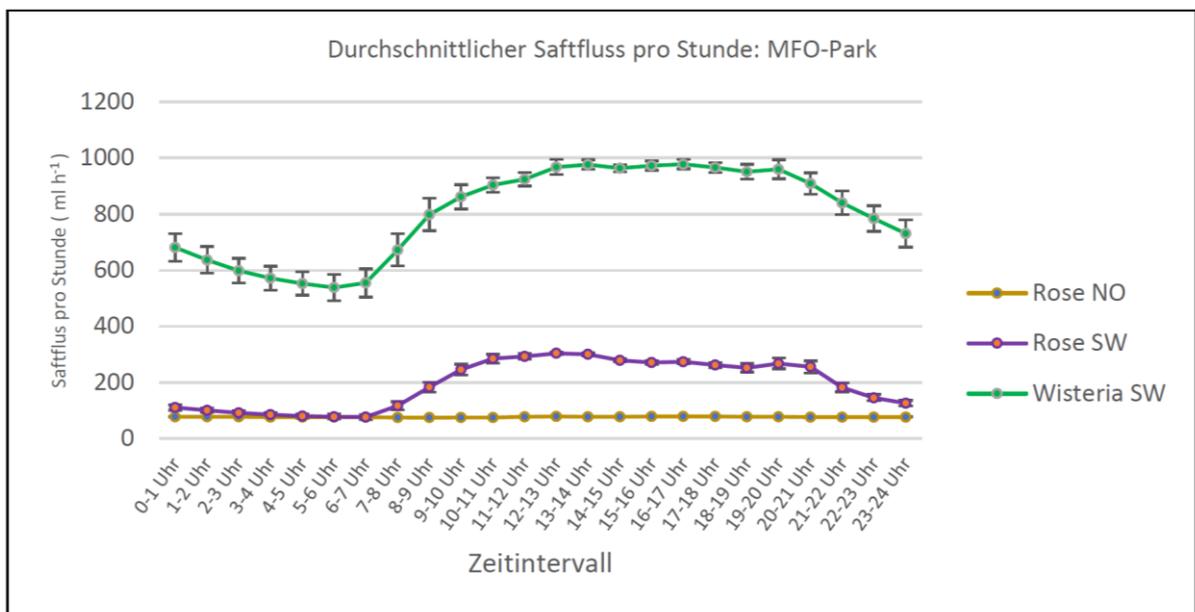


Abbildung 6: Durchschnittlicher Tagesverlauf der stündlichen Saftflusswerte (inkl. Standardfehler) von drei Kletterpflanzen im MFO-Park Zürich (Oerlikon) für die Messperiode vom 14.7.2020 - 31.7.2020. (Quelle: Heti & Trachsel 2021)

Die Saftflussmessungen gaben aufschlussreiche Daten über die Transpirationsleistung der Kletterpflanzen. Um die Daten zu verifizieren, müssen die Messungen an weiteren Arten und differenten Standorten von trocken und heiss bis Schattig und frisch durchgeführt werden. Dies ist für den Sommer 2022 geplant.

3.4.2 Lysimeter

Um die evapotranspirative Kühlleistung von modularen Wandsystemen (Regalbauweise, Tröge) näher bestimmen zu können, wurden im Sommer 2021 stehende Lysimeter am Campus Grüental der Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften (ZHAW) installiert (Abbildung). Dabei werden in diesem Versuch der Wasserhaushalt sowie die physikalischen Eigenschaften von zwei bepflanzten Substrattypen verglichen.

Die vier stehenden Lysimeter (Ready-to-Go Lysimeter, UGT) besitzen hochpräzise Wägezellen, Kippwassersensoren und Bodensensoren, welche in Kombination dazu verwendet werden, den Wasserhaushalt des Boden-Pflanzen-Systems zu bemessen. Um den Wurzelraum in begrüntem



Wandmodulen möglichst nah zu kommen, wurden lediglich die oberen 30cm der Lysimeter (\varnothing :800mm, Tiefe: 600mm) mit den jeweiligen Substraten gefüllt und daraufhin einheitlich bepflanzt (einheitliche Artenzusammensetzung, Anordnung und Anzahl der Pflanzen). Die unteren 30 cm wurden mit Splitt befüllt und mit einer gelochten Teichfolie bedeckt (Abbildung). Des Weiteren werden am Standort relevante Umweltfaktoren mittels einer stationären Klimamessstationen erfasst. Es erhielten jeweils zwei Lysimeter dasselbe Treatment (Substrattyp). Da der Versuch die Bedingungen begrünter Wandmodule nachstellen soll, wurden an allen Lysimeter eine Sprühbewässerung angebracht, welche zweimal täglich die Systeme mit jeweils 3 Liter Wasser versorgen.

Die folgenden Parameter werden mit der Kombination von Lysimeter und Klimamessstation erhoben:

- Bodentemperatur bei 20 cm Tiefe ($^{\circ}\text{C}$)
- Bodenfeuchtigkeit resp. Bodensättigung (%) bei 20 cm Tiefe
- Gewichtsänderung des Bodenpflanzensystems (kg h^{-1})
- Abfluss des Bodenwassersystems pro Stunde (ml h^{-1})
- Niederschlag pro Stunde (mm h^{-1})
- Mittlere stündliche Lufttemperatur ($^{\circ}\text{C}$)
- relative Luftfeuchtigkeit (%)
- Mittlere stündliche Globalstrahlung (Wh)

Die Lysimeter wurden im Sommer 2021 in Betrieb genommen und werden noch eine weitere Vegetationsperiode (2022) laufen. Bis jetzt zeigen alle vier Tröge ein starkes Wachstum, nur eine Pflanze ist ausgefallen.

Artenliste:

- *Nepeta faassenii* 'Snowflake'
- *Campanula poscharskyana* 'Stella'
- *Calamintha nepeta ssp nepeta*
- *Ceratostigma plumbaginoides*
- *Geranium sanguineum*
- *Gypsophila repens*

Substrate:

- Ricoter Kübelpflanzensubstrat
- ZHAW Mischung: 40% Landerde, 10% Kompost, 10% Schwarzerde, 30% Blähschiefer und 10% Sand

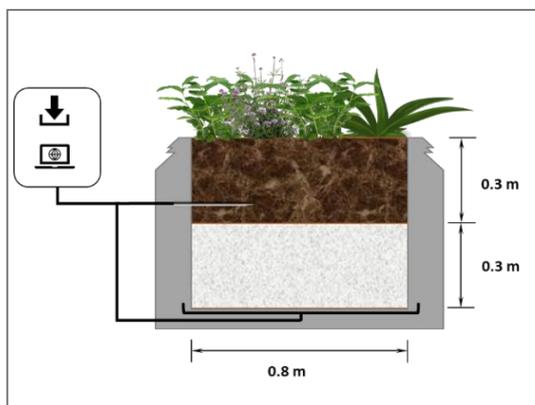


Abbildung 7, links: Schematische Ansicht Lysimeter-Aufbau (Grafik: Tal Hertig).

Abbildung 8, rechts: Drohnenaufnahme Lysimeter-Versuchsaufbau nach Bepflanzung (Foto: Tal Hertig)



3.5 WP4- Messung der Oberflächentemperatur von verschiedenen Begrünungstypen sowie Messung der gefühlten Kühlleistung (PET) von Fassadenbegrünungen in Trogbepflanzungen, lineare Systeme

3.5.1 PET-Messungen

Im Sommer 2020 wurden beim Werkgebäude der Stadtgärtnerei in Zürich PET (Physiological Equivalent Temperatur) durchgeführt. Dazu wurden auf der ersten Etage Klimamessstationen aufgestellt. Die eine Station wurde hinter einer troggeordneten Fassadenbegrünung und die andere vor einem unbegrünten Wandsegment situiert (Abbildung). Beide Stationen wurden mit Messinstrumenten ausgestattet, welche die physiologische Äquivalenztemperatur (Physiological Equivalent Temperatur, PET) bestimmen können.

PET ist eine Masseinheit zur Kennzeichnung der Wärmebelastung und beruht auf der Transferierung der aktuellen Klimawerte der Aussenumgebung in ein vergleichbares Raumklima, dass durch die gleiche thermophysiologische Belastung charakterisiert ist (Höppe, 1999). Zur Ermittlung des PETs wurden an beiden Stationen die folgenden Parameter zeitgleich im 10 Minutentakt erfasst und in das RayMan© Model zur Berechnung eingegeben (Matzarakis et al., 2007, 2010):

- Lufttemperatur (°C) und relative Luftfeuchtigkeit (%) wurden mittels strahlungsgeschützte IButton® (Hygrochon Temp/Hum Logger) auf einer Höhe von 1.1 m erfasst.
- Zur Ermittlung der mittleren Strahlungstemperatur (°C) wurden auf einer Höhe von 1.1m Globe-Thermometer Sonden (Testo 440) aufgestellt. Die erfassten Globe-Temperaturen wurden daraufhin zusammen mit den ermittelten Lufttemperaturen in die Formel nach ISO 7726 (1998) eingegeben, um danach die mittlere Strahlungstemperatur zu erhalten



Die durchschnittlichen Tagesverläufe der PET beider Klimastationen ist auf Abbildung zu sehen. Die höchste PET im durchschnittlichen Tagesverlauf erreicht KS1 (mit Begrünung) im Zeitintervall 18-19 Uhr ($37.51 \pm 2.47 \text{ }^\circ\text{C}$) und KS2 (ohne Begrünung) im Zeitintervall 19-20 Uhr ($45.44 \pm 2.4 \text{ }^\circ\text{C}$).



Abbildung 9: PET-Messtationen bei der Stadtgärtnerei in Zürich. (Bilder: E. Trachsel)

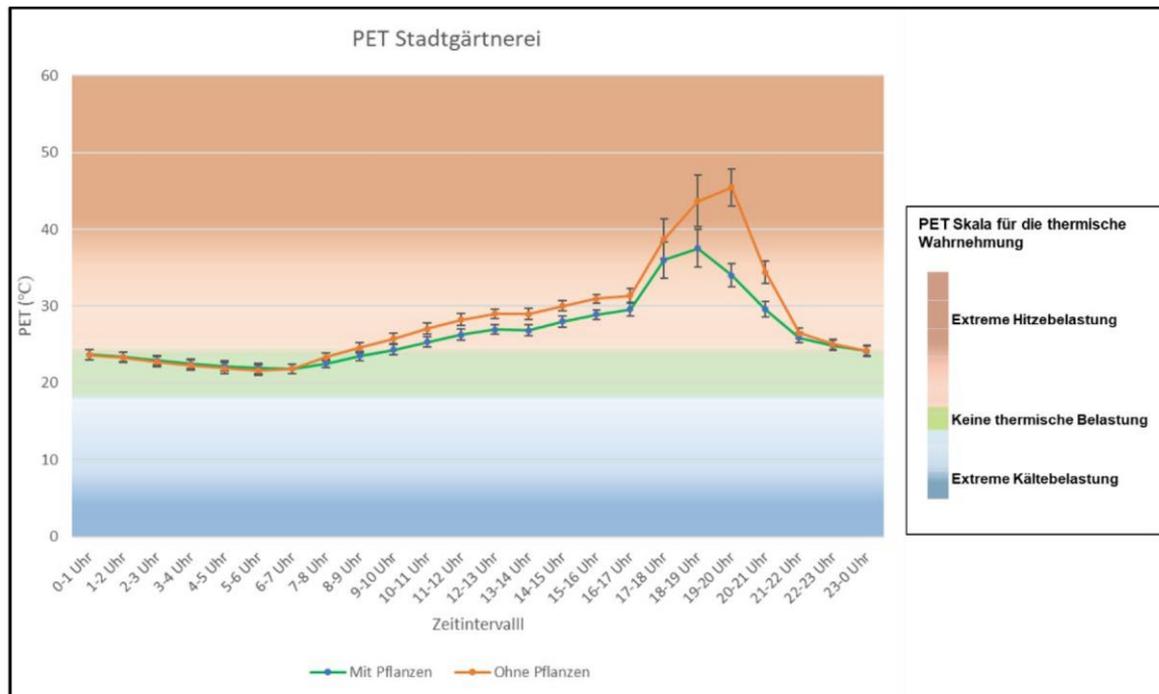


Abbildung 10: Durchschnittlicher Verlauf der stündlichen PET Werte (physiologische Äquivalenz-temperatur) gemessen von zwei Klimamessstationen in der Stadtgärtnerei Zürich für die Messperiode vom 17.7.2020 - 31.7.2020. Die grüne Linie zeigt den Verlauf einer Station hinter einer trogge-bundenen Begrünung und die orangene Linie, die einer Station vor einem unbegrünten Wandsegment auf gleicher Höhe. Eingezeichnet sind die jeweiligen Standardfehler als auch die PET Skala der thermischen Belastung gemäss Mayer et al. (1997). (Erstellt in Microsoft Excel) (Heti&Trachsel 2021)

Während die Fassadenbegrünung für die meiste Zeit am Tag statistisch gesehen keinen signifikanten Einfluss auf die gemessenen PET nimmt, so vermag sie dennoch in den Stunden zwischen 12-21 Uhr die Temperaturen mehrheitlich im Bereich der leichten- bis moderaten Hitzebelastung zu halten. Im Gegensatz hierzu befindet sich die Referenzstation ab 12 Uhr mittags mehrheitlich im Bereich der starken Hitzebelastung (für den Zeitraum von 18-20 Uhr herrscht sogar eine extreme Hitzebelastung). Der Kühlungseffekt der Fassadenbegrünung ist mehrheitlich auf die Reduktion der einfallenden Strahlung zurückzuführen.

3.5.2 Wärmebilder

Um Aussagen über eine mögliche Temperaturreduktion durch Fassadenbegrünungen zu erhalten, wurden an einem wandgebundenen Begrünungssystem sowie der danebenliegenden Referenzwand Wärmebildaufnahmen gemacht.

Im Tagesverlauf vom 20.7.2020, war die durchschnittliche Oberflächentemperatur des begrünten Wandmodus stets im Bereich zwischen 28-29 °C währenddessen sich die durchschnittliche Oberflächentemperatur des unbegrünten Wandsegments im Bereich zwischen 30 und 35 °C bewegte.

Besonders interessant ist die Nachtaufnahme (Abbildung 11, um 22.31). Diese bestätigt die positive Wirkung von Grünflächen zur Auskühlung von Wandoberflächen in der Nacht und dem damit verminderten Hitzeinseleffekt.



Abbildung 11: Versuchsobjekt für die Wärmebildaufnahmen. Zu sehen ist die nördliche Fassade an am Lagergebäude der Stadtgärtnerei Zürich. (Bild: Evelyn Trachsel)

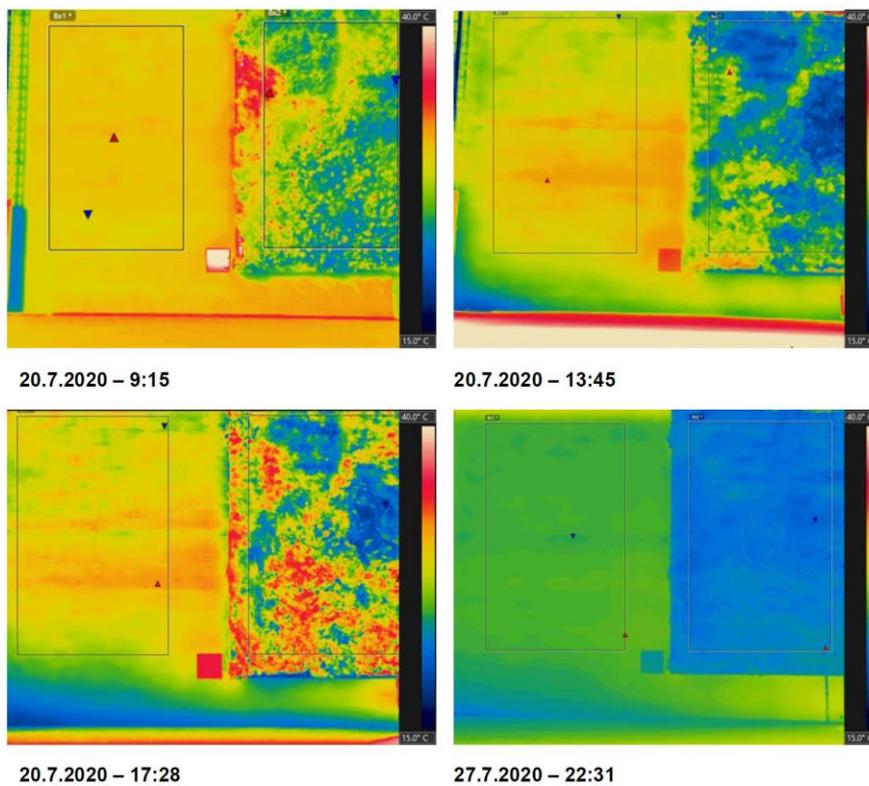


Abbildung 12: Thermalbildaufnahmen der Oberflächentemperatur bei der Stadtgärtnerei Zürich. Temperaturmaximum (rot) und -minimum (blau) sind mit Dreiecken gekennzeichnet. (Bilder: Tal Hertig, Bearbeitet in FLIR Tools+) (Hertig und Trachsel 2021)



3.6 WP5 – Implementierung Indikatoren und Simulationsmethodik

Die voraussichtliche Simulationsmethodik beruht darin die potenzielle Verdunstungsleistung der Begrünung mittels der Berechnung von Penman-Monteith zu berechnen. Diese ist für ein stündliches Zeitraster am genauesten (*Trajkovic, 2011, Berengena and Gavilan, 2005*).

Dafür sind Klimadaten von MeteoSchweiz erforderlich wie Aussentemperatur, relative Luftfeuchtigkeit, Windgeschwindigkeit und globale Strahlung in stündlicher Zeitspanne. Darüber hinaus müssen auch Ortspezifische Inputparameter in die Berechnung eingefügt werden wie Standorthöhe, Sonnengrad, usw.

Die Berechnung nach Penman-Monteith ergibt eine potenzielle Verdunstungsmenge in mm/std (ETo). Dieser Wert ist unabhängig von der Bewässerung, Entwicklungsgrad oder Zustand der Pflanze. Als Referenzfläche gilt in der Tat eine homogene, gut bewässerte Rasenfläche von 12cm Höhe, ein Oberflächenwiderstand von 70 s/m und eine Albedo von 0.23.

Die Bestimmung des ETo ermöglicht es mittels eines Kc- und eines Ks- Koeffizienten die tatsächliche Verdunstungsleistung zu bestimmen (ETr). Im Kc Koeffizient sind Informationen wie Pflanzenart, Pflanzenentwicklung, Pflanzenhöhe, usw. enthalten. Der Ks-Koeffizient spiegelt die Wasserzufuhr dar (Wasserstress). Hierbei sollten die Messwerte der ZHAW hilfreich sein, um das Model zu kalibrieren.

Diese tatsächliche Verdunstungsleistung resultiert in eine Temperaturverminderung um die Blätter und das Substrat. Der Einfluss auf die Aussentemperatur wird dann in bSol berücksichtigt, indem es die begrünte Fläche nicht mit der Aussentemperatur in Kontakt bringt, sondern mit dem neuen Temperaturprofil.

Zudem wird der Verschattungsfaktor der Fenster verändert. Es sollte möglich sein diese Verschattung saisonal zu verändern (Blätterverlust usw.) je nach Pflanzenart.

Bei einer Fassadengebundenen Begrünung soll der Oberflächenwiderstand, die Speicherkapazität und die U-Werte gegebenenfalls angepasst werden.

Die Penman-Monteith Berechnung ist für eine horizontale Fläche ausgelegt worden. Aktuell wird noch geprüft welche Parameter abgeändert werden müssten, um eine vertikale Begrünung zu simulieren.

Diese Simulationsmethodik soll für verschiedene Gebäudetypen angewandt werden sowie für verschiedene Bepflanzungsarten, Pflanzentypen usw. Aktuell wurde nur ein Test durchgeführt da Referenzgebäude und Areale noch nicht bestimmt wurden (siehe Punkt 3.2.3).

Für jeden Gebäudetyp und Begrünungsmassnahme soll die Jahresenergiebilanz, die Heiz- und Kälteleistung sowie die Überhitzungsgefahr ausgewertet werden.

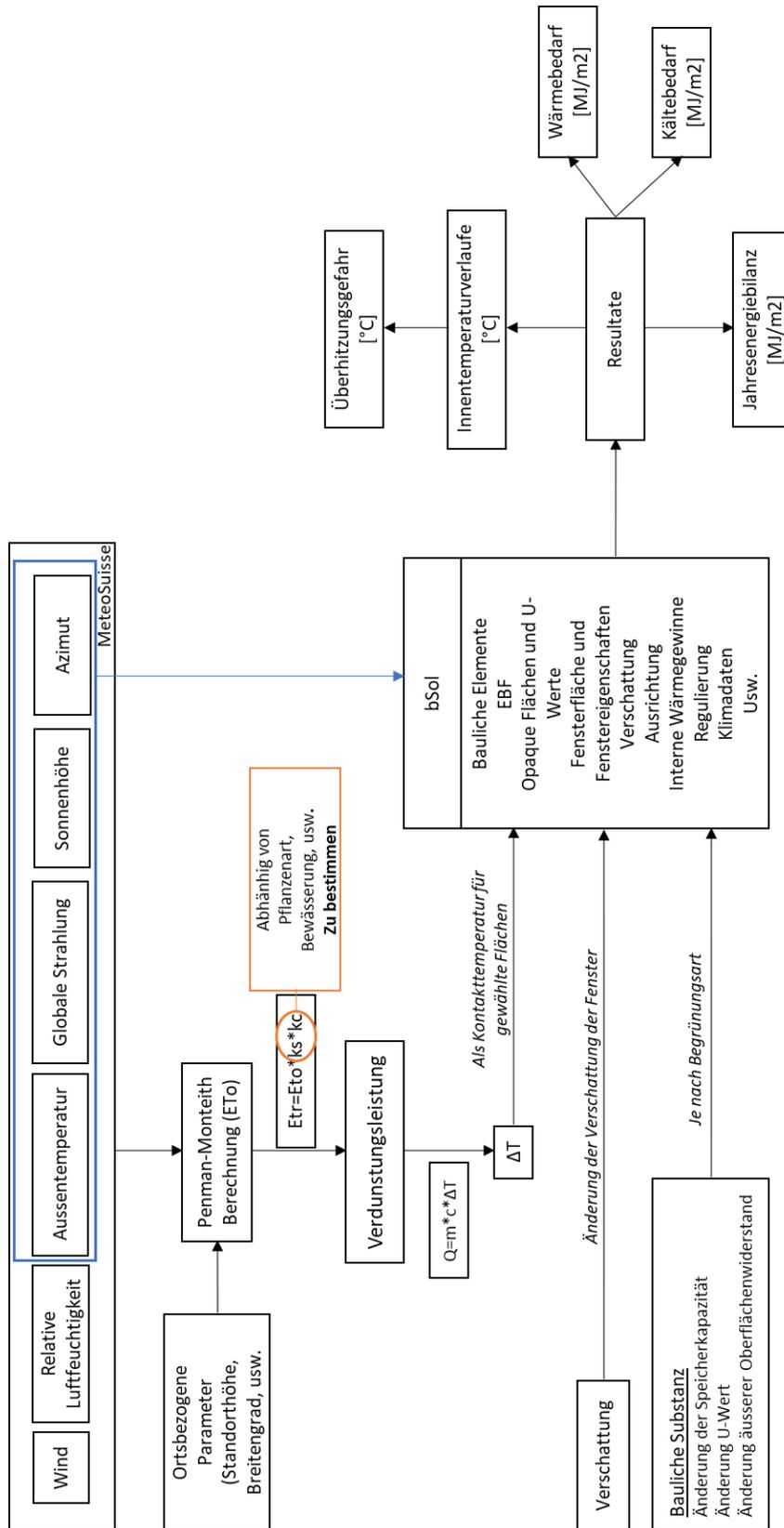


Abbildung 13: Simulationsmethodik



3.7 WP6 – Fallstudien Gebäudesimulation

Es wurden noch keine Gebäudesimulationen durchgeführt. Es wurden bis anhin lediglich verschiedene Tests gemacht, um eine grobe Einschätzung der zu erwartende Energieeinsparungen und Komfortgewinns zu ermitteln. Diese ersten Berechnungen wurden im Rahmen der Bachelorarbeiten gemacht, die im Zusammenhang mit dem Projekt IVECT vorgeschlagen wurden (siehe Punkt 7).

Die Methode, die in der ersten Bachelorarbeit benutzt wurde, kommt der Methode, die unter dem Punkt 3.6 beschrieben wurde, nahe in dem sie ein Kühlungseffekt in Grad Celsius von einem ETr-Wert ableitet (mit einem Kc-Wert von 0.5).

In einer vereinfachten bSol Simulation wurde ein Gebäude ohne und mit Begrünung ausgewertet (Standort Visp). Dabei fällt auf (Abbildung 14), dass die Innentemperatur des Gebäudes mit Begrünung tiefer liegt, als die des Gebäudes ohne Begrünung spezielle im Sommer wo die Differenz 2°C darstellen kann.

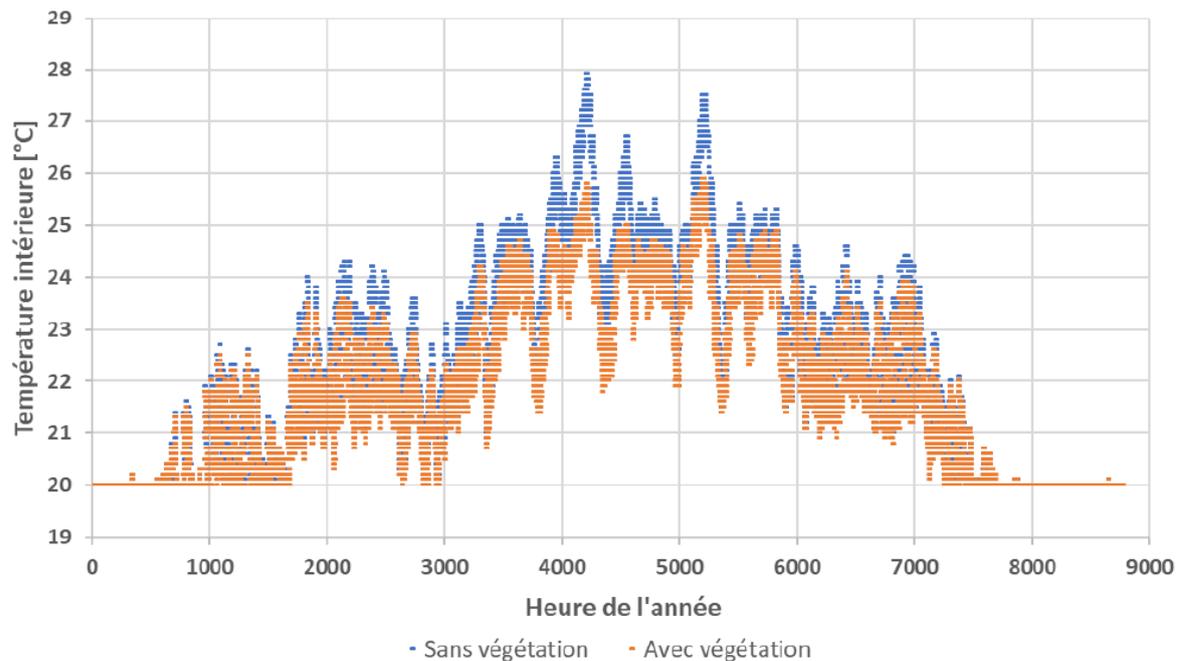


Abbildung 14: Innentemperatur eines Gebäudes mit und ohne Begrünung (bSol Simulation)

Die Begrünung ermöglicht es sogar alle Überhitzungsstunden nach SIA382/1 zu vermeiden (Abbildung 15).

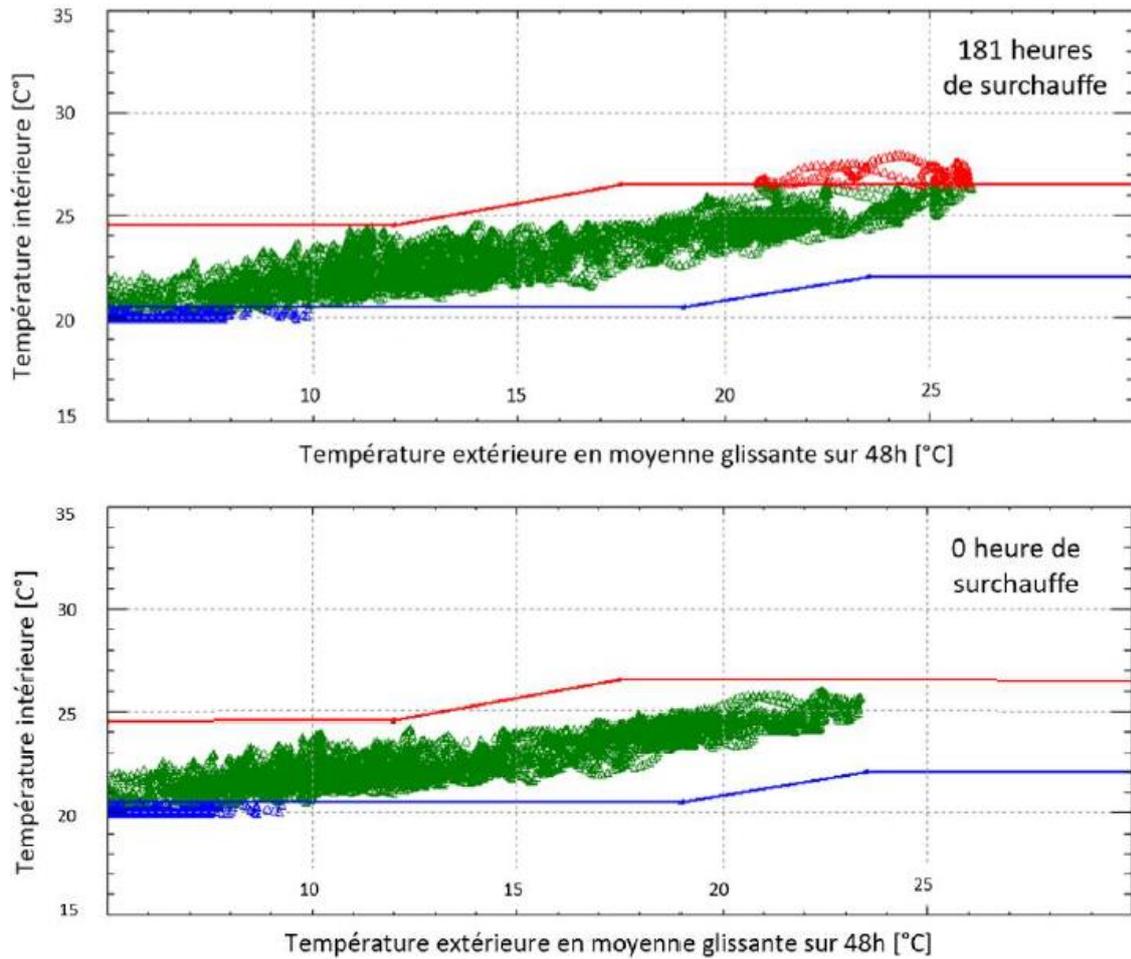


Abbildung 15: Überhitzungsgefahr (rot) bei einem Gebäude ohne (oben) und mit Begrünung (unten)

Die zweite Bachelorarbeit kam auf ähnliche Resultate. Dabei wurden die Berechnung für den Standort Zürich gemacht damit der Kc-Wert von den Messwerten der ZHAW abgeleitet werden konnte (mittlerer Kc-Wert von 0.16).

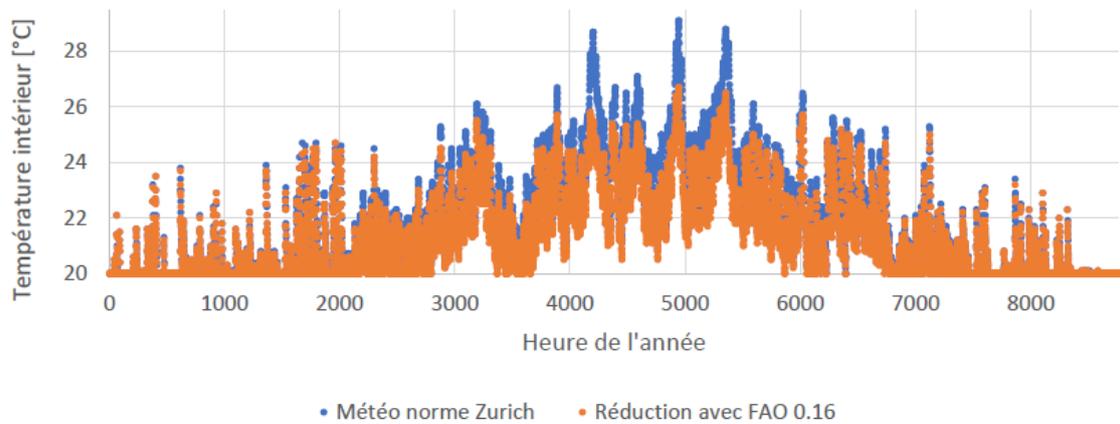


Abbildung 16: Innentemperatur in einem Gebäude ohne (blau) und mit Begrünung (orange)

3.8 WP7 bis WP10

WP7 – Erweiterung von CitySim zur Berücksichtigung von grünen Fassaden

WP8- Simulation eines Stadtviertels mit begrünten Fassaden

WP9 – Aufbereitung der Ergebnisse und Empfehlungen für die Begleitgruppe (auf Stadtvierelebene)

WP10 – Rechtliche, wirtschaftliche und soziale Einflussfaktoren

Diese Arbeitspakete wurden bis anhin noch nicht angegangen. Dies entspricht dem geplanten Fortschrittsplan (Gantt Diagramm).



4 Bewertung der bisherigen Ergebnisse

- Simulationen oder analytische Vorgehensweise? Was ist eher angebracht.
- Probleme in den Simulationen: Quantifizierung des Einflusses mithilfe bSol
- Grösstes Potenzial in Verminderung der Überhitzungsstunden

5 Weiteres Vorgehen

Im nächsten Projektjahr werden vorrangig die Referenzgebäude und Areale bestimmt. Diese sind für die weitere Entwicklung des Projekts massgebend. Sie ermöglichen es in einem weiteren Schritt diverse Simulationen an verschiedenen Gebäudetypen und mit verschiedenen Begrünungsmassnahmen durchzuführen.

Gleichzeitig werden die Messungen an verschiedene Begrünungsarten und Pflanzen weitergeführt. Die Auswertung dieser Messstrecken werden Parameter hervorheben und Richtwerte vorschlagen, die für die Kalibrierung der Simulationen sowohl auf Gebäudeebene als auch auf Arealebene wichtig sind.

Die Erweiterung von CitySim zur Berücksichtigung von grünen Fassaden kann auf diese Basis hin angegangen werden.

6 Nationale und internationale Zusammenarbeit

National

Aktuell sind neben der Zusammenarbeit mit den angegebenen Projektpartnern (ZHAW, CREM, IDIAP, Kanton Wallis, Stadt Zürich) keine weiteren Partner vorgesehen.

Es wird derzeit geprüft, ob eine Zusammenarbeit mit den Kompetenzzentren «Gebäudehülle und/oder Energie und Gebäudetechnik» der Hochschule Luzern-Technik und Architektur (HSLU) sinnvoll ist, da dort ein Projekt mit Schnittmengen zum bestehenden Projekt existiert und persönliche Kontakte zwischen den Projektteams bestehen.

Zudem haben verschiedene Gemeinden des Kanton Wallis Interesse an einer Zusammenarbeit bzw. an voraussichtlichen Resultaten gezeigt. Mögliche Interaktionen werden geprüft.

International

Zum jetzigen Zeitpunkt ist keine Zusammenarbeit mit internationalen Partnern vorgesehen.

7 Publikationen

Aktuell wurden noch keine Resultate publiziert. Zwei Bachelorarbeiten von Studenten der HES-SO Valais/Wallis wurden jedoch in Zusammenhang mit dem Projekt vorgelegt:

1. Etude sur l'impact d'une végétalisation d'un bâtiment par rapport au bilan énergétique annuel, Quoc Hung Alexandre Tran, 2020
2. Case Studie IVECT, Tarik Merz, 2021



8 Literaturverzeichnis

Berengena, J. & Gavilan, P. (2005). Reference evapotranspiration estimation in a highly advective semiarid environment. *Journal of irrigation and drainage engineering* 163.

Besir, A. B., & Cuce, E. (2018). Green roofs and facades: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 915-939.

CH2018 (2018), CH2018 – Climate Scenarios for Switzerland, Technical Report, National Centre for Climate Services, Zurich, 271 pp.

Jacquet, S., (2010). Etude de la performance énergétique d'une toiture végétale extensive installée au centre-ville de Montréal, Ecole de technologie supérieure : <https://espace.etsmtl.ca/id/eprint/647/>

Djedjig, R., (2013). Impacts des enveloppes végétales à l'interface bâtiment microclimat urbain, Université de La Rochelle : <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01141046>

FLL (Hrsg.) (2018). Richtlinie für die Planung, Ausführung und Pflege von Fassadenbegrünungen mit Kletterpflanzen.

Hoelscher, M.-T., Nehls, T., Jänicke, B., & Wessolek, G. (2016). Quantifying cooling effects of facade greening: Shading, transpiration and insulation. *Energy and Buildings*, 114, 283-290.

Höppe, P. (1999). The physiological equivalent temperature—a universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment. *International journal of biometeorology*, 43(2), 71-75.

Hui, C. M., (2009). Study of thermal and energy performance of green roof systems, Department of Mechanical Engineering, University of Hong Kong

Karima. B. & Saliha, A., (2010). Evaluation des transferts thermiques à travers la paroi végétalisée, Conference : Vème Congrès International sur les Energies Renouvelables et l'Environnement, Tunisie.

Kiermeier, P. (1995). Die Lebensbereiche der Gehölze: Eingeteilt nach dem Kennziffersystem. Ulmer Verlag, Stuttgart

Koyama, T., Yoshinaga, M., Maeda, K.-i., & Yamauchi, A. (2015). Transpiration cooling effect of climber greenwall with an air gap on indoor thermal environment. *Ecological Engineering*, 83, 343-353.

Matzarakis, A., Rutz, F., & Mayer, H. (2007). Modelling radiation fluxes in simple and complex environments—application of the RayMan model. *International journal of biometeorology*, 51(4), 323-334.

Matzarakis, A., Rutz, F., & Mayer, H. (2010). Modelling radiation fluxes in simple and complex environments: basics of the RayMan model. *International journal of biometeorology*, 54(2), 131-139.

Merz Tarik, (2021). Case Studie IVECT, HES-SO Valais/Wallis, Sion

Pérez, G., Rincón, L., Vila, A., González, J. M. & Cabeza, L. F., (2011). Behaviour of green facades in Mediterranean Continental climate. *Energy Conversion and Management*, 52 (4), 1861-1867: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2010.11.008>



Quoc Hung Alexandre Tran, (2020). Etude sur l'impact d'une végétalisation d'un bâtiment par rapport au bilan énergétique annuel, HES-SO Valais/Wallis, Sion

Roloff, A.; Bärtels, A (2018). Flora der Gehölze: Bestimmung, Eigenschaften, Verwendung. Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart

Roloff, A. (2013). Bäume in der Stadt: Besonderheiten, Funktion, Nutzen, Arten, Risiken. Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart.

Trajkovic, S. (2011). Estimating hourly reference evapotranspiration from limited weather data by sequentially adaptive RBF network. Architecture and Civil Engineering Vol.9, N°3, pp.473-480.