



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Energie BFE
Sektion Energieforschung und Cleantech

Abschlussbericht vom 06.12.2024

Entwicklung und vergleichender Test eines Gesamtpakets für bifaziale PV-Systeme auf Gründächern



Quelle: ZHAW/Klenk



Zürcher Hochschule
für Angewandte Wissenschaften



IEFE Institut für Energiesysteme
und Fluid-Engineering



Zürcher Hochschule
für Angewandte Wissenschaften



Life Sciences und
Facility Management

IUNR Institut für Umwelt und
Natürliche Ressourcen

Datum: 06.12.2024

Ort: Bern

Subventionsgeberin:

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

Subventionsempfänger/innen:

ZHAW / IEFE
Technikumstrasse 9
CH-8401 Winterthur
www.zhaw.ch

ZHAW / IUNR
Grüentalstrasse 41
CH-8820 Wädenswil
www.zhaw.ch

A777Gartengestaltung
Bahnhörterhaus
CH-8472 Seuzach
www.a777.ch

Schubiger Immobilen GmbH
Neuwiesenstrasse 37
CG-8400 Winterthur

Autor/in:

Markus Klenk, ZHAW/IEFE, kleu@zhaw.ch
Roger Hiltbrand, ZHAW/IEFE, hila@zhaw.ch
Stephan Brenneisen, ZHAW/IUNR, bres@zhaw.ch
Andreas Dreisiebner, A777Gartengestaltung, garten@a777.ch

BFE-Projektbegleitung:

Karin Söderström, karin.soederstroem@bfe.admin.ch
Stefan Oberholzer, stefan.oberholzer@bfe.admin.ch

BFE-Vertragsnummer: SI/502213-01

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



Zusammenfassung

Ökologisch wertvoll begrünte Flachdächer sind sinnvoll und werden wegen ihrer positiven Effekte (RegenwasserRetention, Urban Heating, Biodiversität, ...) zunehmend gefordert. In diesem P&D-Projekt wurden auf einem solchen Gründach vertikal installierte bifaziale PV-Systeme mit nun kommerziell verfügbaren Komponenten installiert und mit konventionellen Systemen verglichen. Hohe Substratdicke und guter Wasserrückhalt führen zu einem vergleichsweise starken Bewuchs ohne Bewässerungsbedarf, der dank der vertikalen Module dennoch gut zu pflegen ist (1-2 Einsätze/Jahr und 10-20 CHF/kWp). Die RegenwasserRetention wurde mit Wasserspeicherelementen, Drosseln und speziellem Substrat optimiert. Das Projekt kann als wegweisend für Dachbegrünungen mit hohem Wasserrückhalt und dennoch sonnigen Standortbedingungen (vertikale PV) angesehen werden, auf dem auch feuchteliebende Arten gefunden werden konnten. Ein Flächenbelegungsgrad der vertikalen PV-Teilsysteme von 50 % wurde als Kompromiss aus absolutem Energieertrag und gegenseitiger Verschattung der vertikalen Module gewählt. Im Vergleich zu einer klassischen, flachen PV-Anlage mit gleichem Flächennutzungsgrad auf einem Kiesdach liegen die Kosten des Solargründachs wie im Projekt realisiert bei +15-25 % Invest für Butterfly auf Gründach und +25-35 % Invest für Vertikal auf Gründach. Die vertikalen Systeme liefern dabei 70-95 % der Energieerträge von konventionellen Systemen, je nach Jahr und ausgewähltem Vergleichssystem. Unterschiede durch die Substratalbedo wurden durch den Bewuchs in kurzer Zeit nivelliert. Unter Berücksichtigung des Verschattungsszenarios lassen sich auch Erträge vertikaler Systeme innerhalb der Messwert-Schwankungsbreite der Teilsysteme simulieren. Dichtere Belegungen als hier umgesetzt wurden simuliert und mit miniaturisierten Systemen getestet, um das Potenzial noch höherer Gesamterträge zu untersuchen.

Résumé

Les toits plats végétalisés à haute valeur écologique sont utiles et de plus en plus demandés en raison de leurs effets positifs (rétention d'eau de pluie, chauffage urbain, biodiversité, ...). Dans ce projet P&D, des systèmes photovoltaïques bifaces installés verticalement sur un tel toit vert ont été installés avec des composants désormais disponibles sur le marché et comparés à des systèmes conventionnels. La densité élevée du substrat et la bonne rétention d'eau permettent d'obtenir une végétation relativement forte, sans besoin d'arrosage, qui peut néanmoins être bien entretenue grâce aux modules verticaux (1 à 2 interventions par an et 10-20 CHF/kWp). La rétention de l'eau de pluie a été optimisée à l'aide d'éléments de stockage de l'eau, de réducteurs de débit et d'un substrat spécial. Le projet peut être considéré comme précurseur en matière de toitures végétalisées avec une rétention d'eau élevée et des conditions d'emplacement ensoleillées (PV vertical), sur lesquelles des espèces aimant l'humidité ont également pu être trouvées. Un taux d'occupation de la surface des sous-systèmes PV verticaux de 50 % a été choisi comme compromis entre le rendement énergétique absolu et l'ombrage mutuel des modules verticaux. Par rapport à une installation PV classique à plat avec le même taux d'utilisation de la surface sur un toit en gravier, les coûts du toit vert solaire tel que réalisé dans le projet sont de +15-25 % d'investissement pour Butterfly sur toit vert et de +25-35 % d'investissement pour Vertical sur toit vert. Les systèmes verticaux fournissent 70 à 95 % de l'énergie produite par les systèmes conventionnels, selon l'année et le système de comparaison choisi. Les différences d'albédo du substrat ont été compensées en peu de temps par la végétation. En tenant compte du scénario d'ombrage, il est également possible de simuler les rendements des systèmes verticaux dans la marge de fluctuation des valeurs mesurées des sous-systèmes. Des occupations plus denses que celles mises en œuvre ici ont été simulées et testées avec des systèmes miniaturisés afin d'étudier le potentiel de rendements globaux encore plus élevés.



Summary

Ecologically valuable green flat roofs make sense and are increasingly in demand due to their positive effects (rainwater retention, urban heating, biodiversity, ...). In this P&D project, vertically installed bifacial PV systems with now commercially available components were installed on such a green roof and compared with conventional systems. High substrate thickness and water retention lead to comparatively strong vegetation without the need for watering, which is nevertheless easy to maintain thanks to the vertical modules (1-2 applications/year and 10-20 CHF/kWp). Rainwater retention was optimised with water storage elements, throttles and a special substrate. The project can be seen as pioneering for green roofs with high water retention and yet sunny site conditions (vertical PV), on which moisture-loving species could also be found. A ground cover ratio of the vertical PV subsystems of 50 % was chosen as a compromise between absolute energy yield and mutual shading of the vertical modules. Compared to a classic, flat PV system with the same area utilisation factor on a gravel roof, the costs of the solar green roof as realised in the project are +20-25 % investment for butterfly on green roof and +30-35 % investment for vertical on green roof. The vertical systems deliver 70-95 % of the energy yields of conventional systems, depending on the year and the comparison system selected. Differences by the substrate albedo were levelled out by the vegetation in a short time. Taking into account the shading scenario, yields of vertical systems can also be simulated within the measured value fluctuation range of the subsystems. Denser coverings than those implemented here were simulated and tested with miniaturised systems to investigate the potential for even higher total yields.

Kernbotschaften («Take-Home Messages»)

- Die Kombination zukünftig zunehmend geforderter ökologisch wertvoller Begrünung und PV ist machbar, alle Komponenten, die in diesem Projekt eingesetzt wurden, sind kommerziell verfügbar. Das Höhenwachstum der Pflanzen ist gut mit einer effizienten Pflege verknüpfbar.
- Durch die hohe Substratdicke, die Substratwahl und den Dachaufbau wird die Wasserrückhaltung optimiert, sodass selbst im Hitzesommer 2022 keine Bewässerung notwendig war und auch feuchteliebende Arten gefunden werden konnten.
- Bei einer PV-Flächenbedeckung von 50 % ergibt sich auf dem Gründach + 25-35 % Invest für Vertikal (+ 15-25 % für Butterfly) auf Gründach, vs. PV konventionell, flach auf Kiesdach, dabei 70-95 % der spezifischen Erträge von konventionellen Systemen, je nach Jahr und ausgewähltem Vergleichssystem.
- Die Erträge der vertikalen PV-Systeme liessen sich, trotz der engen Anordnung, durch kommerzielle Simulationstools gut darstellen. Die berechneten Erträge lagen innerhalb der Schwankungsbreite der Messungen, wobei die korrekte Darstellung der Umgebung eine wichtige Rolle spielt.



Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	3
Résumé	3
Summary	4
Inhaltsverzeichnis	5
Abkürzungsverzeichnis	6
1 Einleitung	7
1.1 Kontext und Motivation	7
1.2 Motivation des Projektes	8
2 Vorgehen, Methode, Ergebnisse und Diskussion	14
2.1 Anlagenbeschrieb PV-System, Gesamtübersicht	14
2.2 Substrataufbau und angestrebte Bepflanzung (Saatgut)	18
2.3 Messung und Untersuchung des PV-Ertrages	19
2.4 Ökofaunistische Untersuchungen im Projekt	22
2.5 Erfassungen der Biodiversitäts-Indikatoren - Flora	23
2.6 Erfassungen der Wasserrückhaltung	26
2.7 Ermittlung Aufwand Pflege und Wartung	27
2.8 Ertragsmessungen an PV-Systemen	28
2.9 Simulationen und Vergleich mit Messdaten	36
2.10 Biodiversitätsmonitoring (Fauna und Flora)	40
2.11 Erfassung Wasserrückhaltung.....	50
2.12 Ermittlung Aufwand Pflege und Wartung	51
3 Schlussfolgerungen und Ausblick	55
3.1 Zusätzliche Kosten Solardach zu Solargründach.....	55
3.2 Flächenbedeckung und Ertrag verschiedener PV-Systemanordnungen	57
3.3 Untersuchte PV-Systeme: Zusammenfassung weiterer relevanter Aspekte	65
3.4 Neue Erkenntnisse aus dem Projekt zu Vegetationsentwicklung (inkl. Wechselwirkung PV) und Wasserrückhalt	66
3.5 Biodiversität auf Solar-Gründächern	67
3.6 Stadtklimatische Effekte von Solar-Gründächern, Aspekte zur Raumkühlung	70
3.7 Interdisziplinäre Aspekte, Zusammenarbeit der Projektpartner	70
3.8 Fazit und Empfehlungen.....	71
3.9 Ausblick	76
4 Nationale und internationale Zusammenarbeit	77
5 Publikationen	78
6 Literaturverzeichnis	78
7 Anhang	80
7.1 Monatliche Erträge des Messjahres 2022/2023	80
7.2 Details zu den Simulationen	93



Abkürzungsverzeichnis

GCR («Ground Cover Ratio»)	Flächenbedeckungsgrad
kWh	Kilowattstunden
kWp	Kilowattpeak
PV	Photovoltaik
RPV	Raumplanungsverordnung
BIPV («Building Integrated PV»)	Gebäude Integrierte PV
HJT	Heterojunction Zelltechnologie
LCOE	Levelized Cost of Electricity



1 Einleitung

1.1 Kontext und Motivation

Ein erheblicher Teil der weltweit installierten Photovoltaik-Erzeugungskapazität wird in Form grosser Freiflächenanlagen realisiert. In der Schweiz ist dies aufgrund der räumlichen Gegebenheiten nicht in gleichem Masse umsetzbar wie in anderen Ländern. Hierzulande stellen insbesondere Dächer potenzielle Installationsflächen dar. Gerade grosse Flachdächer bieten oft gut geeignete Ausgangsbedingungen zur Installation von Photovoltaik (PV). Es wird geschätzt, das grosse Flachdächer in der Schweiz gut 20 % der zur Installation von PV geeigneten Dachflächen ausmachen [1] [2]. Gerade diese Dächer sind aber auch gut für Gründächer mit extensiver Begrünung geeignet, welche positive Effekte mit sich bringt [3] [4] [5]. Neben der Bereitstellung von Rückzugsgebieten für Pflanzen und Insekten verbessern sie die Luftqualität und dienen der WasserRetention bei starken Regenfällen [6]. Die Verdunstung von gespeichertem Regenwasser führt zu einer Kühlwirkung, welche einerseits in das Gebäude ausstrahlt (monatliche Energieeinsparung bis zu 7 %) [3] sowie in die Umgebungsluft und somit den Effekt der städtischen Wärmeinsel reduziert. Diese Vorteile führen dazu, dass Gründächer nicht nur aus idealistischen Beweggründen realisiert, sondern zunehmend von den Behörden vorgeschrieben oder zumindest gefördert werden [7]. In fast allen Schweizer Städten > 50'000 Einwohner sind Dachbegrünungen bei Neubauten Pflicht [5] [8], wenn auch mit unterschiedlichen Einschränkungen. Dachbegrünungen sind heute zentrale Massnahmen in Klimaanpassungsstrategien von Städten.

Auch auf Gründächern können PV-Anlagen realisiert werden [8] [9], wobei bei einer Nutzung des Daches als Grünfläche und PV-System häufig ein Zielkonflikt resultiert. Zur Optimierung des PV-Ertrags kommt es häufig zu einer dichten Flächenbedeckung durch Module, was wiederum die Zugänglichkeit für Wartungs- und Mäharbeiten erschwert. Diese sind jedoch insbesondere bei Gründächern wichtig, um eine Abschattung der Module durch Pflanzenbewuchs zu verhindern.

Im Laufe der letzten 20 Jahre haben sich verschiedene Grobkonzepte und Einrichtungsvarianten der Kombination Solarenergie und Gründach etabliert mit sehr unterschiedlichen Problemkonstellationen. Eine der Entwicklungslinien antizipierte die Voraussetzungen der Vegetationsentwicklung auf Dachbegrünungen korrekt und konzipierte aufgeständerte Solarmodule, welche das Beschattungsproblem deutlich reduziert und Pflegegänge mit einfachen Mitteln und geringem Aufwand ermöglicht. Eine zweiter Variantenkomplex entstand bei Solaranlagen, welche entgegen bestehenden Empfehlungen und Richtlinien dicht über Substratoberflächen und deren Bewuchs installiert wurden. Bei den letzteren Varianten kam es in der Regel zu Problemen mit Beschattungen durch Pflanzen, sowie schwierige Bedingungen für die Vegetationspflege, welche dann oft sehr kostenintensiv wurde. Genaue Zahlen oder Schätzungen zum Ausmass der auf Dächern eingerichteten Kombinationen mit Problemkonstellationen gibt es nicht. Berichte aus der Praxis zeigen jedoch, dass es sich um ein weit verbreitetes Problem handelt, welche zu einer Verunsicherung in der Branche geführt haben. In den letzten Jahren wurde die Problemkonstellation mehr und mehr in der Planungspraxis wahrgenommen und es gibt eine klare Tendenz für Einrichtungen mit aufgeständerten Anlagen.

Gerade bifaziale Module bieten neue und zusätzliche Möglichkeiten Dachbegrünung und PV-Nutzung zu kombinieren. Aufgrund ihrer beidseitigen Lichtempfindlichkeit erlauben sie einen grösseren Bereich an möglichen Ausrichtungen als dies mit monofazialen, einseitig lichtempfindlichen Modulen möglich ist [10].



Abbildung 1: Der Bewuchs auf Gründächern kann zu einer offensichtlich nachteiligen Abschattung der PV-Anlage führen. Wartungsarbeiten werden wiederum durch eine dichte Belegung mit PV-Modulen erschwert.

1.2 Motivation des Projektes

Solarspar und die ZHAW haben bereits laufende PV/Gründach-Aktivitäten und beschäftigen sich auch allgemein mit bifazialen Modulen und Systemen [8] [9] [11] [10] [12]. Insbesondere wurde in Winterthur auf dem Dach eines Seniorenheims ein Projekt realisiert bei welchem vertikal aufgeständerte, 20-zellige Sondermodule auf einem Gründach installiert wurden [11] [13] [14] (Abbildung 2). Dieses kann als Vorgänger zu dem in diesem Bericht beschriebenen Projekt gesehen werden.

Bei diesem Vorgängerprojekt wurde durch die vertikale Ausführung der Zielkonflikt von Dachbegrünung und Photovoltaik adressiert. Die Flächenbedeckung durch Module wurde im Vergleich zu flach installierten Standardsystemen durch die vertikale Installation deutlich reduziert und die Zugänglichkeit für Wartungs- und Mäharbeiten verbessert. Durch die schmale Ausführung der Module wurde zudem die Windlast verringert, was eine weniger massive Unterkonstruktion erlaubt und die Sichtbarkeit reduziert. Aufgrund der geringeren Höhe wird die Selbstverschattung der Anlage verringert. Konkret bedeutet dies, dass eine vertikale Anlage mit grossen, 60-zelligen Modulen und drei Meter Abstand zwischen den Reihen durch schmale 20-zellige Laminate mit einem Meter Abstand (bei gleicher System-Nennleistung) ersetzt werden kann. Die Module wurden sowohl bei Megasol, wie auch bei der Meyer Burger AG, hergestellt. Die Unterkonstruktion wurde von der ZinCo AG design, produziert und bereitgestellt.

Vertikal installierte, bifaziale Module haben prinzipiell das Potenzial einer hohen Ertragssteigerung, gegenüber monofazialen Modulen mit gleicher Nennleistung (frontseitig gemessen). Die Aufständerbedingungen müssen genau betrachtet werden, da der Schattenwurf und die Gesamtlichtmenge durch den Untergrund berücksichtigt werden müssen. [15] [16] [17].



Abbildung 2: Vertikal montierte, bifaziale Laminate in Ost/West-Ausrichtung in schmaler, 20-zelliger Ausführung auf einem Gründach in Winterthur [4].

Die Ergebnisse entsprechender mit PVsyst simulierter Jahreserträge sind in Abbildung 3 dargestellt [17], wobei bifaziale, vertikal installierte Module (blau, grün) mit monofazialen Modulen (rot, braun) gleicher Nennleistung (frontseitig) verglichen werden. Systeme mit vertikal installierten bifazialen Modulen zeigen eine sehr viel stärker ausgeprägte Abhängigkeit vom Reihenabstand (d) als typische monofaziale Anordnungen. Die Abhängigkeit bleibt selbst für grosse Reihenabstände bestehen. In Abbildung 3 ist auch die starke Abhängigkeit des simulierten Jahresertrags von der Breite («Width» - w) der vertikalen Modulreihen, insbesondere aber auch von der Albedo, dargestellt. Beim gezeigten Beispiel wurden typische 60-zellige Module in «Landscape»-Ausrichtung mit einer Breite, bzw. einer «Modulhöhe» h von 1m angenommen.

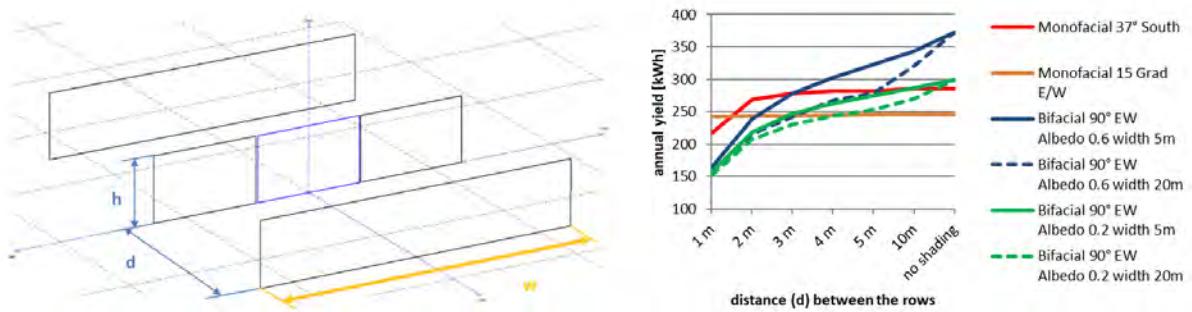


Abbildung 3: Jahresertragssimulation des zentralen Moduls eines Testfeldes aus bifazialen, vertikal installierten Modulen (Ost/West-Orientierung). Variert werden die Breite der Reihen (w), der Reihenabstand (d) und der Albedofaktor. Ebenfalls eingezeichnet ist die Simulation je eines Moduls (gleiche frontseitige Nennleistung) aus einem Feld monokristalliner Module mit 35° Kippwinkel in Südausrichtung (rote Linie) und mit 15° Kippwinkel in Ost/West-Ausrichtung (braune Linie).

Grosse Reihenabstände entsprechen einer geringeren Belegung der Grundfläche mit Modulen. Die Flächenbelegung wird üblicherweise durch die «Ground Cover Ratio» (GCR) ausgedrückt. Eine GCR von 100% entspricht einer vollständigen Bedeckung der Dachfläche mit horizontal ausgelegten PV-Modulen. Im Falle gekippter Module mit «Tilt» entspricht diese GCR derselben Anzahl Module, die jedoch

entsprechend verkippt sind (90° Tilt bei vertikaler Montage). Somit ist die GCR mit der «Modulhöhe» (h) verknüpft.

Die Abhängigkeit vertikaler Systeme (hier mit unbegrenzter Reihenbreite) von der Albedo und der GCR wird nochmals in Abbildung 4. dargestellt und mit einem typischen, monofazialen Beispiel (schwarzes X) mit gleicher frontseitig gemessener Nennleistung verglichen.

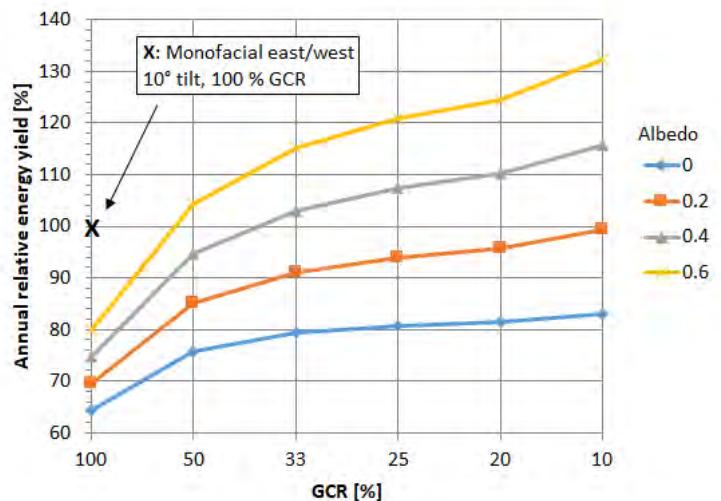


Abbildung 4: Simulierter spezifischer Ertrag (kWh/kWp) eines Ost/West-orientierten, vertikalen, bifazialen Systems unendlicher Breite (GCR und Albedo variiert). Im Vergleich dazu der spezifische Ertrag eines monofazialen Systems (Ost/West) gleicher frontseitiger Nennleistung mit 10° Kippwinkel und 100% GCR.

Selbst wenn der Vergleich simulierter und gemessener Erträge gerade bei vertikaler Installation vergleichsweise grosse Abweichungen ergibt [19], ist an den qualitativen Zusammenhängen nicht zu zweifeln. Die Simulationen decken sich recht gut mit den Messwerten [18] der in Abbildung 2 gezeigten Anlage auf dem Seniorenheim. Bei einem Albedo Faktor von etwas grösser als 0.2 wurden mit den schmalen 20-zelligen Sondermodulen und für einen Reihenabstand von 1 m (entsprechend 3 m für die simulierten 60-zelligen Module in Abbildung 3) und bei endlicher Reihenbreite Erträge pro Modul erreicht, welche vergleichbar zu typischen monofazialen Systemen sind.

Ein vergleichbarer spezifischer Ertrag pro Modul ist demnach mit einer geringeren Flächenbedeckung, entsprechend einer GCR von ca. 33 %, verbunden. Dies bedeutet, dass insgesamt nur ein Drittel des absoluten Systemertrags pro Dachfläche erreicht wird, da insgesamt weniger Module verbaut sind.

Dennoch zeigen die Simulationen auch, dass der Albedo Faktor ein starker Hebel ist, um eine deutliche Verbesserung zu erreichen. Beim Seniorenheim wurden speziell Pflanzen eingesetzt, welche über ihre silbrigen Blätter eine stärkere Reflexion bewirken sollten. Die Pflanzen erwiesen sich als gute Wahl, weil sie sich als sehr resistent gegenüber den harschen Bedingungen auf dem Gründach bewährten (Abbildung 5) und tatsächlich zu einem etwas erhöhten Albedofaktor gegenüber dem dunklen Boden beitragen [18]. Insgesamt ist jedoch der Albedofaktor auch dann mit etwas mehr als 0.2 vergleichsweise niedrig und geringer als das, was man für bifaziale Anwendungen typischerweise anstrebt. Das reflektierte Spektrum von Pflanzen hängt von zahlreichen Faktoren ab und ist nicht unbedingt an der Farbe der Pflanze erkennbar.



Abbildung 5: Standardbepflanzung (links) und silberlaubige Pflanzen (rechts) nach einer Hitzeperiode auf dem Gründach des Seniorenheims in Winterthur. Die Standardbepflanzung litt unter den harschen Bedingungen wesentlich stärker, wie ein Vergleich mit Abbildung 6 zeigt.



Abbildung 6: Standardbepflanzung (siehe Abb. 5, links) vor Einsetzen der Hitzeperiode.

Das Vorgängerprojekt stiess auf eine sehr grosse Resonanz, von regionalen Medien über Forscher bis hin zu Anfragen internationaler Interessenten für entsprechende kommerzielle Ansätze.

Dennoch blieben durch dieses Vorgängerprojekt einige Fragen unzureichend beantwortet und benötigte Komponenten waren für potenzielle Anwender noch nicht kommerziell erhältlich. Das hier beschriebene Nachfolgeprojekt soll zusätzliche Erkenntnisse liefern und dem Test neuer Komponenten für potenzielle Anwender dienen, um deren Praxistauglichkeit zu demonstrieren. Beginnend bei der Hardware, den Modulen und Unterkonstruktionen, war der Ansatz der schmalen Module für die vertikale Installation interessant, ästhetisch ansprechend und im Hinblick auf die städteplanerische Genehmigung sinnvoll. Dennoch sind es Sondermodule, was sich entsprechend im Preis niederschlägt. Um eine breitere Anwendung zu erreichen, sollten im Nachfolgeprojekt auch Unterkonstruktionen für Standardformate untersucht werden, in diesem Fall für typische 72-zellige Module. Daneben wurde ein Modulformat mit Zwischengrösse (48 Zellen) in schmälerer Bauweise gewählt.

An diese Modulgrössen angepasste Unterkonstruktionen sind einerseits selbst anders dimensioniert, um die höheren Kräfte und Windlasten aufzunehmen und benötigen andererseits eine stärkere Verankerung im Boden. Dies ist auch in Kombination mit dem Substrat, welches als Ballastierung dient, und der angestrebten Art der Begrünung und zu sehen. Beides beeinflusst die Dächerauswahl für den in



diesem Projekt getesteten Ansatz. Ein weiterer Aspekt ist die Albedo des Substratmaterials, welche bei bifazialen Modulen eine wichtige Rolle spielen kann (Abbildungen 3 und 4). Daher wurde bei der Substratwahl für dieses Projekt bewusst helleres und dunkleres Substrat ausgewählt und das Dach je zur Hälfte damit belegt, um den Effekt zu erfassen.

Wie in den Abbildungen 5 und 6 gezeigt, war die Bepflanzung nicht durchgehend resistent gegen die harschen Bedingungen insbesondere während der Hitzeperiode. Das Substrat war in dieser Zeit praktisch durchgetrocknet, was sich selektiv auf den Bewuchs auswirkt. Die silberlaubige Bepflanzung (Abb. 5 rechts) erweist sich als resistent, was auch zu erwarten ist, da die entsprechenden Pflanzen an vergleichsweise trockenen Orten mit hoher Einstrahlung gedeihen.

In der dünnen Vegetationstrag-(Substrat)-schicht von Dachbegrünungen finden alle pedologischen Prozesse statt. Dabei ist die Korngrößenzusammensetzung, bzw. für poröse Materialien ergänzend die Porenvolumina, die wesentliche Steuerungsgröße bezüglich des Wasserhaushaltes sowie bodenphysikalischer und -chemischer Prozesse.

Der wesentliche Unterschied zwischen Dachbegrünungen und ebenerdigen Standorten ist die dünne Substratschicht ohne Verbindung zu tieferliegenden Schichten. In Gebieten mit länger andauernden Trockenperioden im Sommer kann es dadurch zu einem weitgehenden bis vollständigen Austrocknen des Substrates kommen. Die Oberflächentemperatur kann 60° C, und selbst in einigen cm Substrattiefe noch 45° C erreichen. Dazu kommt eine extreme Strahlungs- und Windexposition, welche die Verdunstung zusätzlich begünstigt. Für Bodentiere fehlt zudem die Möglichkeit, sich in tieferliegende, feuchte Bodenbereiche zurückziehen zu können, wenn die Bodenoberfläche austrocknet.

Neben der knappen Versorgung mit Wasser besteht für Pflanzen oft auch ein Mangel an Nährstoffen. Mit der Ansaat wird in der Regel eine Initialdüngung aufgebracht. Wenn das Substrat jedoch ungenügende Adsorptionseigenschaften besitzt, kommt es längerfristig (trotz eines konstanten Eintrages über den Luftpfad) zu einem Nährstoffmangel. Bei durchhängenden Dachbereichen kann es auch dazu kommen, dass grössere Bereiche mit Staunässe auftreten. Dadurch können einzelnen Arten absterben.

Durch die Exposition auf einem Gebäudedach sind Dachbegrünungen als extrem isolierte Inselbiotope zu bezeichnen. Eine Besiedlung durch nicht flugfähige Arten kann demnach nur über eine passive Verdriftung durch den Wind oder andere Transportwege (im Gefieder von Vögeln oder klebend an Vogelfüßen bzw. mit ähnlichen Mechanismen bei kleineren Organismen mit Insekten und Spinnen als Transportmedium) erfolgen. Denkbar ist zudem eine faunistische Besiedlung zu „Fuss“ über Hauswände, was am meisten durch Fassadenbegrünungen begünstigt wird.

Im Rahmen der vorliegenden Untersuchung sollte das Potenzial der eingerichteten Dachbegrünung für die Förderung der Biodiversität erfasst werden. Hierfür bietet sich zum einen vegetationskundliche, aber auch ökofaunistische Untersuchungen an, welche im Rahmen des Projektes angewendet wurden.

Das Durchtrocknen ist typisch für die Substratdicken, wie sie in den bis heute realisierten Dachbegrünungen typischerweise umgesetzt werden. Entsprechend erfolgt auch absichtliche Begrünung auf den Dächern mit Pflanzen, welche mit diesen Bedingungen am besten zureckkommen, beispielsweise mit Sedum aus der Familie der Dickblattgewächse. Dazu kommen im längeren Betrieb aber immer auch Pflanzen über Zuflug hinzu.

Zunehmend wird nun aber eine «ökologisch wertvolle» Bepflanzung auf Dächern empfohlen, oder gefordert, wo dies möglich ist. Auf die die Details wird später in diesem Bericht eingegangen. Dies ist mit einer höheren Substrattiefe im Bereich grösser 12 cm verknüpft. Einerseits steht dadurch ausreichend Masse zur Verankerung der vertikal installierten Module grösserer Fläche bereit, andererseits erhöht sich die Dachlast erheblich im Vergleich zu dünneren Substraten. Bei Neubauten kann diese höhere Dachlast typischerweise aufgenommen werden, bei Bestandsbauten ist das jedoch zumeist nicht der Fall. Auch für solche Gründächer auf Bestandsbauten werden zwischenzeitlich vertikale PV-Systeme angeboten, beispielsweise durch die Firma Solyco (D), wie beim beschriebenen Vorgängerprojekt ebenfalls mit schmäleren Modulen. Beim hier beschriebenen Nachfolgeprojekt in Mattenbach werden die



Module von im Substrat liegenden Verankerungen gehalten, die von vorneherein mit eingeplant und eingebaut werden.

Durch das tiefere Substrat wird mehr Biomasse ermöglicht und das Austrocknen wird verzögert. Die Pflanzen finden andere Bedingungen vor, weswegen sich auch andere als hartlaubige, niedrigwachsende Pflanzen ansiedeln können. Offensichtlich hat das einen Einfluss auf die ökologischen Eigenschaften und die Biodiversität. Bei dem Dach in Mattenbach wird zudem die Feuchtigkeit teilweise angestaut, wobei die Feuchte maximal gehalten werden soll, ohne dass Staunässe auftritt. Dies geschieht in Verbindung mit der Unterkonstruktion durch spezifische Wasserspeicherelemente und einer gedrosselten Dacheinlaufvorrichtung. In Teilzonen wurde den Substraten zur Erhöhung der nutzbaren Feldkapazität (pflanzenverfügbare Wasserspeicherung) für ergänzende vegetationstechnische Versuche Pflanzenkohle beigemischt.

Wasserrückhalt (Regenwasserretention) ist neben «Urban Heating» und Biodiversität einer der wesentlichen städtebaulichen Gründe für die Forderung nach Gründächern, um die negative Auswirkung der Versiegelung von Oberflächen zu reduzieren. Je nach Gestaltung der städtischen Regularien kann sich ein wirksamer Wasserrückhalt durch die Entlastung der Kanalisation für den Bauherrn auch finanziell rechnen. Auch in dieser Hinsicht ist eine grössere Substrattiefe wünschenswert.

Die bei dem in diesem Projekt zu erwartende höhere Biomasse und der verstärkte Bewuchs kann zu einem höheren Wartungsaufwand führen was insbesondere auch in Verbindung mit dem PV-System zu sehen ist. Eine gute Zugänglichkeit ist hier von nochmals höherer Wichtigkeit als bei PV-Systemen mit keinem oder schwachem Bewuchs.

Auf den Zusammenhang zwischen Substrattiefe, Bewuchs und PV-Systemen wird bereits in Empfehlungen eingegangen [25] [26], wobei eine Variation der Substratdicke über der Dachfläche empfohlen wird, um Wasserretention, Begrünung und PV-Belegung möglichst optimal zu ermöglichen. Dabei wird dann auch erwähnt, dass bei enger Belegung mit PV nicht mehr von einer ökologisch wertvollen Begrünung gesprochen werden kann, wobei sich dies auf klassische Systeme mit flacher Auslegung bezieht.

Hier schliesst sich wieder der Kreis zu einer aus PV-Sicht optimalen und somit dichten Belegung, was zu einem Zielkonflikt mit der ökologisch wertvollen Begrünung führt. Die vertikale Installation mit verbesselter Zugänglichkeit kann hier bei der Umsetzung beider Aspekte helfen.

Die Verwendung vertikaler, bifazialer Systeme ist dabei in der Branche bekannt, insbesondere auch durch die ähnliche Anwendung im Bereich der Agro-Photovoltaik. Diese unterscheiden sich jedoch durch die üblicherweise deutliche geringere GCR von dem hier beschriebenen System. Durch die generelle Unsicherheit der Ertragsabschätzung aufgrund der beschriebenen Abschattungsthematik und der unbekannten Vorhersagegenauigkeit von Ertragssimulationen für vertikale bifaziale PV-Systeme, werden potenzielle Anwender abgeschreckt. Daher werden in diesem Projekt Erfahrungswerte aus Messungen präsentiert, wie auch Simulationen durchgeführt. Dies für die vertikalen Systeme in nun kommerziell erhältlichen Unterkonstruktionen und für markttypische Modulformate, aber auch im direkten Vergleich mit klassischen Systemen.

Zum Zeitpunkt des Projektbeginns gab es keine Lösungen «von der Stange», auf die ein Interessent zurückgreifen konnte. Neben der Unterkonstruktion für vertikale Module welche zudem für den Einsatz auf Gründächern geeignet sein muss, trifft dies genauso auf das Substrat und sogar das Saatgut zu, deren Eigenschaften in Kombination und hohem Wasserrückhalt und Substrattiefe die resultierende Begrünung bedingen.

Übergeordnetes Ziel dieses Projektes im Hinblick auf das PV-System ist somit zusammengefasst der Entwurf und Test eines Gesamtpakets zur Kombination von Gründach und PV mit kommerziell verfügbaren Komponenten. Potenziellen Kunden soll gezeigt werden, dass die Komponenten praxistauglich sind und welche PV-Erträge zu erwarten sind, auch im direkten Vergleich zu klassischen Ansätzen. Dabei wird das Zusammenspiel aller Komponenten betrachtet, die sich gegenseitig beeinflussen (Große Module → Unterkonstruktion → Ballastierung / Substrat / Speicherelemente → Regenwasserretention / Begrünung / Saatgut). Die Belegungsdichte der vertikalen Systeme wurde im Vergleich zum



Vorgängerprojekt erhöht, um den Gesamtertrag zu steigern, wobei zudem grössere Module in Standardformaten verwendet werden.

Neben den Resultaten mit direktem PV-Bezug hat das Projekt auf dem Dach in Mattenbach im Hinblick auf die Begrünung und die Kombination beider Aspekte Leuchtturmcharakter. Eine «ökologisch wertvolle» Begrünung bei hoher Substrattiefe und Wasserspeicherfähigkeit wird zunehmend gefordert und umgesetzt. Der stärkere Bewuchs verschärft dabei den Zielkonflikt zwischen PV und Begrünung, was den Einsatz vertikaler Module, sowie den Praxistest entsprechender Systeme, nochmals interessanter macht. Der Unterschied zu bisher typischen Begrünungen bei PV-Gründächern motiviert zudem die Untersuchung der Auswirkungen auf die Biodiversität. Dazu dient eine Erfassung der Artenzusammensetzung von Indikatororganismen mit deren ökologischen Valenz und Bedeutung für Arten- und Naturschutz respektive Förderung der einheimischen Arten.

2 Vorgehen, Methode, Ergebnisse und Diskussion

2.1 Anlagenbeschrieb PV-System, Gesamtübersicht

Die PV-Versuchsanlage wurde auf dem Dach der «alten Druckerei» in Mattenbach (Winterthur) realisiert. Die installierte beträgt insgesamt 93 kWp. Es wurden drei Modultypen des Herstellers Hevel in verschiedenen Konfigurationen, siehe Schema in Abbildung 7, eingesetzt.

- 34 Stück HJT à 330 Wp ; 60 Zellen monofazial. Portrait ; Butterfly, je 15° tilt. 1.67 m x 1 m
- 113 Stück à 390 Wp bifacial; 72 Zellen. Vertikal und Butterfly (15° tilt). 2 m x 1 m
- 148 Stück à 255 Wp bifacial; 48 Zellen. Vertikal. 2 m x 0.69 m

In den bifazialen Modulen (48 und 72 Zellen) sind die gleichen Solarzellen verbaut, sie unterscheiden sich lediglich durch die Anzahl der 24er Strings, welche jeweils in zwei Reihen a 12 Zellen angeordnet sind. Die monofazialen Module (60 Zeller mit drei 20er Strings) sind mit Heterojunction-Zellen bestückt, welche über SmartWire verbunden sind. Jeweils zwei Module sind über einen auslesbaren Optimizer verbunden.

Zusätzlich zu den verschiedenen Unterkonstruktionen (Vertikal, Portrait und Butterfly) wurde das Dach je zur Hälfte mit zwei verschiedenen Substrattypen belegt, die sich auch in ihrer Helligkeit unterscheiden. Die nördliche Dachhälfte wurde mit dem dunkleren Substrattyp belegt. Am Abschluss der nördlichen Dachhälfte wurden monokristalline 60-Zeller in Portrait und Butterfly-Konfiguration installiert. Am anderen Dachende wurden 72-zellige bifaziale Module (wie bei vertikal) auf Butterfly-Unterkonstruktionen installiert.

Die PV-Anlage sollte nicht zuletzt aus optischen Gründen an der Dachgeometrie ausgerichtet sein. Der Architekt (Zollinger Architekten Winterthur) befand die vertikalen Module, welche über die Dachkante herausragen, als hervorragend passend zum Aufbau des alten Gewerbegebäudes mit vertikalen Streben.

Auch wenn im speziellen Fall der alten Druckerei die Sichtbarkeit tatsächlich aus den genannten Gründen sogar erwünscht ist, ist sie im Allgemeinen eher als problematisch zu bewerten, wobei die Vorgaben entsprechend Art. 32a Abs. 1 RPV Raum für Interpretation lassen.

Die Ausrichtung entlang der Gebäudegeometrie führt dazu, dass die Versuchsanlage um 28° gegenüber der Südausrichtung verdreht ist, siehe Abbildung 7. Es ist somit weder eine Südausrichtung der monofazialen Anlage, aber noch weniger eine Ost/West-Ausrichtung der vertikalen Installation sowie des



Butterfly-Systems gegeben. Die vertikalen Anlagenteile zeigen somit eher eine Süd/Nord-Ausrichtung. Der Effekt der Verdrehung soll später in Simulationen erfasst werden und in die Ertragsberechnungen eingehen.

Im Vorgängerprojekt «Seniorenheim Eichgut» in Winterthur wurden sehr schmale Solarmodule mit nur zwei Modulreihen verwendet. Dies war einerseits wegen der geringeren Windlast günstig, führt aber auch zu einer geringeren Sichtbarkeit. Bei diesem Projekt werden nun grössere Module in Form von bifazialen 72-Zellern und 48-Zellern für die vertikalen Teilsysteme eingesetzt, um einerseits auch typische industrielle Moduldimension zu berücksichtigen und mit den 48-Zellern ein Zwischenformat zu testen. Grössere Formate sind im Hinblick auf den Anlagenpreis günstiger, da sich die Anzahl der notwendigen Unterkonstruktionen verringert. Der Einsatz industrietypischer Formate, wie den hier verbauten 72-zelligen bifazialen Modulen, ist aus Kostengründen offensichtlich vorzuziehen.

Die gegenseitige Verschattung ist bei vertikal installierten Modulen, wie weiter oben beschrieben, sehr ausgeprägt und insbesondere auch vom Abstand der Modulreihen abhängig. Systeme aus «höheren» vertikal montierten Modulen müssen grössere Reihenabstände haben, um gleiche prozentuale Abschattungswerte zu erhalten als schmalere Ausführungen. Bei dieser Testanlage wurden bifaziale Module mit 72 (6 x 12er Strings) und 48 (4 x 12er Strings) Zellen vertikal in «Landscape»-Ausrichtung verbaut. Die Abstände zwischen den grossen Modulen betrug knapp 2 m, entsprechend einer GCR von 50%, bei einem Abstand zum Boden von 40 cm. Bei den schmaleren Modulen wurde ein Reihenabstand von 1,25 m, entsprechend einer GCR von 55% gewählt. Die Flächenbedeckung ist somit um 10% relativ höher als im Fall der grossen Module. Der Abstand der Modulunterkanten zum Boden beträgt 30 cm.

Bei den Modulen an den schmalen Enden des Daches (monofazial Süd und Butterfly, sowie bifazial Butterfly) ist die Bestimmung einer GCR aufgrund der Gegebenheiten (wenig Reihen, Randbereiche, zahlreiche Aufbauten) schwieriger. Insbesondere bei den monofazialen Systemen mit flachem Anstellwinkel von 15° spielt aber die GCR hinsichtlich des Ertrages ohnehin keine signifikante Rolle, sie geht jedoch in die Betrachtung des flächenbezogenen spezifischen Ertrages ein. Die GCR wurde für diese Systeme auf 75% festgelegt, was ein typischer Wert für entsprechende PV-Anlagen ist und auch in etwa den Gegebenheiten im Projekt entspricht. Beim bifazialen Butterfliesystem wurde die gleiche GCR von 75% angesetzt, wobei sich durch die etwas andere Modulgrösse eine leicht veränderte spezifische Leistung pro m² ergibt.

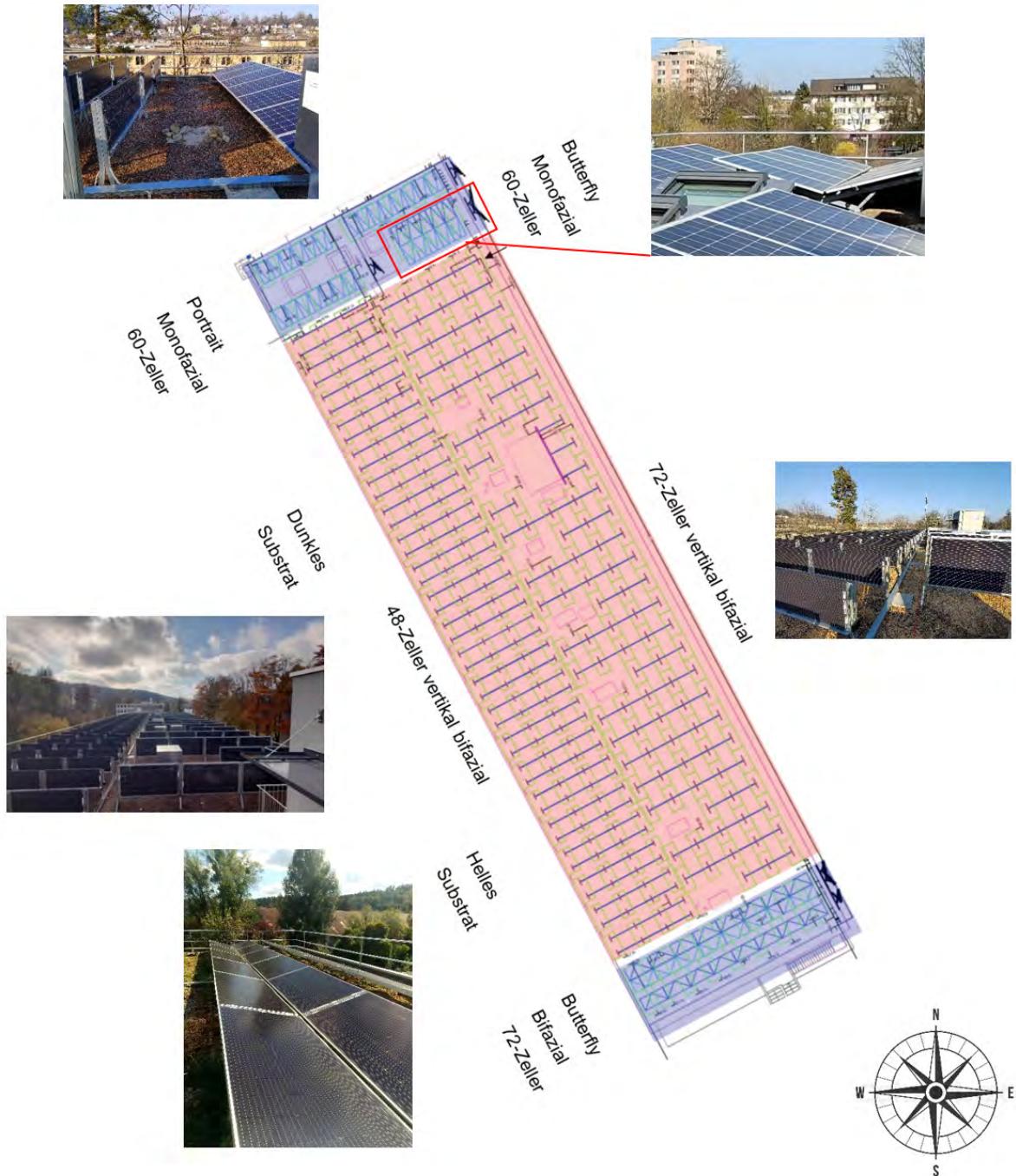


Abbildung 7: Aufbau der Versuchsanlage auf dem Dach der alten Druckerei schematisch. Die Gesamtanlage ist um 28° gegenüber der Südausrichtung verdreht.



Abbildung 8: Sichtbarkeit der Versuchsanlage vom Strassenniveau aus in Entwurf (Zollinger Architekten) und nach Realisierung.

Die Module der vertikalen Teilsysteme werden mit Unterkonstruktionen des Hersteller ZinCo AG installiert, welche zukünftig für den Einsatz auf entsprechenden Energiegründächern serienmäßig angeboten werden. Die Unterkonstruktionen sind insbesondere für einen Einsatz in Neubauten geeignet, da sie nicht einfach auf einer bestehenden Oberfläche von Bestandsbauten durch Ballastierung oder Fixierung installiert werden, sondern in der Substratschicht verankert sind.



2.2 Substrataufbau und angestrebte Bepflanzung (Saatgut)

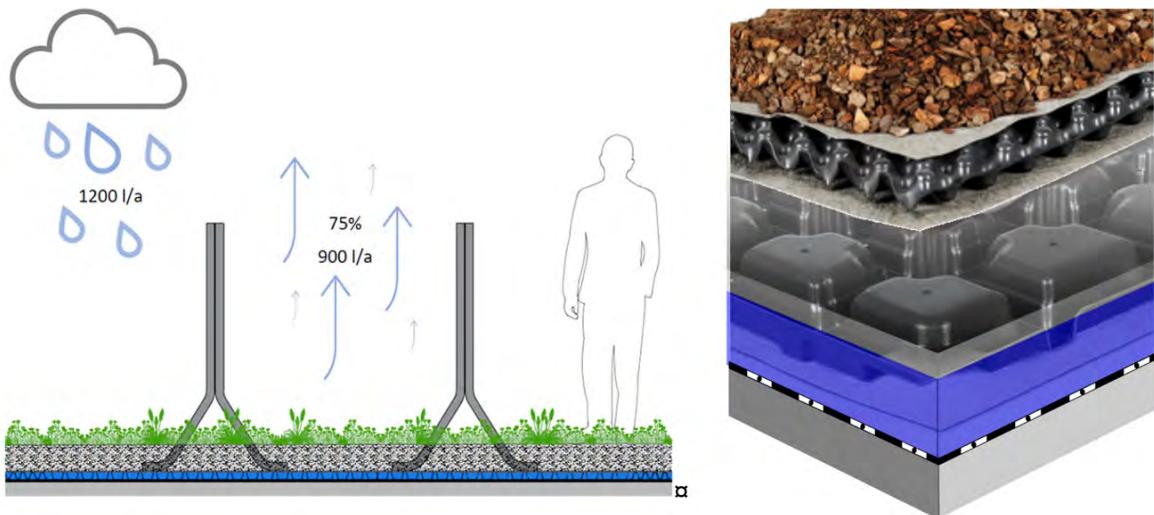


Abbildung 9: Schema der ZinCo-Unterkonstruktionen, deren Verankerung und Struktur des Substrataufbaus.

Beim System von Zinco wird mit 12.5 cm ein guter Substrataufbau erstellt, der eine hohe Speicherfähigkeit besitzt (Anm.: Vorschrift in Winterthur für extensive Dächer ist 12 cm). Dies ist einerseits günstig, um den Retentionseffekt zu maximieren und speichert andererseits Feuchtigkeit in Flüssigkeitsreservoirs für trockene Bedingungen. Verdornte Bepflanzungen können somit vermieden werden, wobei jedoch die Kosten höher liegen und auch die maximal zulässige Dachlast zu berücksichtigen ist. Beim Dach der alten Druckerei war dies kein Problem, die Dachlast betrug 160 kg/m², wobei 500 kg/m² möglich gewesen wären. Die Aufnahme der hohen Windkräfte insbesondere der vertikal montierten PV-Module ist aufgrund der Masse des Substrataufbaus kein Problem.

Als Substratmaterial (Weiss + Appetito) wurde bewusst ein helleres und ein dunkleres Material im Vergleich ausgewählt. Dies geschah vor dem Hintergrund der Erfahrungen aus dem Vorgängerprojekt, bei welchem zeitweise die Begrünung die Dachfläche nur zum Teil bedeckte, wodurch dem Reflexionsvermögen des Substrates durchaus eine Bedeutung zukommt. Andererseits beeinflusst das Substrat das Wachstum der Begrünung selbst, muss daher auch zum Saatgut passen und stellt einen Kostenfaktor dar. Es wurden 190 t (170 m³) Substratmaterial und 20 t (12 m³) Kies eingesetzt.

Für die Bepflanzung wurde Saatgut (UFA) vorgesehen, welche für die Gegebenheiten auf einem Energiedach gut geeignet ist. Das bedeutet, dass niedrigwachsende, hitze- und trockenheitsresistente Pflanzen ausgesät werden. Zwei verschiedene Saatgutmischungen wurden auf dem Gründach ausgebracht.

Eine der Mischungen bestand aus vorwiegend hartlaubigen Pflanzen mit Tendenz «silberfarbig». Diese hellere Färbung der Blätter weist auch auf Anpassungen in der Natur hin, welche den Albedoefekt nutzt, um die Erwärmung der Blattoberflächen und damit auch des Wasserverlust durch Verdunstung zu reduzieren. Das reflektierte Spektrum von Pflanzen hängt jedoch grundsätzlich von zahlreichen Faktoren ab und ist nicht ausschliesslich an der Farbe der Pflanze abzuleiten. Es ist davon auszugehen, dass sich die Vegetation durch Zuflug im Laufe der Zeit stark verändert, dennoch wird sich eine angepasste Vegetation länger halten als ungeeignete Pflanzen. Zusätzlich zur eigentlichen Begrünung wurden 15 Biodiversitätsinseln aufgebaut, insbesondere in Form von Totholz zur Ansiedlung von Wildbienen. Auf einem Nebendach ohne PV wurde zu dem ein Teich angelegt.



Abbildung 10: Totholzinsel zur Ansiedlung von Wildbienen und Detailaufnahme der Dachbegrünung mit niedrigwachsender Bepflanzung.

Das Erscheinungsbild der Begrünung änderte sich während der kurzen Beobachtungszeit bereits deutlich. Im Frühjahr fiel auf, dass der Bewuchs auf dem dunklen Substrat deutlich stärker einsetzte und dichter ausfiel. Bis zum Juni glich sich die Dichte des Bewuchses auf beiden Bereichen insgesamt an, wobei lokal auf beiden Dachflächen grosse Unterschiede in Dichte und Art des Bewuchses zu beobachten sind. Beispiele werden weiter unten mit Bezug zu den PV-Erträgen gezeigt. Die geplante niedrig wachsende Bepflanzung mit ihrem charakteristischen Aussehen ist in einigen Bereichen vorhanden, während in anderen Bereichen eine für dieses Dach eher typische Begrünung vorherrscht, wie im linken Bild der Abbildung 10 beispielhaft gezeigt.

2.3 Messung und Untersuchung des PV-Ertrages

Um einen direkten Vergleich der verschiedenen Modul- und Installationstypen der PV-Versuchsanlage zu erleichtern, wurde eine Maske zur Visualisierung erstellt. Dies ermöglicht einerseits eine direkte visuelle Erfassung der unterschiedlichen Erträge zu jedem Zeitpunkt oder Zeitabschnitt. Andererseits können so aber auch Abschattungseffekte auf dem realen, nicht-idealen Dachsystem verfolgt werden. Beides wird im Folgenden demonstriert.

Die Visualisierung greift auf eine Datenbank zurück, in welcher die Messdaten aller Module erfasst sind. Die Maske ermöglicht die Darstellung der einzelnen Modulwerte zu jedem beliebigen Zeitpunkt, es können aber auch beliebige Zeitintervalle gewählt werden, bis hin zur Auswertung aller vorhandener Daten. Über die Maske können die Erträge räumlich den jeweiligen Modulen, und somit auch dem Systemtyp zugeordnet werden, wobei jeweils zwei Module über einen auslesbaren Optimizer verbunden sind. Die Genauigkeit der Messung ist somit geringer als beim Vorgängerprojekt, jedoch wird eine grössere Anzahl von Modulen und Positionen erfasst. Dies wird auch genutzt, um lokale Störungen und Eigenschaften zu erfassen und zu berücksichtigen.

Über eine bedingte Formatierung werden die Erträge den jeweiligen Modulen vergleichend dargestellt. Je intensiver der Grünton, desto höher ist der dargestellte Ertrag im ausgewählten Zeitfenster relativ zu den anderen Modulen, je blasser der Farbton, umso geringer. Verschiedene Darstellungen sind möglich, wobei auch noch weitere Ausgabegrössen definiert werden können. Untersucht wurden:

- Spezifischer Ertrag in kWh/kWp
- Energieertrag pro Fläche (flächenbezogen) in kWh/m²



Beispielhaft wird in der untenstehenden Abbildung die Darstellung des spezifischen Ertrags [kWh/kWp] für den Monat Juli 2022 gezeigt. Man sieht direkt aus der Farbgebung und der Position, dass die Systeme am jeweils schmalen Ende des Daches, also die Butterfly- und Portrait-Installationen einen höheren spezifischen Ertrag erzielen, als die vertikalen Systeme. Die spezifischen Erträge der vertikalen Systeme (gross, klein, hell, dunkel) unterscheiden sich nur wenig, wobei jene auf dem hellen Substrat tendenziell etwas höhere spezifische Erträge liefern.

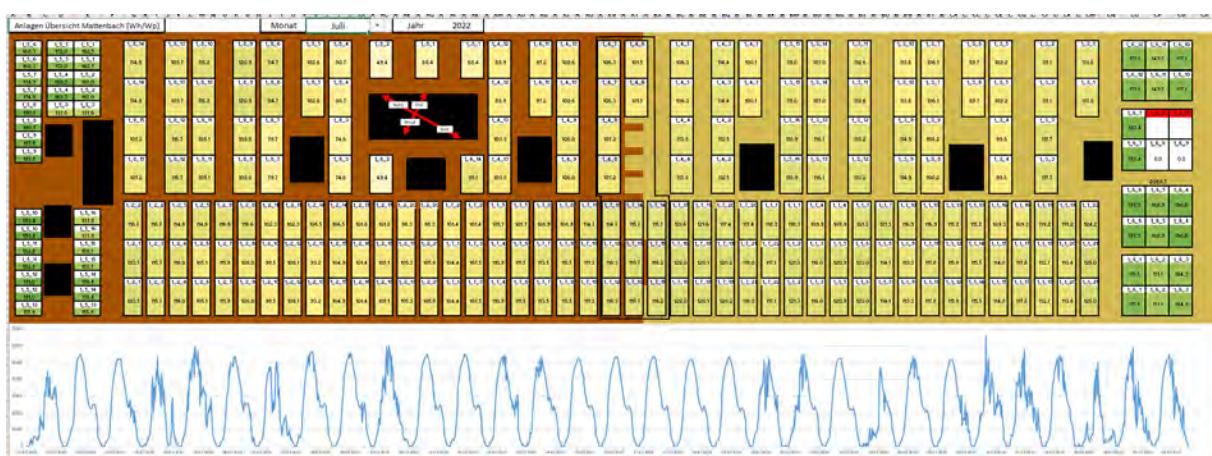


Abbildung 11: Beispielhaft dargestellt ist die Ausgabe des spezifischen Ertrags für den Juli 2022. Durch die farbliche Darstellung ist der lokal erzielte spezifische Ertrag relativ zu den anderen Systemvarianten erkennbar. Im unteren Bereich kann die Einstrahlung der einzelnen Tage am dargestellten Systemgesamtertrag abgelesen werden. Dadurch können Einstrahlungsbedingungen gezielt ausgewählt und eingegeben werden.

Zusätzlich zur Ausgabemaske können noch weitere Informationen eingeblendet werden. Eine Möglichkeit ist die Ausgabe der Systemgesamterträge für alle Tage im dargestellten Zeitraum. Dies ermöglicht die gezielte Auswahl von Einstrahlungsbedingungen, die dann eingegeben und analysiert werden können. Daneben wird direkt durch die Betrachtung ein Eindruck erhalten, wie die Wetterbedingungen in diesem Zeitraum waren. Beim Beispiel in obiger Abbildung ist direkt ersichtlich, dass im Juli 2022 «Clear-Sky»- Bedingungen vorherrschten.

Die Auswertemethode mit der farblichen Abstufung erlaubt ein filmartiges Durchlaufen von Zeitabschnitten. Dies ermöglicht beispielsweise die Beobachtung des Leistungsverlaufes über einen Tag oder auch die Identifizierung von Verschattungssereignissen. Dies wird angewandt, um beim Ertragsvergleich abgeschattete Bereiche zu berücksichtigen, da ein quantitativer Vergleich der Teilsysteme sonst verfälscht würde.

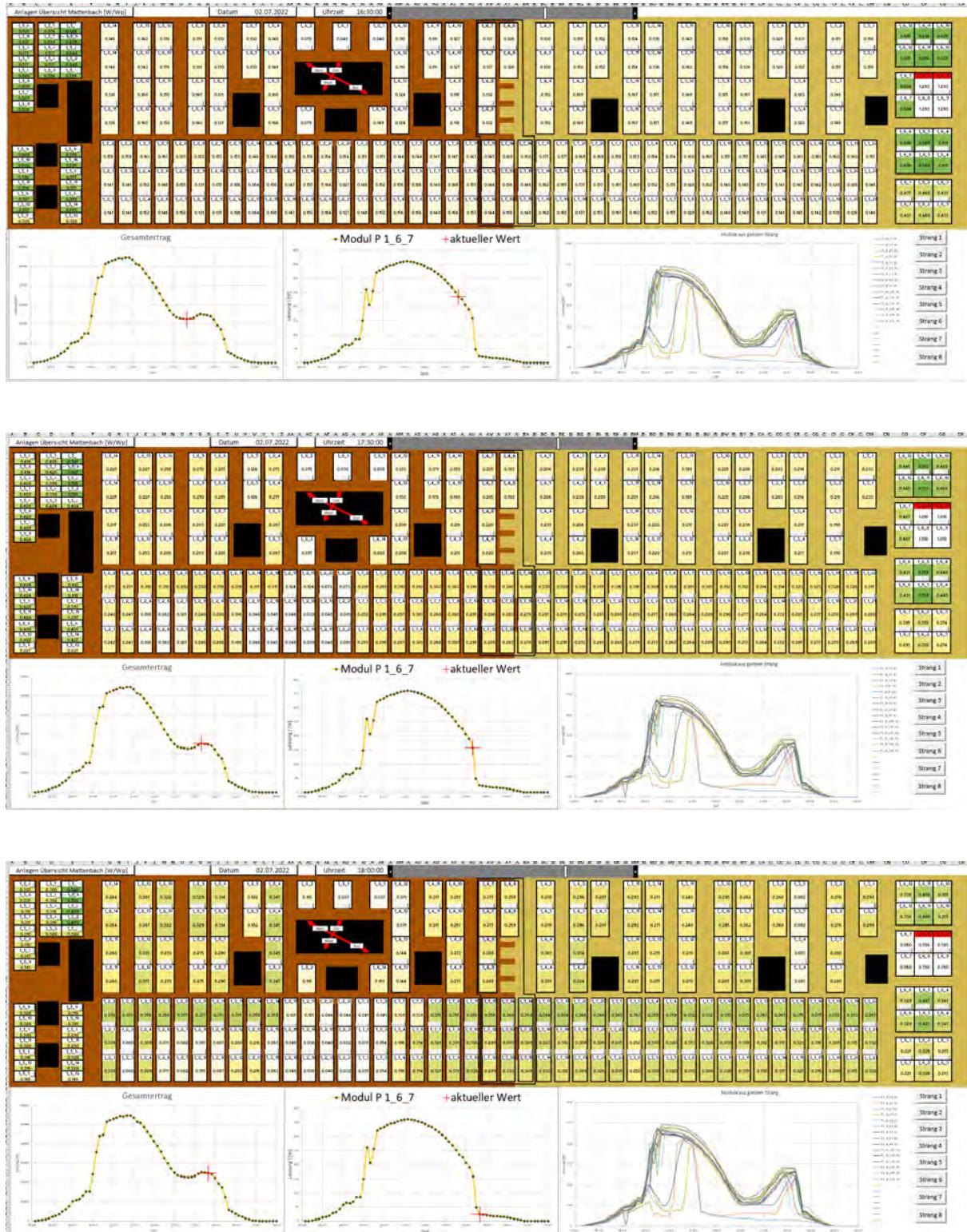


Abbildung 12: Zeitlicher Verlauf der spezifischen Leistung am 02.07.2022 zwischen 16:30 Uhr und 18:00 Uhr, anhand von drei Momentaufnahmen (mittleres Bild 17:30 Uhr).



In Abbildung 12 wird dies am Beispiel des spezifischen Ertrages am 02.07.2022 anhand von drei Momentaufnahmen (16:30: 17:00 und 18:00 Uhr) gezeigt. Man sieht in den farbig formatierten Dachschemata insbesondere einerseits die starke Abschattung der kleinen vertikalen Module auf der Dachseite mit dunklem Substrat, andererseits die relative Zunahme des Leistungsanteils der vertikalen Module im Vergleich zu den Standardsystemen bei niedrigerem Sonnenstand. Im unteren Bildbereich, jeweils unterhalb der drei schematischen Dachdarstellungen, ist links die Gesamtleistung des Systems und in der Mitte die Leistung eines beliebig ausgewählten Einzelmoduls im Tagesverlauf gezeigt, wobei die abgebildete Uhrzeit im farbig abgestuften Bildbereich als rotes Kreuz dargestellt wird. Die jeweils rechte Darstellung gibt die Leistungen der Einzelmodule eines beliebig ausgewählten Strings wieder.

Die Messungen werden auch dazu benutzt, um die Vorhersagegenauigkeit von PV-Simulationstools für verschiedene Systemauslegungen (z.B. Vertikal und Butterfly) zu validieren und zu vergleichen. Zur Simulation werden das in der Branche allgemein bekannte Schweizer PVsyst-Simulationstool, sowie die neuere PVcase-Software eingesetzt. Letztere basiert auf einer komplexeren Berechnung der Einstrahlungsverhältnisse («ray-tracing»), was im Fall von Dachsystemen zur Erfassung von Randeffekten bei PV-Anlagen limitierter Grösse vorteilhaft sein könnte. Um die simulierten Erträge mit den Messungen vergleichen zu können wurden Wetterdaten verwendet, welche auf dem nur wenig entfernten Dach des ZHAW-Gebäudes gemessen wurden.

2.4 Ökofaunistische Untersuchungen im Projekt

Um einen Vergleich der ökologischen Qualität unterschiedlicher Dachbegrünungen im Bereich Biodiversität anstellen zu können kann eine Indikator-Tiergruppe ausgewählt werden. Es stellt sich die Frage ob und wie sich begrünte Dachflächen ohne Solarenergienutzung im Vergleich zu Flächen mit Belegungen durch Solarmodulen bezüglich der Artenvielfalt unterscheiden. Die Indikator-Tiergruppe muss die unterschiedlichen Standortgegebenheiten aufzeigen können, wie Bewuchs (Dichte und Artenzusammensetzung), Substrateigenschaften, Pflegemassnahmen (Bewässerung) sowie den Bezug zu natürlichen Lebensräumen/Vorkommen der Art. Als geeignet erweist sich hier die Gruppe der Käfer. Käfer repräsentieren die absolut artenreichste Gruppe der Insekten, welche ihrerseits die artenreichste Klasse der Tiere darstellen.

Es kann angenommen werden, dass Käfer (Coleoptera) begrünte Dachflächen nur in Ausnahmefällen nicht auf dem Luftweg erreichen. Im Gegensatz zu verschiedenen anderen Tiergruppen können Käfer mit ihren Flügeln in der Regel aktiv Fliegen und so mehr oder weniger auch neue Lebensräume einnehmen. Denkbar sind daneben auch passive Verdriftungen durch Wind oder ein Besatz mit dem Aufbringen des Substrates für die Begrünungen.

Bodenorganismen wie bspw. Käfer können mit einfachen Bodenfallen (Barberfallen) quantitativ abgesammelt werden (Abbildung 13). Barberfallenfänge repräsentieren dabei die Laufaktivität der Bodentiere und können nicht zur Siedlungsdichte hochgerechnet werden, da ein Individuum nur dann gefangen werden kann, wenn es sich bewegt und die Beweglichkeit einer Art nicht in direktem Verhältnis zu ihrer Abundanz steht. Allerdings können Mengenunterschiede der einzelnen Arten auf verschiedenen Flächen als relative Abundanzdifferenzen dieser Arten gewertet werden.

Die speziell eingerichteten Kleinhabitate mit Totholz sowie grösseren Steinen wurden nicht in einem gesonderten Untersuchungsansatz beprobt. Die räumliche Nähe zu den Hauptuntersuchungsflächen zwischen den PV-Modulen ist zu gering, mobile Organismen wie Käfer können sich gut von einem in das andere Habitat bewegen und sind deswegen nicht klar zuordnungsbar.



Abbildung 13: Skizze Anordnung Käferfallen. Die Käferfallen wurden zufällig auf dem Dach verteilt und im Boden integriert. Einige Fotos zeigen die Fallen und die Fangresultate. Bilder: T. Malikan

Als Fang- und Konservierungsflüssigkeit wurde eine auf 10 % verdünnte Essigsäure verwendet, ergänzt mit ein paar Tropfen Geschirrspülmittel zur Verminderung der Oberflächenspannung der Flüssigkeit. Die Fallen wurden in einem Rhythmus von 14 Tagen kontrolliert und geleert. Fangperiode war 1. April bis 31. Oktober 2022.

2.5 Erfassungen der Biodiversitäts-Indikatoren - Flora

Den Lebensraum auf einem begrünten Dach können im Wesentlichen nur Moose, Flechten oder Pflanzenarten besiedeln, die spezielle Anpassungsmechanismen und Überlebensstrategien besitzen. Ihr natürliches Vorkommen ist in der Regel auf Trocken- und Pionierstandorten wie Fels- und Felsgrusfluren oder an dynamisch geprägten Flussufern. Dazu gehören sogenannte winterannuelle Pflanzen, die über den Winter keimen und sich im feuchten Frühjahr bis zur Samenreife entwickeln. Zwei- und mehrjährige Pflanzen haben zum Teil morphologische (Sclerotisierung, Versenkung der Stomata, wasserspeichernde Organe) oder physiologische (Schutzpigmente) Anpassungen.

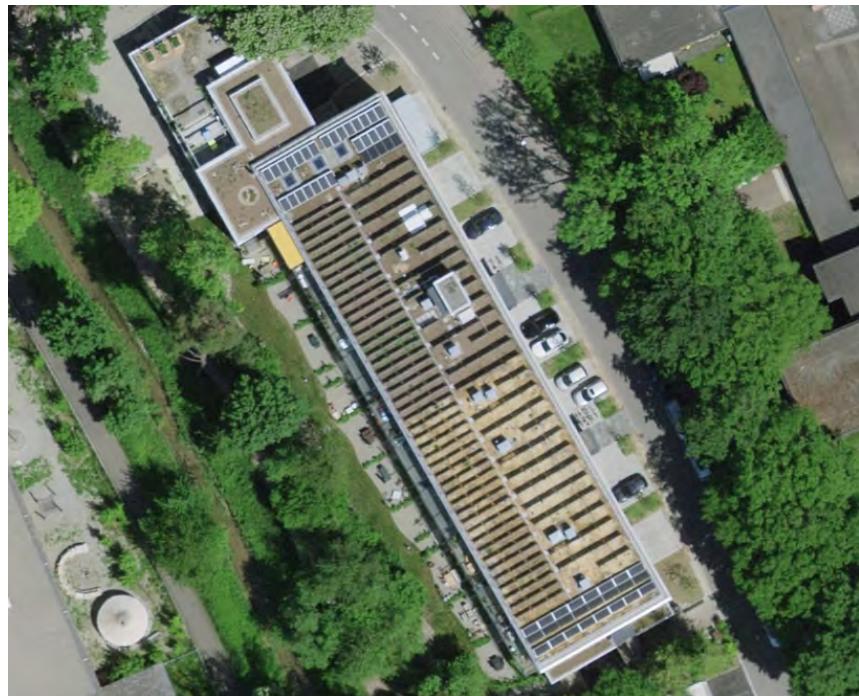


Abbildung 14: Luftbild der Versuchsanlage Mattenbachstrasse mit den sichtbaren Einrichtungsdetails und zwei Substrattypen mit unterschiedlicher Helligkeit / Albedo. Quelle: Swissimage 2022

Grundsätzlich werden die Einflussmöglichkeiten der vegetationstechnischen Planung primär basierend auf die Saatgutverwendung auf die Vegetationsentwicklung von Dachbegrünungen als relativ gering eingestuft. Am wirksamsten erweist sich die Steuerung durch den Wasserhaushalt im Substrat und im Begrünungsaufbau. Dieser hängt von der Schichtdicke, vom Dachgefälle sowie von der Wasserkapazität des Substrates ab. In unterschiedlichen Klimaregionen können sich dabei unter analogen Substratvoraussetzungen verschiedene Vegetationszusammensetzungen entwickeln. Werden Dachbegrünungen in Kombination mit Solarmodulen eingerichtet ergeben sich stark abweichende Standortbedingungen im Vergleich zu Dachbegrünungen ohne technische Anlagen. Die Beschattung und die dadurch verringerte Verdunstung verändert die Wuchsbedingungen, welche zusätzlich verändert werden durch den Wasserzufluss auf teilweise sehr kleinräumige Situationen bei Tropfunterkanten von PV-Modulen.

Das vorliegende Dach wurde für die Vegetationsanalysen in 6 Bereiche aufgeteilt, ausgehend vom vorhandenen Substrat und der Ansaatmischung:

1. Liegende monofaziale PV NNW (Plot 21-24)
2. Liegende monofaziale PV SSO (Plot 17-20)
3. Aufgeständerte bifaziale PV dunkles Substrat Ansaat 1 (Plot 1-4)
4. Aufgeständerte bifaziale PV dunkles Substrat Ansaat 2 (Plot 5-8)
5. Aufgeständerte bifaziale PV helles Substrat Ansaat 1 (Plot 9-12)
6. Aufgeständerte bifaziale PV helles Substrat Ansaat 2 (Plot 13-16)

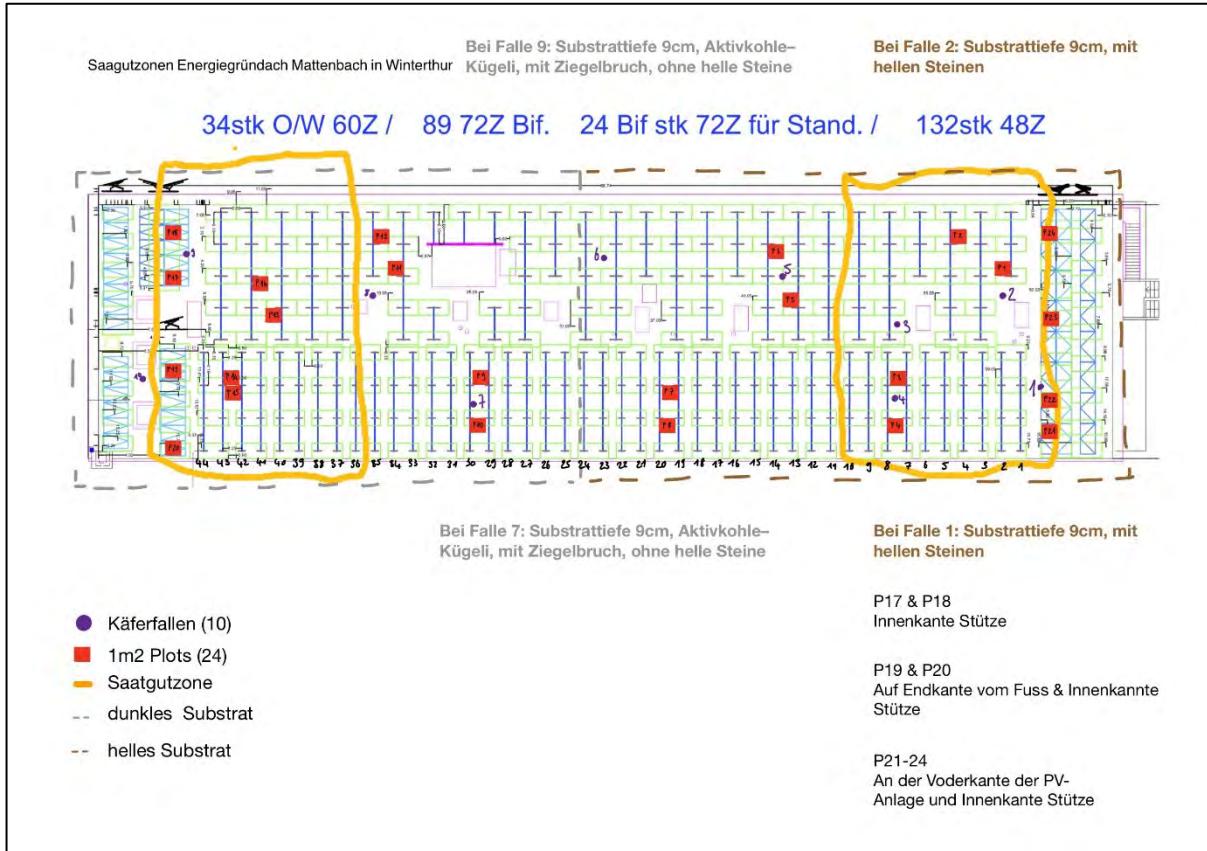


Abbildung 15: Auf dem Anordnungsplan der PV-Anlagen sind die aufgenommenen Vegetations-Plots wie auch die installierte Käferfallen ersichtlich. Des Weiteren sind die Zonen gelb umkreist, welche Ansaaten aufweisen. Zudem ist der Bereich mit dunklem Substrat grau und der Bereich mit hellem Substrat braun gestrichelt.

Die im Rahmen der Untersuchung erfassten Plots wurden auf den Plan (Abbildung 15) eingezeichnet, um künftige Wiederholungsaufnahmen zu ermöglichen. Insgesamt wurden 24 Plots von 1 m x 1 m aufgenommen. Die Kartierungen fanden am 23. und 24. August 2022 statt. Das Dach wurde in sechs Bereiche aufgeteilt. In jeden Bereich wurden jeweils 4 Plots aufgenommen, damit statistische Aussagen machbar sind. die Plots wurden zufällig gewählt.

Es wurde pro Plot jeweils erfasst:

- Artenzahl
- Deckung in Prozent

Für die Auswertung wurden Zeigerwerte nach Landolt 2010 [20] und Rote Liste Arten (CH rote Liste 2016) [21] verwendet. Ebenfalls würde vermerkt, ob die gefundene Pflanze angesät oder spontan angesiedelt wurde.



Abbildung 16: Plot 1 m x 1 m zwischen den aufgeständerten PV-Anlagen (links) und Plot 1 m x 1 m unter den liegenden PV -Anlagen (rechts). Fotos: L. Dierckx

2.6 Erfassungen der Wasserrückhaltung

Mit der Erfassung der Wasserrückhaltung kann auf der einen Seite ermittelt werden, in welchem Umfang die Siedlungsentwässerung entlastet wird sowie in zweiter Linie, welche Kühlwirkung in etwa erwartet werden kann auf die Umgebungstemperaturen aufgrund der Verdunstungskälte.

Im Kontext von Kombinationsanlagen Dachbegrünung und PV-Solarenergie ist der Faktor Wasserspeicherung von grosser Bedeutung, weil diese Grösse wesentlich das Pflanzenwachstum sowie auch die Förderung der Biodiversität steuert und so auch zu Problemen führen kann, wenn Pflanzen an gewissen Stellen zu Schattenwirkungen und Ertragsausfällen führen. D.h. eine Maximierung der Wasserrückhaltung kann zu Problemen führen bei nicht ideal eingerichteten Anlagen. Im vorliegenden Projekt soll ermittelt und aufgezeigt werden, wie eine optimierte Wasserspeicherung zu einer hohen Artenvielfalt beitragen kann bei einer effizienten, den Pflegeaufwand minimierenden Unterhalt.

Substrate von Dachbegrünungen nehmen einfallende Niederschläge bis zur Sättigung auf. Das überschüssige Wasser, welches in den Luftporen kurzzeitig gespeichert wird, wird über die Dachentwässerung abgeführt. Über die Verdunstung und Transpiration der Pflanzen erfolgt danach eine Rückführung des gespeicherten Wassers (nutzbare Feldkapazität/pflanzenverfügbares Wasser) in die Atmosphäre. Dadurch gelangt weniger Wasser in das Dach- und Siedlungsentwässerungs-System als bei einem Kiesdach oder Flachdach ohne Belag.

Mit der Wasserspeicherung im Substrat tritt als weiterer Effekt eine Verringerung und Verzögerung der Abflussspitzenwerte bei stärkeren Niederschlägen auf. Bei dünnsschichtigen, wenig speicherfähigen sowie grobporen Substratauflagen reduziert sich dieser Effekt aufgrund des beschleunigten Durchflusses durch das Substrat. In der Summe und über grössere Einzugsgebiete hinweg kann durch die Begrünung von Dächern auf diese Weise ein Beitrag zur Verminderung der negativen Wirkungen von Hochwasserereignissen geleistet werden.

Eine wesentliche Grösse im Bereich der Berechnungen von Liegenschaftsentwässerungen ist der Abflussbeiwert. Der Abflussbeiwert gibt den Teil des Niederschlagswassers an, der nach einem Regen abfließt. Ein Abflussbeiwert von 1 entspricht einer Oberfläche, welche über keine Wasserspeicherung verfügt, d.h. 100% des eingefallenen Regenwassers wird in die Kanalisation abgeführt, ein Abflussbeiwert von 0.5 entspricht einer Wasserrückhaltung von 50% im Jahresverlauf. Für Dachbegrünungen gilt der Abflussbeiwert von 0.7 bei einer Substratschichtdicke unter 10 cm sowie von 0.4 ab 10-25 cm und > 25 cm ist der Abflussbeiwert 0.2 (siehe Tabelle).



Zur Ermittlung des Abflussbeiwertes der Versuchsanlage Mattenbachstrasse wurde die Substratschichtdicke sowie die Dicke der unterliegende Wasserspeicherelemente bemessen.

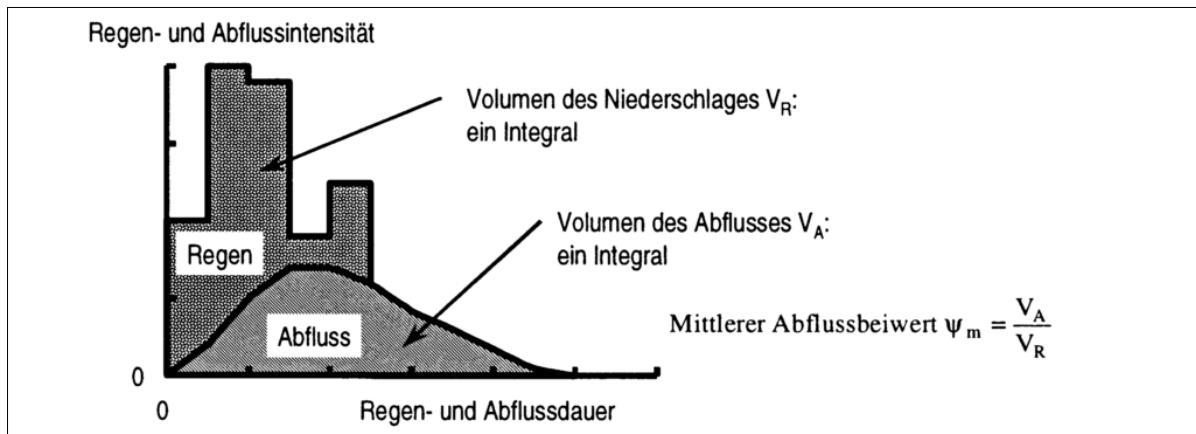


Abbildung 17: Definition des mittleren Abflussbeiwerts. Quelle: VSA 2022

Tabelle 1: Abflussbeiwert verschiedener Oberflächen. Quelle: FLL, Dachbegrünungs-Richtlinie

Bezeichnung	Fläche A [m ²]	Abflussbeiwert ψ [-]
Dächer		
Schrägdach Ziegel	-	0.90
Schrägdach Blech, Eternit, Glas	-	0.95
Flachdach begrünt (Aufbaudicke kleiner 10 cm)	-	0.70
Flachdach begrünt (Aufbaudicke 10 cm bis 25 cm)	-	0.40
Flachdach begrünt (Aufbaudicke grösser 25 cm)	-	0.20
Flachdach Kies	-	0.65
Flachdach Blech / Beton	-	0.80
Plätze / Wege		
Asphaltbeläge / Beton	-	0.90
Sickerasphalt	-	0.60
Pflästerung / Betonverbundsteine (geschlossene Fugen)		0.80
Pflästerung / Betonverb.st. (Splittfugen; Fugenanteil mind. 10%)	-	0.50
Pflästerung / Betonverb.st. (Splittfugen; Fugenanteil mind. 20%)	-	0.10
Sickersteine (wasserdurchlässige Pflastersteine)	-	0.10
Chaussierung (Kies)	-	0.60
Schotterrasen	-	0.30
Rasengittersteine	-	0.30

2.7 Ermittlung Aufwand Pflege und Wartung

Bei vielen Kombinationsanlagen von Dachbegrünungen und PV-Solaranlagen ergeben sich aufgrund von planungstechnischen Detailfehlern ein relativ hoher Aufwand bei der Pflege. Die Planungsfehler sind in der Regel nicht geschlossene Lücken zwischen den PV-Modulen, welche im Laufe der Vegetationsentwicklung von Pflanzen durchwachsen werden können. Diese Stellen sind pflegetechnisch in der Regel sehr ungünstig gelegen und die Pflanzen können nur mit einem erhöhten Aufwand beim Unterhalt entfernt werden, um Schattenwirkungen und somit Ertragseinbussen zu vermeiden.



Im Rahmen des vorliegenden Projektes soll der Pflegeaufwand der vertikal aufgeständerten Solaranlage ermittelt werden durch:

- Erfassung der Pflanzenbiomasse
- Erfassung der Arbeitsstunden für die Entfernung der kritischen Pflanzenbiomasse
- Ermittlung von Vergleichswerten zu weiteren Einrichtungstypen

2.8 Ertragsmessungen an PV-Systemen

In Abbildung 18 sind die Messdaten des spezifischen Ertrages [kWh/kWp] des ersten Betriebsjahres für die einzelnen Systemtypen (siehe auch Abbildung 7) zusammengefasst dargestellt. Links werden die zwei monofazialen Teilsysteme in Butterfly- und Südausrichtung durch einen roten und grünen Balken repräsentiert. Die vier Balken im mittleren Bereich stellen die bifazialen vertikalen Systeme dar, wobei sich der Zusatz «Gr» und «Kl» auf die grosse und kleine Modulausführung mit 72 und 48 Solarzellen bezieht. Der Balken ganz rechts bezieht sich auf das bifaziale Butterfly-System. Die Zusätze «H» und «D» bei allen Balken zeigen an, ob sich die Teilsysteme auf hellem oder dunklem Substrat befinden.

Die Balken und die angefügten Zahlenwerte geben die mittleren spezifischen Jahreserträge an. Die Schwankungsindikatoren an den Balken stehen für den Bereich zwischen grösstem und kleinstem Messwert innerhalb der Teilsysteme. Je nach Position auf dem Dach werden die Teilsysteme unterschiedlich verschattet (siehe z.B. Abbildung 11), was sich entsprechend bei den Schwankungsindikatoren widerspiegelt. Extrem verschattete Bereiche mussten teilweise aus der Betrachtung herausgenommen werden, um die Mittelwerte nicht zu sehr zu beeinflussen. Ein anderer Ansatz des Systemvergleichs könnte darin bestehen nur die Maximalwerte, also die Bereiche mit der geringsten Verschattung, zum Vergleich auszuwählen, was allerdings Teilsysteme in wenig verschatteten Randbereichen bevorzugt würden.

Eine ausführliche Darstellung der einzelnen Monate von Februar 2022 bis Januar 2023 in der in Abbildung 18 gezeigten Form ist im Anhang 7.1 beigelegt. Auf weitere Messjahre wurde verzichtet, um den Bericht nicht unnötig in die Länge zu ziehen.

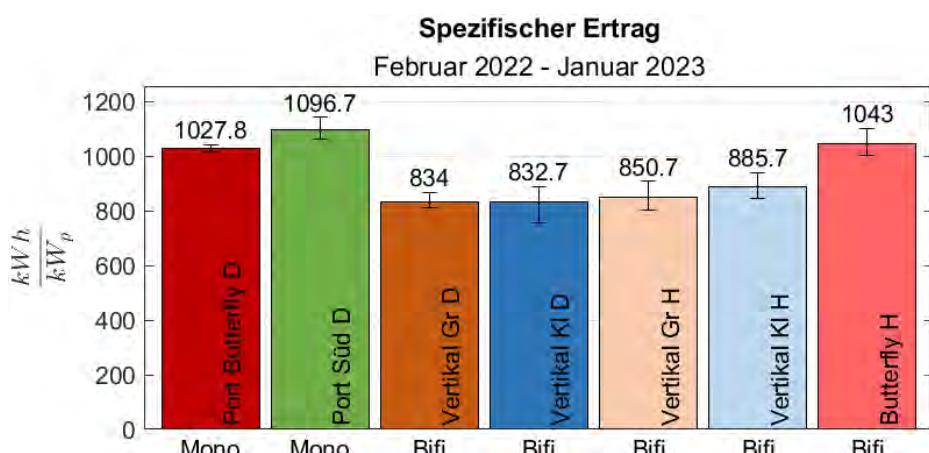


Abbildung 18: Übersicht über die spezifischen Erträge [kWh / kWp] über die einzelnen Systemtypen gemittelt für das erste Jahr der Messdaten.

Bei der Betrachtung über das gesamte Jahr ist der erwartete geringere spezifische Ertrag der vertikalen Systeme direkt erkennbar. Die eher klassischen, nicht-vertikalen Butterfly-Systeme liegen im Vergleich dazu höher und werden von dem südausgerichteten System nochmals etwas übertroffen. Je nach zum



Vergleich ausgewähltem Teilsystem liegt der Ertrag der vertikalen Systeme im Bereich von 71 %-86 % der klassischen Ausführungen. Auf die enge Staffelung der vertikalen Systeme (ca. 50 % GCR) und den Einfluss auf den spezifischen Ertrag wurde bereits mehrfach hingewiesen. Über deutliche Unterschiede von Jahr zu Jahr wird in späteren Abschnitten berichtet.

Beim direkten Vergleich der Butterfly-Systeme (mono- und bifazial) zueinander ergibt sich ein «bifacial gain» von gut 1.5 %, was aufgrund der Gegebenheiten mit geringer Albedo plausibel ist. Ebenfalls plausibel ist der nochmals etwas höhere Ertrag der südausgerichteten monofazialen Module. Aufgrund der gleichen Kippwinkel und der verdrehten Ausrichtung zwischen Nord-Süd und Ost-West aufgrund der Dachorientierung sind keine grossen Unterschiede zu erwarten. Dennoch bewirkt die verdrehte «Süd-Ausrichtung» immer noch einen höheren Ertrag als er durch das Butterfly-System erreicht wird.

Beim direkten Vergleich der Systeme muss nochmals erwähnt werden, dass drei verschiedene Modultypen eingesetzt wurden, wobei bei zwei der sieben Systeme monofaziale Solarzellen verbaut sind. Dabei fällt nicht nur der zusätzliche Ertrag der Rückseite weg, sondern auch die Technologien bei der Herstellung sind verschieden, was zu unterschiedlichen Eigenschaften der Zellen führen kann (Temperaturkoeffizienten, spektrales Verhalten, usw.). Durch die Betrachtung der spezifischen Erträge in kWh/kWp werden die Unterschiede nivelliert, können aber nicht ganz ausgeschaltet werden. Während bei allen bifazialen Modulen dieselben Zellentypen eingesetzt wurden, unterscheiden sich diese Module dennoch im Aufbau, da ein grösserer und ein kleinerer Modultyp mit je 72 bzw. 48 Zellen realisiert wurde. Auch hier wird ein direkter Vergleich erst durch das Betrachten des spezifischen Ertrages in kWh/kWp sinnvoll. Aus Gründen der mechanischen Stabilität erhielten die grösseren Module einen durchgehenden umlaufenden Rahmen um das Laminat und sind zudem in der Unterkonstruktion nochmals in einen umlaufenden Rahmen eingebaut (Abbildung 19). Die kleineren, schmalen Module werden zur vertikalen Montage nur an den Seiten mit der Unterkonstruktion verbunden und erfahren so an der Modul-Oberkante keine Abschattung durch einen Rahmen.



Abbildung 19: Die grossen bifazialen Module mit 72 Zellen haben sowohl einen umlaufenden Rahmen an jedem Modul wie auch einen zusätzlichen Rahmen der Unterkonstruktion (rechte Abbildung), der bei den grossen Modulen zu zusätzlicher Verschattung an der Oberseite führt. Bei den schmalen Modulen mit 48 Zellen fehlen diese Abschattungselemente an der Oberseite.

Tatsächlich zeigt sich bei den monatlichen Auftragungen und auch bei den Ertragswerten des ersten Betriebsjahres eine typische Staffelung bei den vier vertikalen Systemen, wobei die schmalen 48 Zeller (blaue Balken, jeweils mit Kürzel «KI» für Klein in Abbildung 18) zum Teil ähnlich grosse und etwas höhere Erträge erzielen. Dabei ist zu erwähnen, dass diese schmalen Module mit einer GCR von 55 %

aus planungstechnischen Gründen sogar enger stehen als die grossen Module mit einer GCR von 50 %, was immerhin einem relativen Unterschied von 10 % entspricht.

Bei der monatlichen Auftragung des spezifischen Ertrags [kWh / kWp] über den Jahresverlauf in Abbildung 20, zeigt sich in den Sommermonaten eine deutlich ausgeprägte Trennung zwischen den vertikal installierten PV-Systemen und jenen mit flachem Neigungswinkel, wobei die Details der Systemtypen eine eher untergeordnete Rolle spielen. In den Monaten März bis August liegt der spezifische Ertrag der vertikalen Installationen dabei deutlich niedriger als bei den konventionelleren Systemen, mit einer maximalen Differenz im Hochsommer. Weiter zeigt sich qualitativ eine Teilung in zwei Segmente sehr ähnlicher Dauer im Jahresverlauf, wobei die spezifischen Erträge aller Teilsysteme zwischen Mitte September und Ende März relativ dicht beieinander liegen.

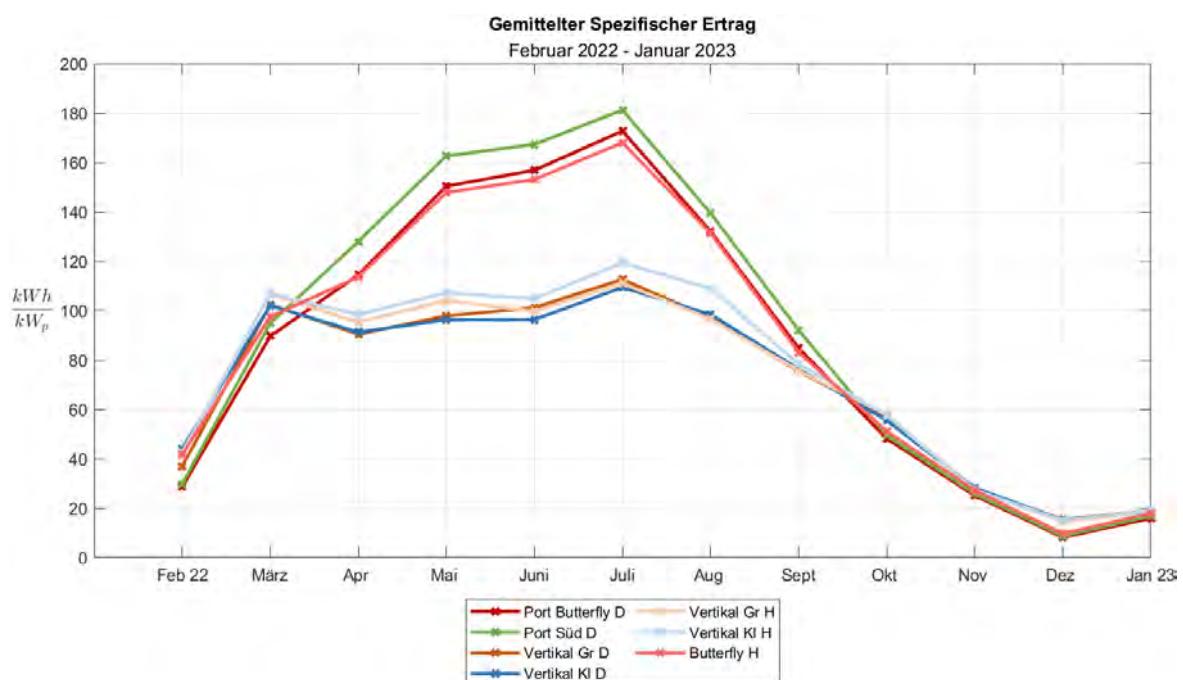


Abbildung 20: Monatliche Betrachtung der spezifischen Erträge [kWh/kWp] des ersten kompletten Messjahres von Februar 2022 bis Januar 2023 für die verschiedenen Teilsysteme im Vergleich. Die Ertragskurven der vertikalen und der konventionellen Systeme bilden zwei charakteristische Kurvenscharen, die sich im Sommer klar unterscheiden, (geringere spez. Erträgen der vertikalen Systeme mit einer GCR von ca. 50 %);

In Abbildung 21 werden die saisonalen Unterschiede und deren Einfluss auf den Jahresgesamtertrag nochmals genauer untersucht. Drei Beispielmonate (August, Oktober und Dezember) werden mit gleicher Skalierung gezeigt.

Die hohen spezifischen Erträge in den Sommermonaten dominieren den Gesamtertrag über das erste Messjahr. Die Verteilung über das gesamte Jahr (oben links und oben mittig in Abbildung 21) sieht qualitativ der Verteilung im Monat August 22 ähnlich, wobei die vertikalen Systeme jeweils erkennbar weniger Ertrag liefern.

Zwar liegen die spezifischen Erträge der vertikalen Systeme im Oktober 22 und Dezember 22 sogar höher als bei den klassischen Systemen, jedoch tragen diese Monate durch das allgemein niedrigere Ertragsniveau weniger bei, was durch die einheitliche Skalierung in Abbildung 20 (unten) verdeutlicht wird.

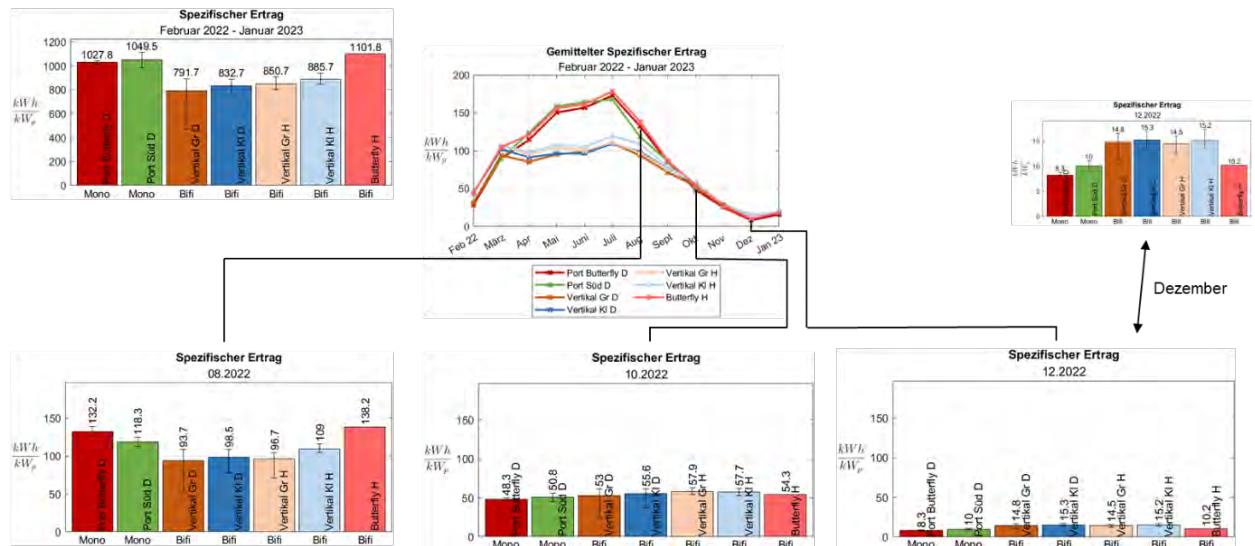


Abbildung 21: Spezifische Erträge für das gesamte Jahr (oben links und oben mittig) sowie saisonale Variationen unten (August, Oktober, Dezember von links nach rechts). Die spezifischen Erträge der vertikalen Systeme sind im Herbst und Winter (Dezember rechts oben) überlegen, jedoch wird bei gleicher Skalierung (unten) deutlich, dass die Sommererträge insgesamt im Mittelland klar dominieren.

Eine alleinige Darstellung des Monats Dezember in anderer Skalierung, wie oben rechts in Abbildung 21, könnte bezüglich des Ertrags im Winter hier einen Eindruck erwecken, dass vertikal installierte Module im Winter besonders effektiv sind, was relativ gesehen auch stimmt, jedoch den geringen Anteil an Jahresertrag nicht berücksichtigt.

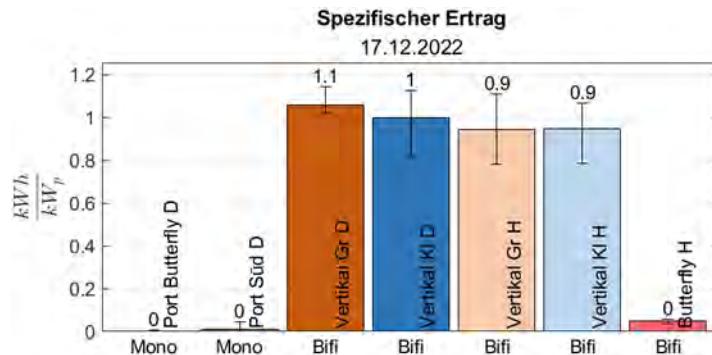


Abbildung 22: Der Vergleich der spezifischen Erträge [$\frac{kWh}{kWp}$] der verschiedenen Teilsysteme im Dezember beinhaltet auch (wenige) Tage mit mehr oder weniger ausgeprägter Schneedeckung der nicht-vertikalen Systeme, wobei die vertikalen Systeme schneefrei bleiben.



Abbildung 23: Die vertikalen Systeme (links) bleiben frei von Schnee, während die anderen Systeme erwartungsgemäss bedeckt sind und keinen Ertrag liefern.

Bei einer ökonomischen Betrachtung ist zu beachten, dass der wirtschaftliche Ertrag vertikaler Installationen günstiger liegt, wenn es im Winter zu steigenden oder durch das Überangebot im Sommer zu sinkenden Strompreisen kommt. Dies gilt vor allem auch dann, wenn dynamische Preise und Rückspeiseterminarife auch beim Tagesprofil (Berechnung alle 15 Minuten) berücksichtigt werden.

Zum Vorteil der vertikalen Systeme im Winter tragen generell die winterlichen Bedingungen der Einstrahlung, aber auch die fehlende Schneebedeckung bei (Abbildung 22 und Abbildung 23). Dieser Vorteil zeigt sich auch in Abbildung 28 im Januar 2024, in welchem im Mittelland vermehrt Schnee gefallen ist und aufgrund der kalten Temperaturen länger liegen geblieben ist als in den früheren Jahren. Andererseits kommt dieser Vorteil, wie auch der hohe Albedoefekt des Schnees, durch die geringe Strahlungsintensität im Mittelland in den Wintermonaten, kaum zum Tragen. Im Hinblick auf den Winterstrom kann somit gesagt werden, dass sich die Vorteile der vertikalen Systeme im Winter zwar im Prinzip zeigen, dass diese am Standort Winterthur jedoch nur geringe positive Auswirkungen bewirken. Es muss dabei betont werden, dass dies eine standortbezogene Betrachtung ist, die für weite Gebiete des Mittellandes zutreffen wird, aber nicht für Höhenlagen mit weniger Bedeckung und mehr Schnee!

Im Projekt wird auch der Einfluss des Substrats mit bewusst gewählter unterschiedlicher Helligkeit auf die Erträge untersucht. Tatsächlich zeigte sich bei den vertikalen Systemen im ersten Jahr ein kleiner Ertragsgewinn für die Bereiche auf hellem Substrat (Abbildung 24). Wie bereits weiter oben beschrieben wurde der Unterschied vor allem durch die ersten Monate verursacht, als die Bepflanzung erst schwach ausgeprägt war. In den späteren Monaten wurden die Unterschiede durch die Bepflanzung nivelliert und im zweiten Jahr wurden praktisch keine klaren Unterschiede mehr beobachtet (Abbildung 25).

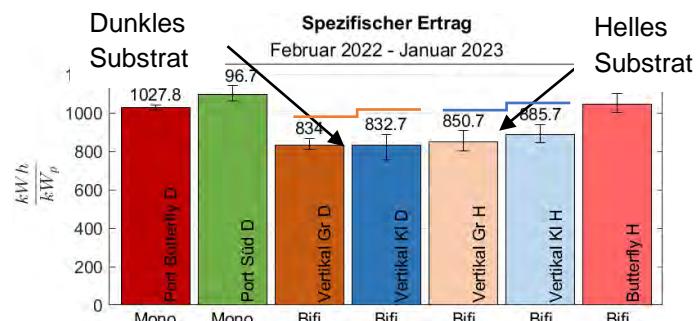


Abbildung 24: Im Projekt wird auch der Einfluss des Substrats mit bewusst gewählter unterschiedlicher Helligkeit auf die Erträge untersucht. Tatsächlich zeigte sich bei den vertikalen Systemen im ersten Jahr ein kleiner Ertragsgewinn für die Bereiche auf hellem Substrat.

Die Beschaffenheit des Untergrundes variiert lokal und zeitlich durch die Dichte und Konsistenz der Bepflanzung. Die Angabe eines Albedofaktors aus einer Messung würde bereits deswegen eine Scheingenaugigkeit darstellen; eine aussagekräftige Angabe ist praktisch nicht möglich.

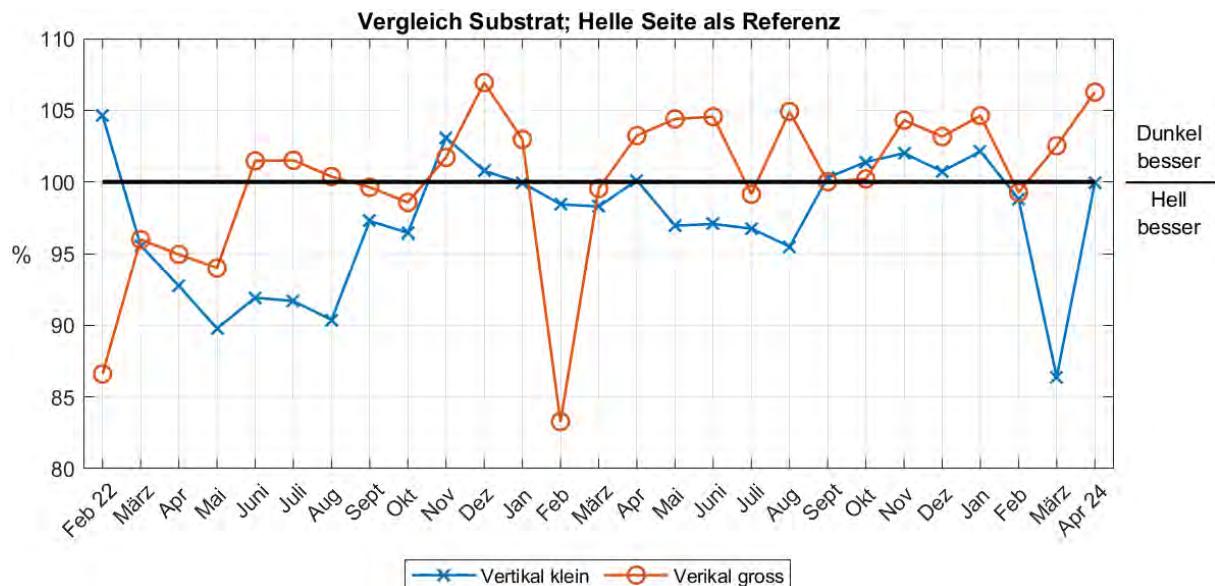


Abbildung 25: In den späteren Monaten wurden die Unterschiede jedoch durch die Bepflanzung nivelliert und im zweiten Jahr wurden praktisch keine Unterschiede mehr beobachtet.

Auch die Messung selbst ist auf dem Dach nicht sinnvoll durchführbar. Das Albedometer vergleicht jeweils die Halbräume durch zwei aufeinandergesetzte Pyranometer («back-to-back»). Messungen sind durch den Vergleich der simultanen Messungen auch bei variierenden Einstrahlungsbedingungen möglich. Idealerweise sollte bei der Messung der Albedo eine ebene Fläche mit unendlicher Ausdehnung vorhanden sein, was in der Realität nicht gegeben ist. Zudem beeinflussen Schatten auf dem Boden oder auch sonstige Hindernisse die Lichtmenge, welche jeweils in die beiden Pyranometer fällt und somit auch die gemessene Albedo. Selbst bei idealen Bedingungen ist die Abschattung durch das Albedometer und die tragende Struktur gegeben, die sich umso stärker auswirkt, je näher sich dieses am Boden befindet. Andererseits ist eine bodennahe Messung notwendig, um die Fehler bei beschränkten Reflexionsflächen zu verringern. Bei Singer et al. [22] werden die Verhältnisse bei der Albedomessung mit beschränkter Fläche beschrieben und eine Vorgehensweise mit Mindesttestfläche und Abstand des Albedometers zum Boden beschrieben. Daran angelehnte Messungen wurden mit Substratmaterialien verschiedener Helligkeit auf einem ZHAW-Dach im Vorfeld des Projekts durchgeführt (Abbildung 26) um geeignete Substratmaterialien zu evaluieren. Bei diesen Messungen lassen sich die Albedofaktoren der Materialien aus dem Verlauf der Kurven bestimmen, selbst wenn die Daten durch zeitweise lokale Verschattungen beeinflusst werden. Eine Messung der Substratmaterialien allein macht allerdings keinen Sinn, da der Bewuchs das Rückstrahlverhalten dominiert.



Abbildung 26: Albedomessungen an Substratmaterialien mit unterschiedlichem Rückstrahlverhalten. Die Sprünge in den Verläufen stammen von Abschattungen des Untergrunds oder direkt der Pyranometer.

Entsprechende Messungen wurden daher auch auf dem Mattenbach-Dach durchgeführt. Es zeigte sich jedoch, dass die Verschattungen durch die enge Bebauung derart ausgeprägt sind, dass keine sinnvolle Messung möglich war. Die Messkurven bestanden aus stark schwankenden Signalen in einem breiten Bereich, sodass die Angabe eines gemittelten Wertes zwar im Prinzip möglich wäre, aber eine Scheingenaugkeit darstellen würde. Sowohl bei der Simulation wie auch generell bei der Abschätzung des Albedofaktors ist man also auf plausible Schätzungen angewiesen.

Vergleicht man die Gesamterträge des Mattenbachsystems über die Jahre 2022 und 2023 fallen einige signifikante Unterschiede auf. In Abbildung 27 sind diese absoluten Erträge des Gesamtsystems dargestellt und zeigen, wie unterschiedlich diese sein können. Im März 22 hat man aufgrund eines sehr sonnigen Monats bis 36 % mehr Ertrag als im darauffolgenden Jahr 2023. Im weiteren Vergleich mit dem März 2024 zeigt sich, wie aussergewöhnlich das Jahr 2022 war. Auch im April verzeichnete man im Jahr 2022 bis zu 20 % mehr absoluten Ertrag gegenüber dem Jahr 2023 und 2024. Andererseits weisen die Monate Februar, September und Oktober im Jahr 2023 mehr Sonnenstunden auf, was sich ebenfalls im Gesamtertrag erkenntlich macht. Diese starken Schwankungen bei Betrachtung einzelner Jahre zeigen, wie wichtig es ist, dass man solche Messungen über einen längeren Zeitraum hinweg durchführt.

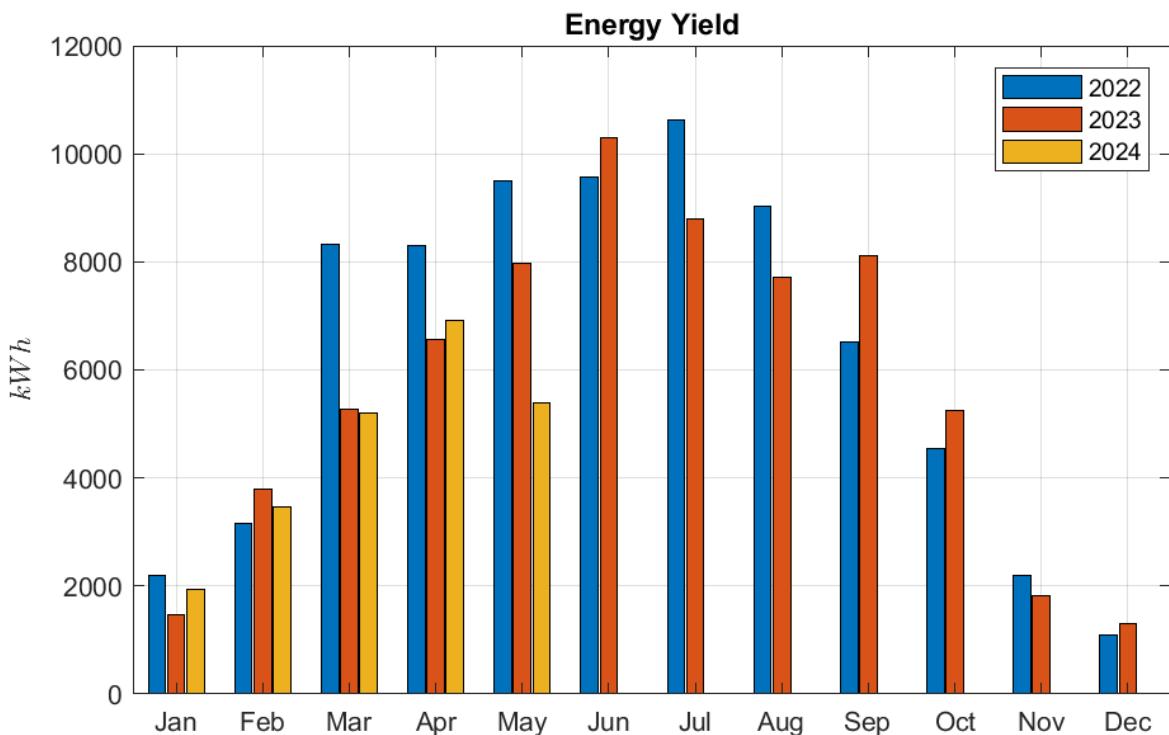


Abbildung 27: Vergleich der absoluten Erträge des Gesamtsystems, gemessen am Wechselrichter, der Jahre 2022, 2023 und 2024 (Stand 22.05.2024).

Die Unterschiede der Jahreserträge zeigen sich auch in unterschiedlicher Ausprägung für die Systemtypen in der annähernd zwei Jahre umspannenden Erweiterung von Abbildung 20, die in Abbildung 28 gezeigt wird. Die Fläche zwischen den charakteristischen Kurvenscharen der vertikalen und konventionelleren Systeme ist 2023 deutlich geringer als im vorhergehenden Jahr. Dies entspricht einem geringeren Ertragsunterschied zwischen diesen Systemklassen. Je nach Wahl der einzelnen Systemtypen zum Vergleich werden 2023 mit den vertikalen Systemen (bei GCR ca. 50 %) 83-95 % des Ertrags der klassischen Systeme erreicht, während dies 2022 nur 71-86 % waren. Der Grund hierfür liegt in der unterschiedlichen Einstrahlung während der Jahreszeiten in diesen Jahren und der verschiedenen jahreszeitlichen Performance der Teilsysteme.

2022 hatte hohe Einstrahlung in allen Sommermonaten, was günstig für die Erträge der nicht-vertikalen Systeme ist. Im Herbst und Winter 23 / 24 war dagegen die Einstrahlung höher als 2022, was dazu führte, dass die vertikalen Systeme im Vorteil waren. Im Januar 24 erreichten die vertikalen Systeme gar den doppelten Ertrag im Vergleich zu den konventionellen Anordnungen. Dies zeigt auch nochmal das Winterstrompotenzial vertikaler Systeme bei geeigneten Einstrahlungsbedingungen. An dieser Stelle soll nochmal darauf hingewiesen werden, dass alle Systeme, sowohl in Ost/West- wie auch Süd-Ausrichtung so stark verdreht sind, dass man die Systemorientierungen strenggenommen nicht mehr so bezeichnen kann. Dementsprechend weichen auch die gemessenen Erträge von jenen ab, welche bei optimaler Ausrichtung erreicht würden. Die «Fehlorientierung» wirkt sich dabei bei den vertikalen Systemen stärker aus als bei den klassischen Anordnungen, die mit 15° Kippwinkel annähernd horizontal installiert sind. Bei horizontaler Installation spielt die Ausrichtung keine Rolle.

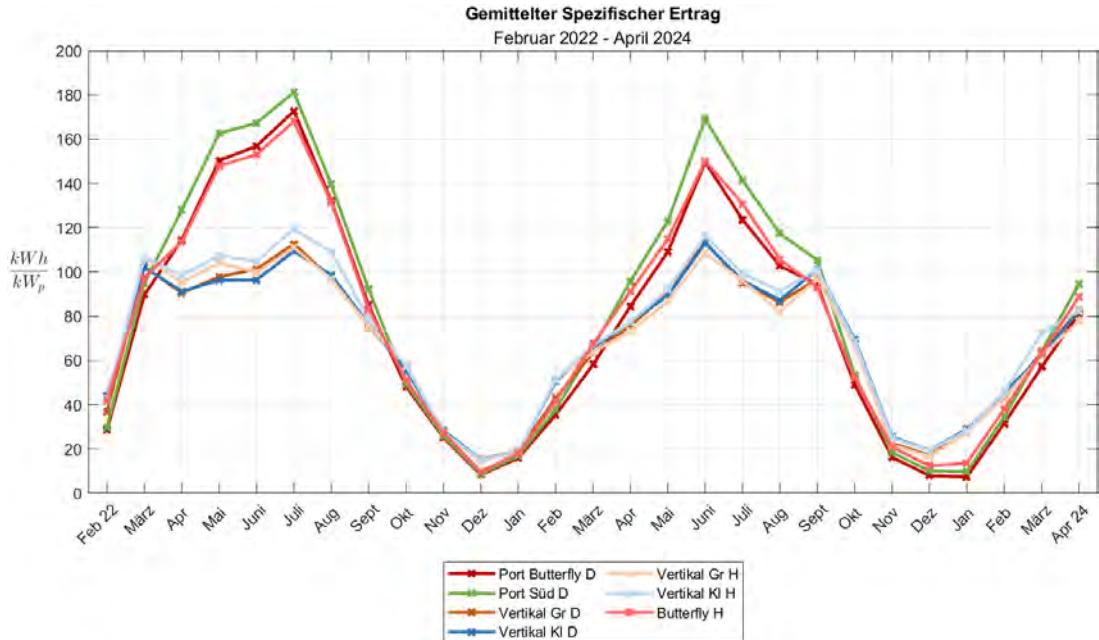


Abbildung 28: Monatliche Betrachtung der spezifischen Erträge [kWh / kWp] über zwei Jahre für die verschiedenen Teilsysteme im Vergleich.

2.9 Simulationen und Vergleich mit Messdaten

In diesem Projekt steht das reale System in Mattenbach im Vordergrund für das Messwerte vorhanden und somit keine Simulationen notwendig sind. Dennoch sind auch Simulationen in diesem Projekt ein wichtiges Element, da andere Gründach-Projekte in Aufbau und Umgebung vom Mattenbach-System abweichen werden. Gerade bei vertikalen PV-Systemen bestehen grosse Unsicherheiten im Hinblick auf die Ertragsabschätzung bei der Planung durch Simulationen. Dies betrifft sowohl Erfahrungswerte wie auch Simulationen [10], da die Wechselwirkungen durch direkte und indirekte Abschattungen (Boden, Diffusstrahlung) stark ausgeprägt sind und auch weitere Faktoren wie die Albedo der Umgebung oder die Bifazialität der Module eine Rolle spielen. Deswegen ist es von Interesse an realen Messdaten zu prüfen, inwieweit die Erträge der einzelnen Systemtypen durch Simulationen wiedergegeben werden. Grundlegende Unterschiede sind plausibel erklärbar und spiegeln sich auch direkt in den Messergebnissen wider. So wird das bessere Abschneiden der vertikalen Systeme in den Wintermonaten (Abbildung 20, Abbildung 22) oder bei höherem Diffus-Strahlungsanteil (Abbildung 29) qualitativ erwartet. Unklar ist allerdings, wie stark die quantitative Ausprägung ist, genau dieses möchte und sollte man wissen, wenn man ein PV-System auslegt.

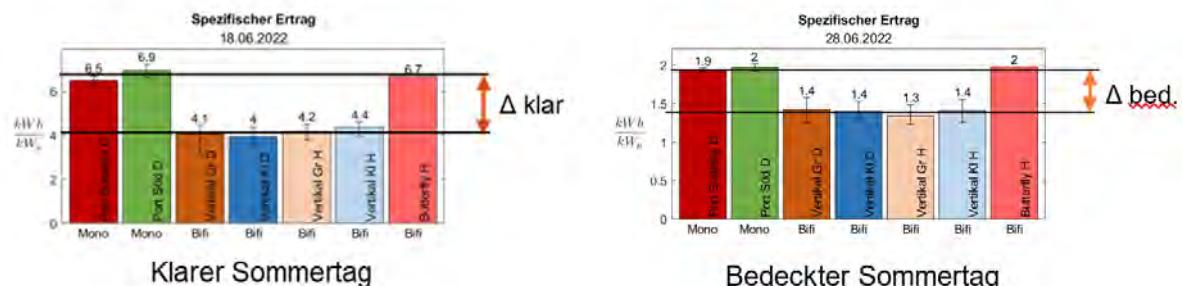


Abbildung 29: Vergleich spezifischer Erträge [kWh / kWp] verschiedener Teilsysteme Je bedeckter, desto geringeres Delta zwischen vertikalen und nicht-vertikalen Systemen (qualitativ bekannt).



Die üblichen und bekannten Simulationstools sind insbesondere für nicht-bifaziale Systeme in konventioneller Auslegung erprobt. Insbesondere bei bifazialen vertikalen Systemen ist dies jedoch nicht der Fall. Man erhält zwar ein Ergebnis, kann aber nicht wirklich abschätzen, inwieweit dieses der Realität entspricht.

Die verschiedenen Konfigurationen in diesem Projekt eignen sich, um die Vorhersagen von verschiedenen Simulationstools zu vergleichen. Zwei Tools werden eingesetzt, das allgemein im wissenschaftlichen Bereich eingesetzte PVsyst und das neuere PVcase. PVsyst hat eine lange Entwicklungs- und Optimierungsphase hinter sich und bietet in neueren Versionen die Möglichkeit bifaziale Systeme zu simulieren, auch in vertikaler Installationsform. Dabei ergeben sich jedoch gewisse Einschränkungen, so werden z.B. die Modulreihen als unendlich ausgedehnt angenommen. Die Simulation von Arrays mit begrenzter Ausdehnung ist auf Dächern aber gerade von Interesse, da die Randbereiche lokal stärker ausgeleuchtet werden. PVcase basiert bei der Berechnung auf einer Ressourcenaufwändigeren «Ray-Tracing» Ansatz, welcher auch die Effekte an den Rändern des Systems mitberücksichtigt. PVcase ist ein 3D-Planungs- und Simulationstool, bei welchem man die Systeme in einem 3D CAD direkt plant. Diese 3D-Modelle können dann mit dem zusätzlichen PVcase Yield oder mit PVsyst direkt simuliert werden.

Beide Tools können nun im Rahmen des Projekts an verschiedenen Installationsformen mit realen Messwerten getestet und verglichen werden. Zudem stehen zusätzlich Messwerte miniaturisierter Testsysteme zur Verfügung. Diese werden im parallelen BFE-Projekt PV-Eye untersucht, woraus sich Synergieeffekte ergeben. Dabei werden auch Systeme mit z.B. noch engerer Staffelung als im Mattenbach Projekt untersucht, bei welchen mit nochmals stärkeren Abweichungen zwischen Messung und Simulation zu rechnen ist. Auch das Mattenbach-System wurde ebenfalls in miniaturisierter Form nachgebaut. Im PV-Eye Projekt dient dieses als wichtiges Referenzsystem um die Aussagekraft der Simulationen mit realen Messdaten zu verifizieren.

Hervorzuheben ist, dass die Simulation vertikaler bifazialer Systeme schon an sich herausfordernd ist [10], und dass die gegebenen Verhältnisse mit sehr enger Staffelung und vielen verschiedenen verschattenden Objekten die Auslegung und Berechnungen erneut verkomplizieren.

Das Layout der Systeme in den Simulationen wurde im CAD mit dem PVcase Ground Mount gezeichnet und für PVsyst exportiert. Das Berechnen der Verschattung gemäss dem 3D-Aufbau, ist in PVsyst nur für monofaziale und einfache bifaziale Systeme (keine Butterfly Anordnungen) mit regelmässigen Abständen möglich. Es ist hier anzumerken, dass genau solch ein System (Butterfly bifazial auf hellem Substrat) umgesetzt wurde. Die 1.5 % «bifacial gain» welche in den Messungen beobachtet wurden können somit nicht durch die PVsyst-Simulationen wiedergegeben werden.

Für die Simulation wurden Wetterdaten verwendet, die zum Teil auf dem ZHAW-Dach, seit Anfang 2023, gemessen wurden und solchen die durch PVGis interpoliert wurden.

Die Gegebenheiten auf dem Dach variieren lokal durch die Aufbauten, aber auch durch z.B. Bäume in der näheren Umgebung. Daher ist eine nähere Untersuchung der jeweiligen Teilsysteme wie auch eine Betrachtung einzelner Module oder Anlagenbereiche notwendig, die gegebenenfalls einen repräsentativen Vergleich der Systemtypen stark verfälschen. So müssen systematisch stark verschattete Module aus der Betrachtung ganz herausgenommen werden, um Fehleinschätzungen zu unterdrücken. Dies geschieht sowohl durch die Analyse der lokalen Messdaten wie in den Abbildungen 63 bis 77 im Anhang gezeigt.

Einzelne Teilsysteme blieben aufgrund ihrer Position oder geringer Ausdehnung schwierig zu erfassen. So ist es beispielsweise schwierig für das kleine Teilsystem mit monofazialen Modulen in Südausrichtung (NW-Ecke in Abbildung 7) eine Flächenbelegung anzugeben, da es nur zwei einzelne Modulreihen gibt, die noch dazu durch verschattende Dachelemente getrennt sind. Andere Systemteile sind systematisch stark verschattet, sodass es immer zu Verschattungen kommt und auch sub-optimale Messungen mit einbezogen werden, um ausreichend Messdaten zu bekommen. Ein Beispiel hierfür ist der



Systemteil mit kleinen vertikalen Modulen auf dunklem Grund, der deswegen bei der Darstellung der Jahreserträge (Abbildung 18, braunes Symbol) einen grösseren Messbereichsbalken aufweist als bei den anderen Systemen, obwohl die Maximalwerte jenen der anderen vertikalen Systeme gut entsprechen.

Simulationsvergleiche monatlich aufgelöst

Wie bereits erwähnt können für direkte Vergleiche nur die Simulationen von Juni bis November berücksichtigt werden, da gemessene Wetterdaten nur für diesen Zeitraum komplett verfügbar waren. Der Vergleich zwischen den unterschiedlichen Tools zeigt gut auf wie sich die komplexe Verschaltungssitu-

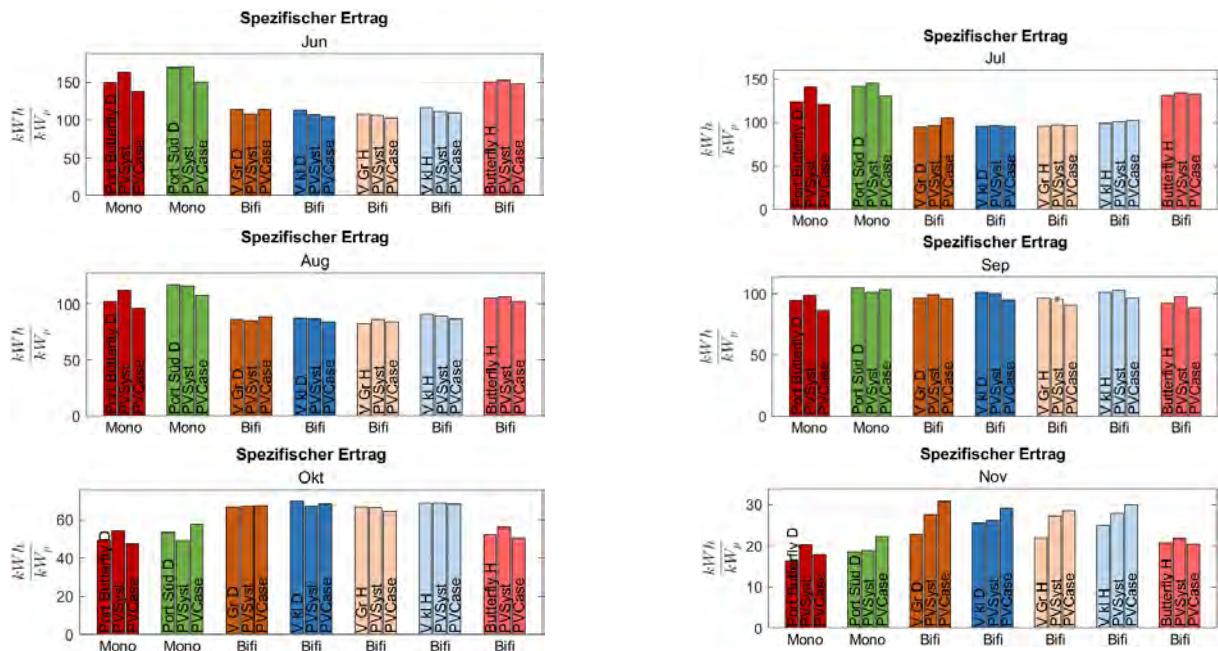


Abbildung 30: Monatlich dargestellte Simulationsergebnisse für die Unterschiedlichen Tools PVSyst (Balken Mitte) und PVCase (Balken rechts) im Vergleich zu den Messwerten (Balken links).

ation auf die Bestimmung der Erträge auswirkt. In Abbildung 30 ist zu erkennen, dass der Ertrag des Süd-Systems (grüne Balkengruppe) durch beide Tools im Laufe der Monate sowohl leicht über- wie auch unterschätzt wird. Bei PVCase ist ein saisonaler Trend in der Form erkennbar, dass das Unterschätzen in den Sommermonaten von einem Überschätzen im Herbst gefolgt wird.

Der Ertrag des monofazialen Butterfly-Systems (Balkengruppe ganz links) wird durch PVSyst über die Monate durchweg leicht überschätzt und durch PVCase zumeist leicht unterschätzt.

Auch beim entsprechenden bifazialen Butterfly auf der gegenüberliegenden, hellen Substratseite (Balkengruppe ganz rechts) kann man ebenfalls erkennen, dass PVCase immer leicht unterhalb der Messungen liegt, wohingegen PVSyst diese immer leicht übertrifft. Das qualitative Verhalten ist somit gleich, wie beim monofazialen Butterfly.-System. Das Überschätzen durch PVSyst ist dabei weniger stark ausgeprägt, was konsistent mit den Erwartungen ist, da die PVSyst-Simulation für ein monofaziales System durchgeführt wurde und die gemessenen 1.5 % bifacial gain daher in der Simulation nicht erfasst werden.

Die vertikalen Systeme (zentrale Balkengruppen) werden durch beide Tools von Juni bis Oktober auf- fallend gut abgebildet. Im November, sowie in den weiteren Wintermonaten kommen Unsicherheiten durch die Umgebung hinzu, da die Sonne tiefer steht und deren Schatten grössere Einflüsse haben. Die hierdurch in der Realität verringerten Erträge werden nicht durch die Simulationen erfasst. Zusätzlich



kommen noch technische Effekte durch die SolarEdge-Optimizer im realen System zum Tragen, die im Rahmen dieses Projekts beobachtet wurden und nicht direkt simulierbar sind (siehe auch folgender Abschnitt).

Die simulierten Werte liegen recht eng bei den Messwerten. Die Abweichungen liegen meist deutlich niedriger als 10 %, in wenigen Fällen um die 15% und nur bei vertikalen Systemen im November sind noch grössere Abweichungen zu beobachten, welche jedoch auch auf andere Gründe zurückzuführen sind, aber die allgemeinen Herausforderungen bei Simulationen widerspiegeln.

Die Frage nach der prozentualen Abweichung zwischen Messung und Simulation ist naheliegend und von offensichtlichem Interesse. Die Angabe prozentualer Abweichungen zum Messwert ist dabei jedoch mit Vorsicht zu interpretieren, da beachtet werden muss, dass der Messwert selbst ebenfalls mit Unsicherheiten behaftet sein kann. Dies können zum einen Faktoren sein, die in Simulationstool nicht richtig berücksichtigt wurden oder berücksichtigt werden können (z.B. die erwähnte Optimizer-Thematik, aber auch andere Ursachen) zum anderen aber auch die Schwankungen der Messwerte, die sich aus den Werten von jeweils Modul-Zweiergruppen pro Optimizer zusammensetzen. Wie weiter oben beschrieben wurden unterschiedliche Verschattungen beobachtet und in Extremfällen wurden bestimmte Modul-Zweiergruppen aus der Messung herausgenommen, um zu starke Verzerrungen zu vermeiden. Dennoch werden immer noch Unterschiede zwischen den Modulgruppen eines Systemtyps beobachtet. Eine Möglichkeit wäre eine Mittelung, eine andere Option wäre nur die Berücksichtigung des Maximalwertes, beide Ansätze haben ihre Nachteile. Im folgenden Abschnitt wird ein «Messbereichsbalken» angegeben, der jeweils den niedrigsten und höchsten Messwert eines Systemtyps wiedergibt.

Simulationsvergleiche jährlich aufgelöst

Betrachtet man die Simulationen über ein ganzes Jahr (Januar 2023 bis Dezember 2023) indem man die fehlenden 2023 Daten mit Daten vom PVGis Wetterfile auffüllt, zeigt sich in Abbildung 31 ein qualitativ ähnliches Bild wie bei den monatlichen Simulationserträgen aus Abbildung 30. Das verwendete Wetterfile für 2023 enthält bis zu 80.8 % an gemessenen Wetterdaten von Winterthur und 19.2 % an Daten von PVGis, welche aus den Jahren von 2005-2020 stammen. Da vor allem die Wintermonate nicht vollständig sind und die Erträge überwiegend aus den Sommermonaten stammen, kann man erwarten, dass die Einstrahlungsbedingungen weitgehend korrekt wiedergegeben werden sollten.

Das südausgerichtete System (grüne Balkenserie) kann am einfachsten beschriebenen werden. Es zeigt sich das beide Simulationstool eine gute Übereinstimmung innerhalb des Messbereichsbalkens der Messung erreichen.

Beim Butterfly auf der dunklen Seite (Balkengruppe ganz links) zeigt sich, dass PVCASE innerhalb des Messbereichsbalkenbereichs liegt, während PVsyst den spezifischen Ertrag etwas überschätzt. Das ähnliche aber bifaziale Butterfly-System auf der anderen Dachhälfte (Balken ganz rechts) zeigt qualitativ das gleiche Verhalten, allerdings mit geringerer Überschätzung durch PVsyst. Beide simulierten Jahreserträge liegen innerhalb des Messbereichsbalkens der Messung, wobei auch hier PVCASE das System eher unterschätzt und beim Minimum des Gemessenen liegt. Dieses Butterfly-System wurde allerdings aufgrund der gegebenen Möglichkeiten in PVsyst als Monofazial simuliert. Unter Einbezug der Bifazialität würde sich das Verhältnis weiter der Simulationen des vergleichbaren monofazialen Systems annähern.

Bei den vertikalen Systemen zeigt sich eine erstaunliche Übereinstimmung zwischen Messung und Simulationen, trotz der dichten Anordnung (GCR ca. 50 %) mit starker Verschattung. Drei der vier vertikalen Systeme werden durch beide Tools innerhalb der Messbereichsbalkenbreite simuliert. Bei einem der vertikalen Systeme (grosse Module auf dunklem Substrat) liegen die Messwerte niedriger als die Simulationen. In diesem Fall gibt es jedoch eine Hypothese zur Erklärung, die darauf beruht, dass man ein reales Optimizer-System nicht mit den Tools abbilden kann. Bei diesem System wurde beobachtet, dass die Module von den Optimizern aufgrund der Verschattungssituation teilweise in einem ungünstigen Arbeitspunkt betrieben wurden.

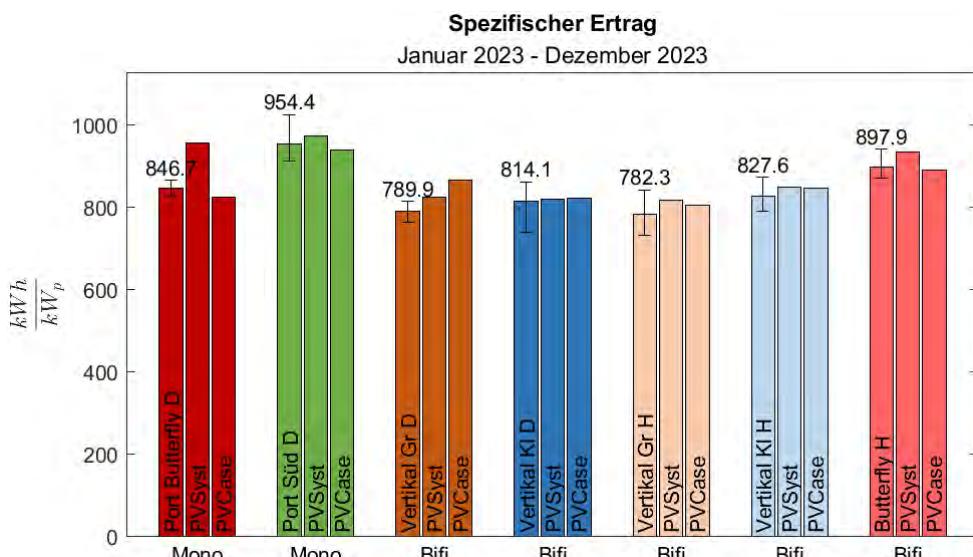


Abbildung 31: Vergleich der Simulationserträge für das Jahr 2023 mit 80.8% Anteil an gemessenen Wetterdaten.

Auch wenn bei dieser Betrachtung keine kompletten Wetterdaten für das Jahr verfügbar waren, zeigt sich dennoch, dass sich die Systeme im Mittel gut abbilden lassen, wenn man die Umgebung möglichst genau mit einbeziehen kann. Das gilt dabei ausdrücklich auch für die vertikalen Teilsysteme.

2.10 Biodiversitätsmonitoring (Fauna und Flora)

Biodiversität – Fauna

Zur Ermittlung des Potentials von Dachbegrünungen für die Förderung der Biodiversität bietet sich die Erfassung von Artengruppen der Fauna an. Die Vegetation von Dachbegrünungen wird in der Regel in der Anfangsphase stark geprägt durch die künstlich ausgeführte Ansaat, welche in der Folge in einem dynamischen Prozess steht einerseits, welche Arten aus dieser Ansaat sich halten und vermehren sowie den sich spontan ansiedelnden Pflanzenarten. Auf diese Weise können beispielsweise naturschutzrelevante Arten aktiv ausgebracht werden, wobei es sich dann langfristig zeigen muss, ob sie an diesem Standort auch überleben können. Bei der Fauna müssen alle Tierarten selbstständig den Weg auf die Dachbegrünung finden. In der Regel sind es flugfähige Arten, es kommen aber auch passive Verdriftungen vor. Von dem her kann die faunistische Besiedlungsdynamik als natürlicher bezeichnet werden im Vergleich zur floristischen Besiedelung. In der vorliegenden Untersuchung wurden Käfer als Bioindikatoren gewählt.

Die Erfassung der Käfer erfolgt über die ganze Vegetationsperiode durch, d.h. von Anfang April bis Ende Oktober. Die im Feld gesammelten Proben werden nach der Saison aussortiert in verschiedene

zu bestimmende Tiergruppen. Danach werden sie durch einen Spezialisten/Entomologen auf Artniveau bestimmt zur anschliessenden vertieften Analyse.

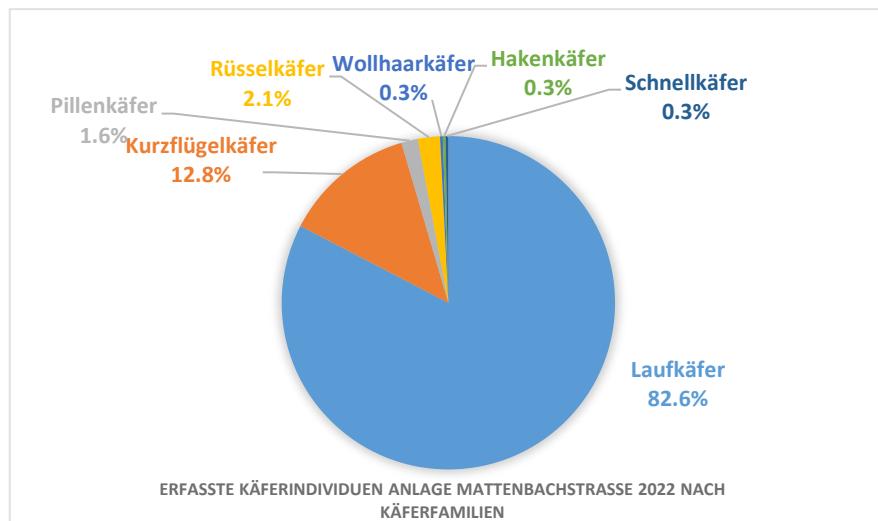


Abbildung 32: Erfasste Käferindividuen in der Fangperiode 2022 nach Käferfamilien. Dominant sind bei den Käferindividuen vor allem die Laufkäfer, primär durch das Auftreten der sehr häufig erfassten Art *Bembidion quadrimaculatum* mit 267 Individuen, einer generell häufigen, wärmeliebenden Art.

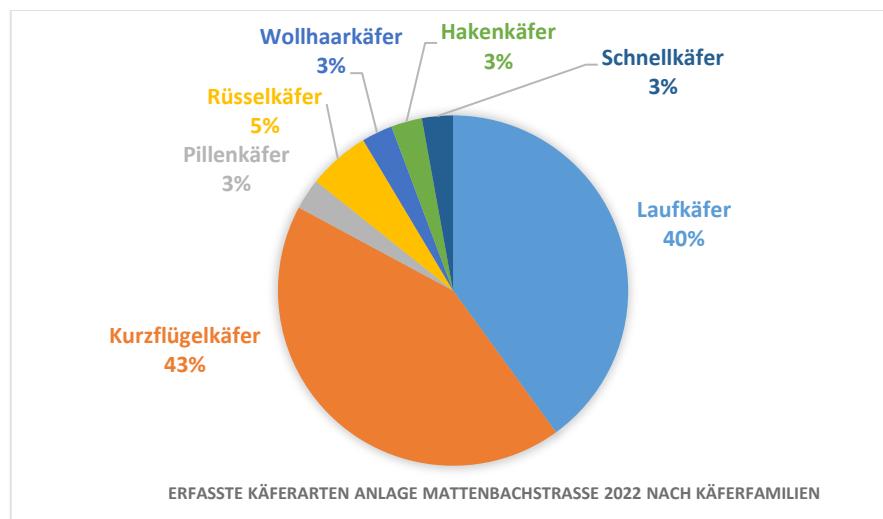


Abbildung 33: Käferarten in der Fangperiode 2022 nach Käferfamilien. Dominant sind bei den Käferfamilien die Lauf- sowie Kurzflügelkäfer. Beide Familien ernähren sich räuberisch.

Im Jahr 2022 konnten 374 Käferindividuen in den Bodenfallen erfasst werden, darunter waren 35 Arten. Weiter differenziert kann in die verschiedenen Käferfamilien werden (es konnten 7 Käferfamilien registriert werden), welche in der Regel unterschiedliche Hauptnahrungsweisen repräsentieren. Auf begrünnten Dachflächen dominieren weitgehend die auf Bodenoberflächen aktiv herumlaufenden Lauf- sowie Kurzflügelkäfer, welche sich räuberisch ernähren. Tendenziell sind diese Käferarten aufgrund der



spezifischen Fangmethode der in den Boden eingegrabenen Becherfallen überrepräsentiert, da vor allem sie aufgrund ihrer Laufaktivität auf der Bodenoberfläche vermehrt in die Fallen gelangen.

Tabelle 2: Erfasste Käferarten nach Familie und mit Angaben zur Ökologie

Käferart nach Familie	Zahl	Angaben zur Ökologie und Vorkommen
Laufkäfer, Carabidae		
<i>Agonum sexpunctatum</i> (Lin.)	1	häufiges ubiquitäres Tier auf dürrem Grünland
<i>Anisodactylus binotatus</i> (Fab.)	2	häufig auf schwereren Böden
<i>Bembidion latinum</i> (Net.)	3	seltener Rohbodenbewohner!!!! Bekannt aus der Region Winterthur
<i>Bembidion properans</i> (Ste.)	19	nicht seltenes Tier magerer Böden, vor allem Auen
<i>Bembidion quadrimaculatum</i> (Lin.)	267	häufiges xerophiles Tier
<i>Bembidion</i> sp.	2	
<i>Callistus lunatus</i> (Fab.)	1	seltener Halbtrockenrasenbewohner, stark rückläufig
<i>Clivina fossor</i> (Lin.)	1	schwerere Böden, gräbt darin
<i>Elaphropus parvulus</i> (Dej.)	3	häufiges Tier von Kiesflächen
<i>Harpalus affinis</i> (Sra.)	1	häufiges Tier auf Ruderalflächen
<i>Harpalus rufipes</i> (Deg.)	1	häufiges Tier auf Ruderalflächen
<i>Loricera pilicornis</i> (Fab.)	4	häufiges Feuchttier, gerne in Auen
<i>Microlestes minutulus</i> (Goe.)	1	selteneres Tier von trockenen Grasflächen
<i>Trechus quadristriatus</i> (Sra.)	3	häufige Art auf trockenen Grasflächen
Total Individuen Laufkäfer	309	
Total Arten Laufkäfer	14	
Kurzflügelkäfer, Staphylinidae		
<i>Aloconota planifrons</i> (Wat.)	1	selteneres Ufertier
<i>Anotylus rugosus</i> (Fab.)	8	häufig in Vegetabilien, Kompost
<i>Atheta</i> sp.	1	
<i>Carpelimus corticinus</i> (Gra.)	1	häufiges Komposttier
<i>Gabrius breviventer</i> (Spe.)	3	häufiges Tier der Dachbegrünungen
<i>Gabrius</i> sp.	4	
<i>Leptacinus sulcifrons</i> (Ste.)	1	Bodentier, nicht häufig, bei Ameisen
<i>Neobisnius procerulus</i> (Gra.)	1	Kompost ua
<i>Oxypoda lurida</i> (Wol.)	3	selteneres Bodentier, häufig auf unseren Dachbegrünungen
<i>Quedius levicollis</i> (Bru.)	8	häufiges Tier des Offenlands, Grasflächen
<i>Rabigus pullus</i> (Nor.)	5	selteneres Tier der trocknen Bodenstreu
<i>Scopaeus laevigatus</i> (Gyl.)	4	im Rasen zwischen Wurzelwerk an Ufern, nicht selten, typisch für Dachbe-
<i>Stenus ater</i> (Man.)	5	selteneres Ufertier
<i>Tachyporus nitidulus</i> (Fab.)	2	häufig in der Bodenstreu
<i>Xantholinus linearis</i> (Oli.)	1	häufige Art auf trockenen Grasflächen
Total Individuen Kurzflügelkäfer	48	
Total Arten Kurzflügelkäfer	15	
Pillenkäfer, Byrrhidae		
<i>Cylitus sericeus</i> (For.)	6	Moosbewohner, typisches Tier der Dächer
Rüsselkäfer, Curculionidae		
<i>Rhinoncus pericarpinus</i> (Lin.)	1	häufiges Tier wechselfeuchter Biotope auf Ampfer
<i>Sitona obsoletus</i> (Gme.)	7	häufiger Rüssler, der polyphag ist
Wollhaarkäfer, Dasytidae		
<i>Dasytes aeratus</i> (Ste.)	1	seltenerer Uferbewohner, grabend, Kiesgruben und Auen
Hakenkäfer, Dryopidae		
<i>Dryops ernesti</i> (Goz.)	1	häufiges Ufertier
Schnellkäfer, Elateridae		
<i>Agriotes lineatus</i> (Lin.)	1	häufiger Kulturschädling an Wurzeln (Drahtwum)



Total Individuen restl. Käferfamilien	17
Total Arten restliche Käferfamilien	6
Total erfasste Käfer-Individuen	374
Total erfasste Käferarten	35



Zur Ökologie und Vorkommen der erfassten Käferarten

Grundsätzlich muss erwähnt werden, dass fast alle Käferarten fliegen können und demnach auch nur zufällig auf das Dach gelangen können, ohne dass sie im Anschluss überlebensfähige Populationen aufbauen können. Von dem her sind langfristige Untersuchungen wichtig, um nachweisen zu können, welche Arten allenfalls dauerhaft auf den Dachbegrünungen vorkommen.

Bei den Laufkäferarten konnten drei seltene Arten registriert werden. Es sind Arten von Trocken- und Halbtrockenrasen sowie Rohbodenbewohner.



Bembidion latinum



Callistus lunatus



Microlestes minutulus

Abbildung 34: Die drei in der Untersuchung erfassten seltenen Käferarten.

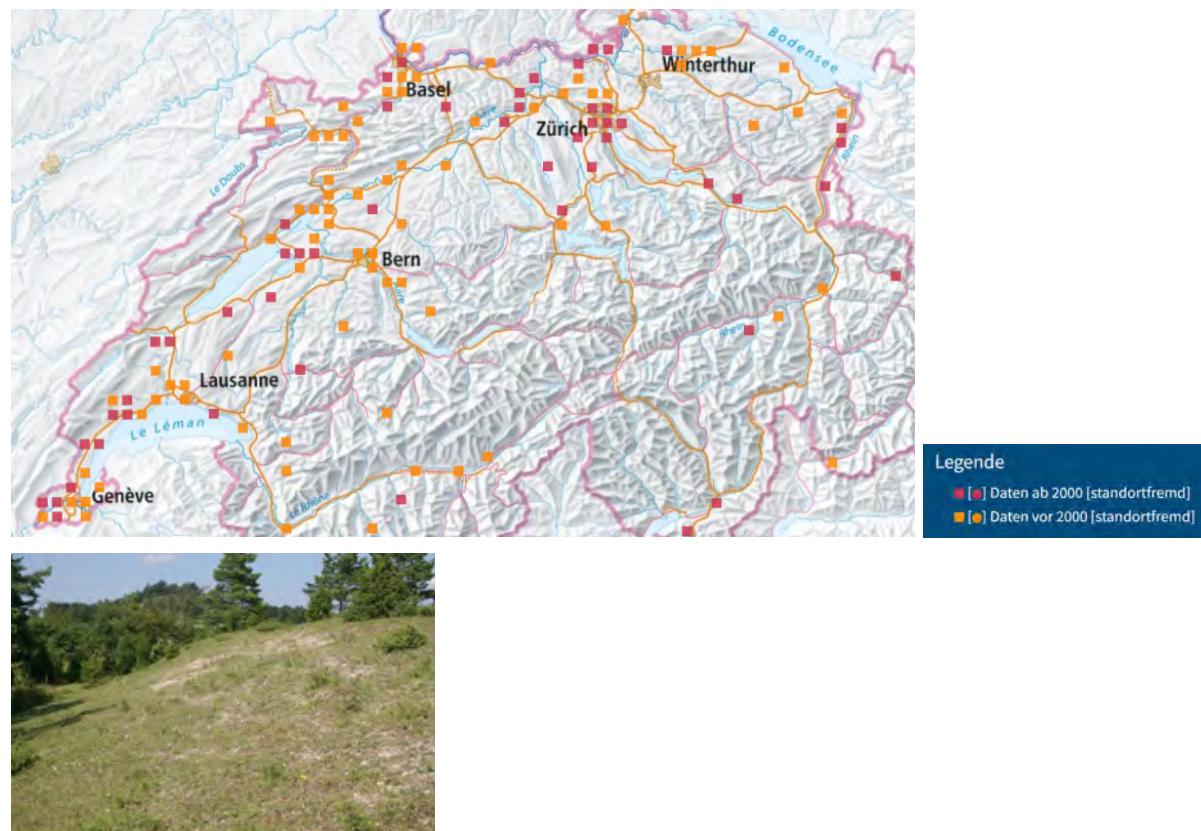


Abbildung 35: Verbreitungskarte und typischer Lebensraum von Callistus lunatus. Quelle: infoFauna.ch



Der Nachweis des Mondfleckkäfers *Callistus lunatus* kann als bemerkenswert bezeichnet werden. Er ist ein thermophiler Laufkäfer dessen Lebensraum lückig bewachsene Halbtrockenrasen, Säume, junge Ruderalfächen und Weinbergsbrachen umfasst. Die Art reagiert empfindlich auf eine Verfilzung und Verbuschung der Lebensräume und auf die Intensivierung der Nutzung. Die Bestände sind deshalb in den letzten Jahrzehnten in der Schweiz stark zurückgegangen. Lokale Populationen sind sogar erloschen.

Bei den häufigeren Arten sind Tiere von Ruderalfächen und Trockenrasen gefunden worden. Mit *Loricera pilicornis* sowie *Bembidion properans* konnten auch typische Auen-Arten erfasst werden, was auf die meist gute Durchfeuchtung der untersuchten Dachfläche hinweisen könnt.



Loricera pilicornis

Bembidion properans

Abbildung 36: Die beiden in der Untersuchung erfassten Käferarten aus Auengebieten.

Bei den Kurzflügelkäferarten konnten vier als selten eingestufte Arten registriert werden. Es sind Arten von Uferhabitaten, Trocken- und Halbtrockenrasen sowie Bodenbewohner.



Stenus ater

Rabigus pullus

Dasytes aeratus

Abbildung 37: Zwei in der Untersuchung erfasste Kurzflügelkäferarten sowie die Wollhaarkäfer-Art *Dasytes aeratus*.

Rabigus pullus ist eine seltene Art mit Verbreitung von Spanien bis in den Fernen Osten. Die Art bevorzugt sandige und lehmige Böden. Sie kommt regelmässig auf begrünten Dachflächen vor.



Biodiversität – Vegetation

Die Vegetation auf den Untersuchungsflächen wurde in den Jahren 2022 sowie 2023 erfasst.

Im Jahr 2022 wurden 72 Arten gefunden. 22 davon wurden angesät, 50 haben sich spontan angesiedelt. Es wurden 42 Arten in Ansaaten ausgebracht, wobei 20 der angesäten Arten in den erfassten Plots nicht nachgewiesen werden konnten. 14 der sich aus den Ansaaten etablierten Arten stammen aus der Ansaat FW, 10 Arten aus der Ansaat UFA.

Eine Art (*Filago vulgaris*) ist in der Schweiz stark gefährdet. Zwei Arten (*Achillea tomentosa* und *Hieracium tomentosum*) sind potenziell gefährdet. Eine Art ist verletzlich (*Dianthus gratianopolitanus*). In der fachlichen Beurteilung der Naturschutzrelevanz muss bei den Pflanzen – wie auch hier im Falle der Versuchsanlage Mattenbachstrasse – beachtet werden, dass die Rote Liste Arten durch die Ansaaten auf die Dachflächen gelangt sind und nicht selbstständig.



Abbildung 38:: Verdunstungsschutz mittels silbrig laubigen Blättern (links) und mittels Haaren an den Blättern (rechts). Aufnahmen L.Dierckx



Tabelle 3: Liste aller nachgewiesenen Pflanzenarten 2023

Liste aller Pflanzenarten, die bei den Vegetationsanalysen der 24 Plots von 1m x 1m nachgewiesen werden konnten. Angegeben sind neben dem Artnamen die zugehörigen Zeigerwerte nach Landolt et al. 2010, die Rote Liste (2016) und die Globale Verbreitung (Innoflora.ch) sowie die Deckung in % pro Bereich (Durchschnitt von 4 Plots, geschätzt) und durchschnittliche Artenzahl pro Bereich. Das Artenvorkommen wurden pro Bereich à vier Plots eingeteilt. Eine x bedeutet, dass sie nur in 1 Plot eines Bereichs vorkam, vier xxxx bedeutet, dass die Art in alle 4 Plots vorgefunden wurde.

Artnamen	angesät	spontan	Zeigerwerten nach Landolt & al. 2010	Nationale Rote Liste	Verbreitung global
<i>Achillea millefolium</i>		x	233+433.c-h.2n=54	schweiz 2016 nicht gefährdet	Eurosibirisch
<i>Achillea tomentosa</i>	FW		122-445.h.2n=18	Potenziell gefährdet	Südwesteuropäisch
<i>Acinos arvensis</i>		x	141-444.c-t.2n=18	nicht gefährdet	Mediterran
<i>Amaranthus hybridus</i>		x	na	na	Ursprünglich mittel- und nordamerikanisch
<i>Arenaria serpyllifolia</i>		x	2w44-444.t.2n=40	nicht gefährdet	Weltweit verbreitet
<i>Artemisia stelleriana</i>	FW		na	na	na
<i>Baumsämling</i>		x	na	na	na
<i>Bellis perennis</i>		x	343+43+3.h.2n=18	nicht gefährdet	Europäisch
<i>Cerastium fontanum</i>		x	na	nicht gefährdet	na
<i>Cerastium tomentosum</i>	FW		243+44+4.c.2n=36,72,108	na	Stammt aus Südalitalien
<i>Clematis vitalba</i>		x	343-33+3.p.l.2n=16	nicht gefährdet	Europäisch
<i>Dactylis glomerata cf.g</i>		x	334+443.h.2n=[14]28	nicht gefährdet	Eurasatisch
<i>Dianthus carthusianorum</i>		x	2n=30	nicht gefährdet	Mitteleuropäisch
<i>Dianthus gratianopolitanus</i>	FW		152-43+4.h.2n=60,90	verletzlich	na
<i>Dianthus sylvestris</i>	FW		132-534.h.2n=30	nicht gefährdet	indigen
<i>Dorycnium hirsutum</i>	FW		na	na	na
<i>Epilobium ciliatum</i>		x	3+w34-44+2.c-h.2n=18,36	na	Stammt aus Nordamerika
<i>Epilobium spec.</i>		x	na	na	na
<i>Erigeron annuus</i>		x	2+w34-443	na	Ursprünglich nordamerikanisch
<i>Eriophyllum lanatum</i>	FW		na	na	Ursprünglich nordamerikanisch
<i>Festuca valesiaca</i>	FW		na	nicht gefährdet	indigen
<i>Grasartige Pflanze</i>		x	na	na	na
<i>Hedera helix</i>		x	333-242.c-p.l.2n=48	nicht gefährdet	Europäisch-südwestasiatisch
<i>Hieracium pilosella</i>	FW		232-434.h.2n=18,36,39,45,54,63	nicht gefährdet	Eurosibirisch
<i>Hieracium tomentosum</i>		x	1+w32-434.h.2n=?	potentiell gefährdet C1	Westalpin-apenninisch
<i>Keimflinge cf.</i>		x	na	na	na
<i>Lactuca serriola</i>		x	244+44+4.k-t.2n=18	nicht gefährdet	Eurasatisch
<i>Linum spec. cf.</i>		x	na	na	na
<i>Lolium multiflorum</i>		x	3+w34+44+2.h-t.2n=14	na	Ursprünglich mediterran (?)
<i>Lolium perenne</i>		x	3+w34+43+3.h.2n=14	nicht gefährdet	Eurasatisch
<i>Medicago lupulina</i>		x	243+434.h-t.2n=16,32	nicht gefährdet	Eurasatisch-nordafrikanisch
<i>Pinus spec.</i>		x	xw+2x-4x4.p.2n=24	nicht gefährdet	Eurosibirisch
<i>Poa annua cf.</i>		x	3w34+43+3.h-t.2n=28	nicht gefährdet	Weltweit verbreitet
<i>Portulaca oleracea</i>		x	2+w34-44+3.t.2n=54	nicht gefährdet	Ursprünglich asiatisch ?
<i>Potentilla argentea</i>	FW		1+w32-434.h.2n=14,28,35,42	nicht gefährdet	Eurasatisch
<i>Salix caprea</i>		x	3w+33-333.n-p.2n=38,76	nicht gefährdet	Eurasatisch
<i>Salvia officinalis</i>		x	1+43-44+4.z.2n=14	na	Südeuropäisch
<i>Sedum acre</i>	UFA		1w+32+534.c.2n=16,24,48,60,80	nicht gefährdet	Europäisch
<i>Sedum album</i>	UFA		1w+42+434.c.2n=32,64	nicht gefährdet	Mediterran
<i>Sedum hispanicum</i>	FW		2+w+33-43+4.t.2n=40	nicht gefährdet	Südosteuropäisch
<i>Sedum montanum</i>		x	1w+32+42+4.c.2n=34-136	nicht gefährdet	Südeuropäisch
<i>Sedum rupestre</i>	UFA / FW		1+w+32-44+4.c.2n=34,68,ca.112	nicht gefährdet	Europäisch
<i>Sedum sexangulare</i>	UFA		1+w+43-53+4.c.2n=74,108	nicht gefährdet	Europäisch
<i>Senecio vulgaris</i>		x	344-43+3.t.2n=40	nicht gefährdet	Ursprünglich südeuropäisch (?)
<i>Solidago spec.</i>		x			
<i>Sonchus oleraceus</i>		x	344+43+3.t.2n=32	nicht gefährdet	Ursprünglich mediterran
<i>Stachys byzantina</i>	FW		234-454.c-h.2n=30	na	Ostmediterran
<i>Stachys recta</i>		x	na	nicht gefährdet	na
<i>Stellaria media</i>		x	334-333.t.2n=40,42,44	nicht gefährdet	Ursprünglich mediterran?
<i>Taraxacum officinale</i>		x	334-433.h.2n=24(32,16-37)	nicht gefährdet	Eurosibirisch
<i>Taraxacum spec.</i>		x	na	na	na
<i>Teucrium botrys</i>	UFA / FW		1+w+42-44+4.t.2n=10	verletzlich	Südosteuropäisch
<i>Teucrium chamaedrys</i>	UFA		1+w+42-34+4.z.2n=60	nicht gefährdet	Mediterran
<i>Thymus pulegioides</i>	UFA		2w32-434.c.2n=28	nicht gefährdet	Eurasatisch
<i>Trifolium arvense</i>		x	1+22+444.t.2n=14	nicht gefährdet	Ursprünglich mediterran
<i>Trifolium dubium</i>		x	2+w+33-43+3.t.2n=14,28,32	nicht gefährdet	Ursprünglich mediterran
<i>Trifolium hybridum</i>		x	na	na	na
<i>Trifolium repens</i>		x	xw+34+4x3.h.2n=(16)32	nicht gefährdet	Eurosibirisch
<i>Tussilago farfara</i>		x	3+43-433.g.2n=60	nicht gefährdet	Eurasatisch
<i>Urtica dioica</i>		x	3+w+35-33+x.h.2n=48,52	nicht gefährdet	Ursprüngliche Verbreitung nicht bekannt, heutig
<i>Veronica filiformis</i>		x	3+34-442.h.2n=14	nicht gefährdet	Ursprünglich südwestasiatisch
<i>Veronica persica</i>		x	344-43+3.t.2n=28	nicht gefährdet	Ursprünglich westasiatisch (?)
<i>Vicia sepium</i>		x	333-333.h.l.2n=14	nicht gefährdet	Eurosibirisch
63 Arten		19 Arten	44 Arten		



Artenname	angesät.	spontan	2023_Bereic							
			h	Braun_Gelb	h Braun	2023_Bereic	Grau	2023_Bereic	h Grau_Gelb	2023_Unter
			Plot 1-4	Plot 5-8	Plot 9-12	Plot 13-16	Plot 17-20	Monofziale PV	Monofziale PV	Plot 21-24
<i>Achillea millefolium</i>		x								x
<i>Achillea tomentosa</i>	FW		x		xx		xxx	x		
<i>Acinos arvensis</i>		x		x						
<i>Amaranthus hybridus</i>		x								
<i>Arenaria serpyllifolia</i>		x	xx							
<i>Artemisia stelleriana</i>	FW					x		xxx		x
<i>Baumsämling</i>		x	xxxx	xxxx	xx		xxxx	xxx		xxxx
<i>Bellis perennis</i>		x					x			
<i>Cerastium fontanum</i>		x			x			x		
<i>Cerastium tomentosum</i>	FW		xx			xx	xxxx	xxx		xxxx
<i>Clematis vitalba</i>		x						x		
<i>Dactylis glomerata cf. g</i>		x	x							x
<i>Dianthus carthusianorum</i>		x				x				
<i>Dianthus gratianopolitanus</i>	FW		xx				xxx			xx
<i>Dianthus sylvestris</i>	FW		x		xx		xx	xxxx		
<i>Dorycnium hirsutum</i>	FW						xx			
<i>Epilobium ciliatum</i>		x	x							xx
<i>Epilobium spec.</i>		x	x	xxxx		x		xxxx		xxxx
<i>Erigeron annuus</i>		x	x	xx				x		
<i>Eriophyllum lanatum</i>	FW		xx			xx				
<i>Festuca valesiaca</i>	FW		xx		xx		xxxx	xxx		xx
<i>Grasartige Pflanze</i>		x					x			
<i>Hedera helix</i>		x						xx		x
<i>Hieracium pilosella</i>	FW		xx			xx	xxxx	xxxx		xx
<i>Hieracium tomentosum</i>		x	xx			xx		x		
<i>Keimlinge cf.</i>		x				x				
<i>Lactuca serriola</i>		x	xx	xxxx		x		xxxx		x
<i>Linum spec. cf.</i>		x		x						
<i>Lolium multiflorum</i>		x				x				x
<i>Lolium perenne</i>		x	xx	xxxx		xx		x		
<i>Medicago lupulina</i>		x	xxxx			xx				x
<i>Pinus spec.</i>		x			x					
<i>Poa annua cf.</i>		x	x	xx						x
<i>Portulaca oleracea</i>		x					xxxx	xxxx		x
<i>Potentilla argentea</i>	FW		x			xx		xx		xx
<i>Salix caprea</i>		x	xxxx	xxxx		x	xx			
<i>Salvia officinalis</i>		x				x				
<i>Sedum acre</i>	UFA		xx	xxxx		x				x
<i>Sedum album</i>	UFA		x	xxxx		x				x
<i>Sedum hispanicum</i>	FW		x				xxxx			x
<i>Sedum montanum</i>		x	x	xxxx		x				
<i>Sedum rupestre</i>	UFA / FW		xxxx	xxxx		x		xx		xxxx
<i>Sedum sexangulare</i>	UFA		x	x	x					
<i>Senecio vulgaris</i>		x		x						
<i>Solidago spec.</i>		x		x		xx				
<i>Sonchus oleraceus</i>		x						xx		xxx
<i>Stachys byzantina</i>	FW						xxx	xxx		xxx
<i>Stachys recta</i>		x						x		
<i>Stellaria media</i>		x		x						
<i>Taraxacum officinale</i>		x	x	xxxx		x		x		xxx
<i>Taraxacum spec.</i>		x		x	x					xxx
<i>Teucrium botrys</i>	UFA / FW		xx	x	x	x	x	xxxx		xx
<i>Teucrium chamaedrys</i>	UFA									xx
<i>Thymus pulegioides</i>	UFA			xxxx		x		xx		
<i>Trifolium arvense</i>		x					x	xxxx		
<i>Trifolium dubium</i>		x				x				
<i>Trifolium hybridum</i>		x			x					
<i>Trifolium repens</i>		x	x	xx	xx	x	xx	x		xxx
<i>Tussilago farfara</i>		x								
<i>Urtica dioica</i>		x	eltweit			x	x			
<i>Veronica filiformis</i>		x	x							
<i>Veronica persica</i>		x			x					
<i>Vicia sepium</i>		x			x					



Die Vegetationserhebungen im Jahr 2023 fanden zwischen dem 5. und 10. Juni statt. Es wurden 63 Arten gefunden, 50 Arten davon wurden bereits 2022 erfasst, 13 Arten sind neu.

19 vorgefundene Arten (ca. 30%) wurden angesät, 14 davon aus der silberlaubig Dachkräutermischung, 5 davon aus der UFA-Solardach Saatmischung.

44 Arten (ca. 70%) konnten sich spontan ansiedeln. 21 Arten aus den Saatmischungen wurden nicht vorgefunden. Alle neu gefundenen Arten wurden über das Substrat, durch Tiere oder aus Samen aus der Luft eingebracht.

Unter der 63 Arten befanden sich diverse Baumsämlinge, vor allem sehr häufig *Salix caprea* und *Erigeron annuus* und *Solidago gigantea*, beide Arten stehen auf der Liste der invasiven gebietsfremden Arten [23].

Die Artenzahl ist ähnlich in allen Bereichen und Substrattypen und liegt im Durchschnitt pro Bereich zwischen 12 und 18 Arten.

Die in der Schweiz stark gefährdete Art *Filago vulgaris* wurde nicht mehr gefunden. Jedoch waren in 2023 *Achillea tomentosa* und *Hieracium tomentosum* welche potenziell gefährdet sind und (*Dianthus gratianopolitanus*), eine Art welche als verletzlich eingestuft ist, noch vorhanden.

Die durchschnittliche Deckung der Gefässpflanzen liegt bei den Plots um die bifazialen PV-Anlagen deutlich höher (70 - 96%) als unter den monofazialen PV-Anlagen (30 - 32 %)

Es ist zu berücksichtigen, dass die Artenzahlen und Arten für 2022 und 2023 nicht eins zu eins miteinander vergleichbar sind, da die Erhebungen von 2022 im Spätsommer, zwischen 23. und 24. August 2022 erfolgten, die Erhebungen von 2023 an den gleichen Plots zwischen 5. und 10. Juni. Daher kann nicht auf eine effektive Abnahme der Arten geschlossen werden.

Im Jahr 2022 und 2023 wurden gesamthaft 85 Arten gefunden, es sind in 2023 9 (12.5%) weniger als in 2022.



Abbildung 39: Vegetation im Bereich zwischen bifazialer und monofazialer PV-Anlage am 5. Juni 2023 L. Dierckx



Abbildung 40: Silberlaubige Vegetation am 5. Juni 2023 Dierckx

L.



Abbildung 41: Plot 21, Vegetation unter der Butterfly PV-Anlage.
5. Juni 2023 L. Dierckx



Abbildung 42: Plot 6, Vegetation unter der vertikalen PV-Anlage.
5. Juni 2023 L. Dierckx

2.11 Erfassung Wasserrückhaltung

Die Ermittlung der Wasserrückhaltung basiert zum einen auf der gesamten Menge an aufgebrachtem Substrat und dessen Wasserspeicherkapazität. Die Dachfläche der Anlage Mattenbachstrasse beträgt 1000 m². Je hälftig wurden Substratzusammensetzungen mit einer helleren sowie dunkleren Färbung aufgebracht. In Teilzonen wurde den Substraten Pflanzenkohle beigemischt als ergänzende vegetationstechnische Versuche, aber auch zur Erhöhung der nutzbaren Feldkapazität (pflanzenverfügbare Wasserspeicherung) des Substrataufbaus. Der Systemaufbau umfasste neben den Substraten auch spezifische Wasserspeicherelemente (Zinco FD 60), welche bezüglich der Wirkung noch ergänzt wurden durch eine gedrosselte Dacheinlaufvorrichtung.

Folgende Zahlenwerte wurden bemessen:

- Gesamtwasserspeicherung Dach
- Abflussbeiwert
- Wasserspeicherung differenzier nach Substrattypen
- Wasserspeicherungsveränderung durch Pflanzenkohle

Auf der gesamten Dachfläche können maximal 73'890 Liter Regenwasser gespeichert werden, bei voller Sättigung der Wasserspeicherelemente sowie des gesamten Porenvolumens des Substrataufbaus (Tabelle Zusammenstellung Wasserspeicherkapazitäten). Wie erwartet zeigte sich bei den Substraten mit Pflanzenkohlebeimischungen, dass die Wasserrückhaltefähigkeit zunimmt, insbesondere im Bereich der nutzbaren Feldkapazität (pflanzenverfügbares Wasser). Die Zunahme der Anlagerung des pflanzenverfügbaren Regenwassers betrug ca. 25-30 %.



Tabelle 4: Zusammenstellung Wasserspeicherkapazitäten

Substrattyp	Fläche in m ²	Schichthöhe Substrat	Wasserrückhaltekapazität Substrat in % sowie Liter/m ²						Wasserspeicherelement FD 60 in Liter	Wasserspeicherkapazität total in Liter/m ²	Wasserspeicherkapazität Gesamtfläche in Liter			
			Nutzbare Feldkapazität		Luftkapazität		total							
			%	L/m ²	%	L/m ²	%	L/m ²						
Helles Substrat	400	9 cm	15	13.5	36	32.4	51	45.9	27	72.9	29'160			
Helles Substrat mit Pflanzenkohle	100	9 cm	20	18	34	30.6	54	48.6	27	75.6	7'560			
Lava-Bims, Ziegelbruch, dunkel	400	9 cm	17	15.3	35	31.5	52	46.8	27	73.8	29'520			
Lava-Bims, Ziegelbruch, dunkel mit Pflanzenkohle	100	9 cm	21	18.9	34	30.6	55	49.5	27	76.5	7'650			
Gesamte Dachfläche										73'890				

Die helle resp. dunklere Färbungen der Substratvarianten wirken sich nicht auf die gemessenen Wasserkapazitäten aus, die Farbe hat lediglich einen Einfluss bei offener Besonnung auf die Erwärmung und somit Verdunstungsleistung. Die physikalischen Bodenparameter ergaben Differenzen aufgrund der Korngrößenzusammensetzungen der beiden Substratarten. Das helle Substrat weist dabei eine gröbere Körnung (hoher Grobporenanteil) auf wie das dunklere, was sich vor allem auf die nutzbare Feldkapazität ausgewirkt hat, welche in Zusammenhang steht mit dem Anteil an Mittel- und Feinporen in einem Substrat.

Der mittlere Abflussbeiwert der Versuchsanlage Mattenbachstrasse ist 0.4. D.h. ca. 60 % des jährlichen Niederschlags wird verdunstet.

2.12 Ermittlung Aufwand Pflege und Wartung

Für die fachgerechte Pflege von Kombinationsanlagen Dachbegrünung und PV-Solaranlage werden 1-3 Kontrollgänge pro Jahr empfohlen. Zumindest ein Kontrollgang benötigen dabei auch Dächer mit Kiesbelag, zur technischen Kontrolle der Abläufe sowie allenfalls dem Entfernen von Fremdbewuchs. Im Idealfall benötigt eine Kombinationsanlage Dachbegrünung mit PV-Nutzung keinen zusätzlichen Kontrollgang, jedoch in der Regel zumindest eine verlängerte Pflege des Bewuchses durch Entfernen von Fremdbewuchs resp. Pflanzen an unerwünschten Stellen.

Einen wesentlichen Anteil beim Aufwand für jegliche Arbeiten auf Dächern ergibt sich durch die Anforderungen der SUVA bzgl. Absturzsicherung. Bei Arbeiten im Bereich näher als 2.5 m zum Dachrand müssen ArbeiterInnen mit Personenschutzausrüstung gesichert sein, was mindestens eine zweite Person erfordert. Diese SUVA-Vorgaben führen aktuell zu vermehrten Montagen von fixen Geländern, vor allem bei Gewerbegebäuden, bei denen die optische Erscheinung des Geländers nicht störend wirkt.

Die meisten Pflanzen wachsen und entwickeln ihre Hauptbiomasse im Frühjahr ab April bei Temperaturen ab 5° C. Um Ertragsausfälle durch übermässige Beschattungen zu vermeiden sind in der Regel Mitte Mai erste Kontrollgänge zu empfehlen. Hier kann ein erster Schnitt erfolgen bei problematischem



Bewuchs resp. ein Entfernen von ganzen Pflanzen mit den Wurzeln. Ein zweiter Kontrollgang empfiehlt sich bei stark wüchsigen Bedingungen ca. Anfang Juli. Danach und mit den längeren Trockenperioden stellt sich bei den meisten Pflanzen das Längenwachstum ein und es ist lediglich ein letzter Kontrollgang allenfalls Ende September nochmals notwendig.

Im Rahmen der Untersuchungen auf der Versuchsfläche Mattenbachstrasse wurden neben den botanischen Erhebungen zur Pflanzenvielfalt auch die Entwicklung des allgemeinen Deckungsgrads der Vegetation sowie der Biomasse erfasst. Die Erhebungen erfolgten in den Jahren 2021 bis 2023.

Andreas Dreisiebner mit seinem Team hat jeweils die Vegetationspflege durchgeführt.

Tabelle 5: Aufwand für Vegetationspflege

Durchgeführte Arbeiten im Jahr	2021	2022	2023
Arbeitsaufwand in h	12	16	20

Es zeigte sich, dass die Optimierungsmassnahmen bzgl. der Regenwasserrückhaltung mit dem zusätzlichen Einbau der Wasserspeicherplatten FD 60 sowie der Einlaufdrosselung zu einer deutlich erhöhten Biomassenentwicklung geführt hat in einzelnen Bereichen der Dachbegrünungen. Es ergaben sich einige Zonen mit starkem Kleebewuchs, siehe Abbildung 43).

In Bezug gesetzt zum Anlagetyp der vertikalen PV-Module zeigt sich hier nun deutlich, dass sich die optisch sehr augenfällige Biomasse kaum auf den Ertrag auswirkt. Zudem ist die Vegetationspflege sehr einfach zu bewerkstelligen, da Bewegungsfreiheit vorhanden ist zwischen den Modulreihen, Mähergeräte einfach und effizient eingesetzt werden können.



Abbildung 43: Zone mit verstärktem Kleebewuchs auf der Versuchsanlage Mattenbachstrasse. Foto: Andreas Dreisiebner



Bedeckung	Kiesdach	Substrat	Substrat	Substrat	Substrat
	aufliegend	geständert West-Ost, Schmetterling	vertikale Ständerung, bifaziale Module	aufliegend	aufliegend, West-Ost
Stromproduktion	100%	100%	100%	90% (ohne Pflegemassnahmen kann sich der Ertrag deutlich reduzieren)	90% (ohne Pflegemassnahmen kann sich der Ertrag deutlich reduzieren)
Bewuchs	Kein Bewuchs Trennlösungen möglich	Bewuchs nur in Bereichen mit gutem Zugang und effizienten Pflegemöglichkeiten. Pflanzen müssen nur bei sehr hohem Wuchs entfernt werden	Bewuchs nur in Bereichen mit gutem Zugang und effizienten Pflegemöglichkeiten	Bewuchs nur in Bereichen mit gutem Zugang jedoch nicht mit effizienten Mitteln möglich (Mähergerät). Pflanzen müssen bereits bei geringer Wuchshöhe entfernt werden.	Bewuchs in Bereichen mit sehr schlechtem Zugang und nicht mit effizienten Mitteln möglich (Mähergerät). Pflanzen müssen bereits bei geringer Wuchshöhe entfernt werden.
Pflegeaufwand		1 x jährlich	1 x jährlich	2 x jährlich	2-3 x jährlich
Betriebskosten	3 Rp/kWh	3-4 Rp/kWh	3-4 Rp/kWh	5-6 Rp/kWh	7-15 Rp/kWh
Zusatz		Naturförderelemente	Naturförderelemente		

Abbildung 44: Schätzung der Betriebskosten unterschiedlicher PV-Anlagentypen auf Energiegründächern.

Erfassung der Biomasse

Begrünte Dachflächen weisen oft einen relativ hohen Moosanteil auf. Moos kann sich sehr gut etablieren aufgrund der Standortbedingungen vor allem im Winterhalbjahr. Die anhaltende Feuchtigkeit im Winter entsteht im Untergrund, wo das Wasser oft stehen bleibt. Da im Sommer die Trockenheit mit dem Wassermangel dazu führt, dass sich keine sehr dichte Vegetation an Gräsern und Kräutern etablieren kann, wird der Moosanteil nie ganz verdrängt, wie es ansonsten auf Bodenstandorten der Fall ist. Im Rahmen der Untersuchung wurden an 6 verschiedenen Stellen der Moosanteil, Deckungsgrad und Wuchshöhe der Vegetation ermittelt. Verglichen wird die Wuchsleistung der beiden unterschiedlichen Substratarten sowie die Ergänzungen mit Pflanzenkohle.



Abbildung 45: Vegetationsentwicklung und Deckungsgrad der Pflanzen im Frühjahr 2023. Foto: Mathias Meister



Tabelle 7: Moos- und Vegetationsdeckung nach Einrichtungstyp Substrat.

System	Substrat	Deckungsgrad in %	Anteil Moos in %	Max. Vegetationshöhe in m	Ø Vegetationshöhe in m	Deckung ohne Moos in %
Butterfly	Helles Substrat	45	1	0.4	0.1	54
Vertikal	Helles Substrat	97	40	0.49	0.08	57
Vertikal	Helles Substrat, Pflanzenkohle	85	90	0.3	0.04	55
Vertikal	Dunkles Substrat, Pflanzenkohle	95	45	0.33	0.08	50
Vertikal	Dunkles Substrat	100	2	0.3	0.16	98
Butterfly	Dunkles Substrat	70	10	0.35	0.18	60

Unter den Butterfly-Systemen war der Moosanteil sehr gering, was auf eher trockene Verhältnisse schliessen lässt, da hier weniger Niederschlag direkt einfallen dürfte. Ob allenfalls auch die geringere Besonnung zum tiefen Moosanteil beigetragen hat, kann leider nicht abschliessend beantwortet werden. Beim hellen sowie beim dunklen Substrat weist der Bereich mit Pflanzenkohlebeimischungen den höchsten Moosanteil auf, was auf eine hohe Feuchtigkeit im Substrat hinweist. Die Pflanzenkohle erhöht die Anlagerungsfähigkeit der Substrate für Wasser und Nährstoffe.

Der Deckungsgrad der Pflanzen ohne Moos ist im Vergleich über alle Substrattypen ähnlich und schwankt 50 und 60 %. Lediglich beim dunklen Substrat bei den vertikalen bifazialen Modulen liegt der Deckungsgrad bei fast 100 %. Aufgrund dieser hohen Deckung dürfte auch der geringe Moosanteil zu begründen sein, da die höher wachsenden Pflanzen dem Moos das Licht nehmen. Bei hoher Vegetationsdeckung wurde auch eine ca. doppelt so hohe durchschnittliche Vegetationshöhe Anfang Mai ermittelt mit 16-18 cm.

Auf der Anlage Mattenbachstrasse scheint das dunklere Substrat aufgrund der etwas stärkeren Erwärmung durch den reduzierten Albedoefekt eine etwas höhere Wuchsleistung der Vegetation zu bewirken. Begünstigend dürfte die hohe Wasserverfügbarkeit sein durch den Einbau der Wasserspeicherelemente.



3 Schlussfolgerungen und Ausblick

3.1 Zusätzliche Kosten Solardach zu Solargründach

Invest

Im Kontext des Projekts gibt es mehrere Möglichkeiten Kostenvergleiche anzustellen, da sowohl das Gründach selbst wie auch die PV-Systeme in ihren verschiedenen Ausführungen und nochmals die Anpassung der Systeme aneinander (z.B. spezielle Unterkonstruktionen) Kosten verursachen.

Der vielleicht aussagekräftigste Vergleich im Zusammenhang mit den hier relevanten Fragestellungen sind die zusätzlichen Kosten, die im Vergleich zu einer heute typischen «flachen» PV-Anlage auf einem entsprechenden Kiesdach entstehen.

Die Zusammenfassung der Kosten von PV und Gründach ist in diesem Fall sinnvoll, da die Unterkonstruktionen an den Einsatz auf dem Gründach angepasst und komplexer aufgebaut sind.

Die Modulpreise werden hier nicht betrachtet, da die 48-zelligen Module Sonderanfertigungen mit deutlich höheren Kosten waren.

Die im Projekt angefallenen Kosten im Bereich Gründach und Unterkonstruktion lagen zusammengefasst 41 % über den Kosten für ein flach und niedrig gebautes PV-System auf einem Kiesdach.

Tabelle 8: Mehrkosten im Projekt im Vergleich zu Kiesdach, ohne Module.

Mehrkosten Vgl. zu Kiesdach	Mehrkosten [%]
Gründach Hardware (Drosseln, Speicherelemente, etc.)	15
Substrat (Spezial, hohe Tiefe), Zusatzmaterial, usw.	11
PV, ohne Module	16
Mehrkosten im Projekt zu Kiesdach	41

Diese Angaben beziehen sich dabei auf die in diesem Projekt eingesetzten Gründach-, PV- und Unterkonstruktions-Komponenten. Die Kosten sind dabei teilweise deutlich höher als bei Einsatz reiner Serienprodukte. Auch die Unterkonstruktionen liegen mit den geringen Stückzahlen im Preis höher. Die Angaben können somit als oberste Grenze angesetzt werden. Die Kosten sind dabei nicht klar zu trennen, Wasserspeicherelemente in der UK dienen auch dem Gründachaufbau, andererseits werden Zusatzmaterialien beim Verbau der UK eingesetzt.

Dabei ist anzumerken, dass einige der Kosten direkt dem Versuchs- und Demonstrationscharakter des Projekts zuzuschreiben sind, wie beispielsweise die Ausführung, welche einfachen Zugang für Besucher ermöglicht (z.B. Geländer), die unterschiedlich hellen Spezialsubstrate, die so nicht mehr nötig wären, usw.

Unter Berücksichtigung dieser Faktoren kann geschätzt werden, dass bei gleicher installierter Leistung die zusätzlichen Kosten eines Systems ähnlich wie im Projekt realisiert im Vergleich zu einer PV-Installation auf einem Kiesdach betragen:

- + 15-25 % Invest für Butterfly auf Gründach, vs. konventionell, flach auf Kiesdach. Erträge vergleichbar zu Butterfly in Standardanlage.
- + 25-35 % Invest für Vertikal auf Gründach, vs. PV konventionell, flach auf Kiesdach, dabei 70-95 % der spezifischen Erträge von konventionellen Systemen, je nach Jahr und ausgewähltem Vergleichssystem. Im Mittel kann als Faustformel von einem um etwa knapp 20 % geringeren Ertrag ausgegangen werden.



Stellt man sich auf den Standpunkt, dass die Zusatzkosten für PV nicht mit jenen der Dachbegrünung vermischt werden sollten, da die ökologisch wertvolle Begrünung an sich ein wünschenswertes Ziel und auch allein sinnvoll umsetzbar ist, dann bleiben bei Einsatz gleicher Module im Wesentlichen die Unterkonstruktionen und verbundene Zusatzkosten (Materialien, Arbeit, usw.) als zusätzlicher Kostenfaktor. Alle Unterkonstruktionen, die in diesem Projekt eingesetzt wurden, sind für einen Einsatz auf Gründächern ausgelegt. Sie werden durch das Substrat ballastiert und beinhalten zugleich Wasserspeicherelemente (Abbildung 9). Diese sind teurer als vergleichbare Unterkonstruktionen für Standardanwendungen, sowohl für Butterfly- wie auch Vertikalsysteme. Die vertikalen Unterkonstruktionen lagen bei diesem Projekt preislich pro Stück um einen Faktor 1.5 (48-Zeller) bzw. 2.2 (72-Zeller) höher als für die Butterfly-Version des gleichen Herstellers, wobei die Preise bei höheren Stückzahlen sinken werden.

Die Kosten für eine mittelgrosse PV-Anlage ab 50 kWp werden zum Zeitpunkt der Berichtserstellung geschätzt auf (mündliche Mitteilung Herr Dreisiebner):

Flach auf Kiesdach:	1500.-/kWp
Butterfly auf Gründach:	1700.-/kWp
Vertikal auf Gründach:	1900.-/kWp

Pflege, Wartung, Betriebskosten

Der Aufwand für Pflege und Wartung der vertikalen Systeme entsprach den Erwartungen und konnte mit 1-2 Kontrollgängen mit dem Entfernen von zu stark wuchernden Pflanzen gut bewältigt werden. Die Pflegekosten für die Vegetation auf der Anlage Mattenbachstrasse dürften sich damit im Rahmen von Fr. 1400.- bis 1900.- pro Jahr bewegen, was gut 20 % höher liegt als bei einer entsprechenden Dachbegrünung ohne PV-Anlage. Dies entspricht auf die installierten Wp bezogen etwa 15-20 CHF / kWp oder grob überschlagen bei 1.6-2.1 Rp / kWh, rein für die Wartung der Begrünung. Dabei ist der Aufwand etwa derselbe wie für andere PV-Systemtypen mit guter Zugänglichkeit, wie beispielsweise höher aufgeständerte Butterfly-Systeme. Eine klare Grenze ist hier nicht zu ziehen, wobei gerade bei starkem Bewuchs die nochmals bessere Zugänglichkeit der vertikalen Systeme zum Tragen kommen kann. Wie in Abbildung 44 und dem zugehörigen Abschnitt beschrieben können die Wartungskosten ungünstiger ausgelegter Systeme mit schlechterer Zugänglichkeit (flach, niedrig, dicht) sehr viel höher liegen, insbesondere bei stark ausgeprägter Begrünung.

Zu den Wartungskosten aufgrund der Begrünung kommen noch allgemeine Betriebskosten in vergleichbarer Höhe dazu, welche auch bei PV-Systemen auf einem Kiesdach anfallen.

Die gesamten Betriebskosten der Vertikal- und der Butterfliesysteme, liegen somit bei 3-4Rp/kWh.

In Zukunft werden vermehrt speziell entwickelte Mähroboter für Energiegründächer die Arbeit übernehmen, diese sind ab Sommer 2025 erprobt und erhältlich. Hierzu läuft ein Innosuisse-Projekt mit der Firma WepfAir aus Andelfingen und 2 Abteilungen der ZHAW in Winterthur, Der Mähroboter hat neben dem Mähwerk noch zusätzlich Kamera, Infrarot- und Wärmebildkamera damit er auch in technische Probleme als erste Anlaufstelle zumindest optisch angehen kann. Mit diesem Mähroboter werden die Kosten für den Unterhalt massiv eingeschränkt und sind dann noch ev. max. 20% höher und können dank der Kameras noch weiter gesenkt werden. Das Ziel ist dank dem Mähroboter+ keine höheren Kosten über die Lebensdauer der Anlage beim Unterhalt des Solargründaches gegenüber dem Solar-dach zu erhalten.



Für PV-Systeme in den verschiedenen Konfigurationen ergeben sich Invest- und Betriebskosten, sowie eine LCOE aus einer einfachen Abschätzung bei einer angenommenen Betriebsdauer von 25 Jahren, wie in Tabelle 9 dargestellt.

Tabelle 9: Invest- und Betriebskosten, sowie LCOE bei 25 Jahren Betriebsdauer.

	Invest CHF / kWp	Betrieb CHF / kWp	LCOE (25 Jahre)
Flach auf Kiesdach	1500	15-20	0.08
Butterfly auf Gründach	1700	30-40	0.10
Vertikal auf Gründach	1900	30-40	0.11 ⁺ -0.14*

+ bei gleichem spez. Ertrag wie bei Butterfly, also geringer GCR als im Projekt

* bei ca. 850 kWh pro kWp, wie in Mattenbach realisiert, also mit 50 % GCR

Bei den Kosten wurden zwar die geringeren Erträge vertikaler Systeme berücksichtigt, nicht jedoch eventuelle positive Effekte, die sich eventuell zukünftig durch Vermeidung von Lastspitzen ergeben können (Tarife, Eigenverbrauch). Beim Gründach mit ökologisch wertvoller Begrünung wurden positive Effekte, wie Einsparungen bei der Gebäudekühlung nicht berücksichtigt. Eine Bachelorarbeit zur Ermittlung des Effekts unter Schweizer Gegebenheiten (Gebäude, Klima) wird in Kürze an der ZHAW (IEFE) beginnen. Nicht berücksichtigt wurden auch Einsparungen durch Gemeindevorgaben zur Regenwasserrretention.

Die Erträge und Kosten geben die Verhältnisse im Projekt wieder. Engere oder weitere Staffelungen haben einen Effekt auf beide Faktoren und werden im nächsten Abschnitt untersucht. Ein Projekt mit realen Modulen, ähnlich zum Mattenbach-System, aber mit einer GCR von 1 ist in Landquart, auf dem Dach des Werkhofs, mit Unterstützung der Gemeinde und des Kantons Graubünden, projektiert

3.2 Flächenbedeckung und Ertrag verschiedener PV-Systemanordnungen

Beim ersten Testsystem auf dem Seniorenheim in Winterthur (Abbildung 2) wurde bewusst eine niedrige GCR von ca. 37 % umgesetzt, um die Verluste beim spezifischen Ertrag zu minimieren. Tatsächlich erreicht die PV-Anlage einen spezifischen Ertrag von 942 kWh/kWp über ein Jahr, was nahe bei typischen Werten von ca. 1000 kWh/kWp für Ost/West-ausgerichtete Module mit geringem Neigungswinkel liegt. Man hat somit kaum höhere Verluste im spezifischen Ertrag, allerdings ist die insgesamt installierte Leistung limitiert.

Beim Mattenbach-Projekt hingegen stehen die vertikalen Module mit GCRs von 50 % und 55 % deutlich dichter. Auch die im Projektbericht beschriebenen spezifischen Erträge der vertikalen Systeme liegen somit erwartungsgemäss niedriger als jene der flach installierten konventionellen Anlagen. Je nach Wahl der einzelnen Systemtypen zum direkten Vergleich werden 2023 mit den vertikalen Systemen 83-95 % des Ertrags der klassischen Systeme erreicht, während dies 2022 nur 71- 86 % waren. Im Mittel kann von einem grob knapp 20 % geringerem Ertrag ausgegangen werden. Die Variationen röhren von den Einstrahlungsbedingungen in den Jahren her, die sich bei den Systemen unterschiedlich stark auswirken.

Bei engerer Staffelung werden bei verringertem spezifischem Ertrag die insgesamt installierte Leistung und der absolute Ertrag pro Dachfläche gesteigert. Bei den in Mattenbach realisierten GCRs liegen die flächenbezogenen Erträge im Mittel ebenfalls um ca. knapp 20 % niedriger als jene eines südausgerichteten monofazialen Systems mit gleicher GCR (Abbildung 50). Der Unterschied zu flach installiertem



Ost/West-Systemen fällt etwas geringer aus. Die GCR spielt für letztere Systeme mit flachen Kippwinkeln im Hinblick auf den Ertrag jedoch nur eine untergeordnete Rolle.

Der spezifische Energieertrag (kWh/kWp), wird bei vertikal installierten Modulen in dichter Anordnung immer niedriger sein als bei typischen Anlagen mit geringem oder mittlerem Neigungswinkel. Es ist jedoch offensichtlich, dass sich die Frage, ob es sinnvoll ist, ein vertikales bifaziales System auf einem Gründach zu installieren, nicht auf einen optimierten spezifischen Energieertrag reduzieren lässt. Sollte dies das Ziel sein, wäre es am besten, nur wenige Module mit optimierter Südausrichtung oder nahezu freistehende bifaziale Module in vertikaler Position zu installieren. Allerdings wäre dann die Gesamtleistung und der erreichbare Gesamtenergieertrag sehr begrenzt.

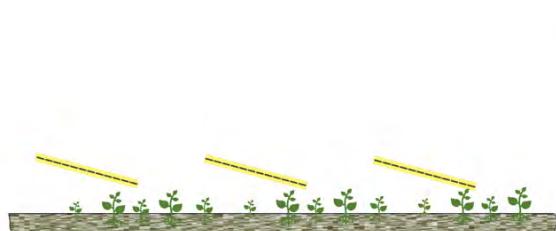
Auch im bisherigen Verlauf dieses Projektberichts stand der spezifische Ertrag im Vordergrund. Der spezifische Energieertrag (kWh/kWp) ist von besonderem Interesse, wenn die Modulpreise ein dominierender Kostenfaktor sind. Aufgrund der in den letzten Jahrzehnten stetig sinkenden Modulpreise wurden jedoch Anlagen mit geringeren spezifischen Energieerträgen zunehmend interessant. So sind Anlagenkonzepte mit nahezu 100% GCR mit flachen Kippwinkeln und Ost/West-Ausrichtung heute der gängigste Installationstyp auf großen Flachdächern, bei welchem der absolute Energieertrag maximiert wird, auch wenn die spezifischen Erträge geringer sind. Andere Beispiele sind alle Anlagen mit von der früher dominierenden Südausrichtung abweichenden Ausrichtungen oder auch die meisten BIPV-Anlagen, insbesondere solche mit farbig verblendeten Frontseiten. Bei all diesen Beispielen wird der optimal erreichbare spezifische Energieertrag geopfert, um andere Ziele, hier optimierte Gesamtenergieerträge oder Fassadennutzung, zu erreichen.

Ähnliche Voraussetzungen gelten für Vertikalmodule auf Gründächern. Es ist bekannt, dass der spezifische Energieertrag durch die gegenseitige Verschattung sinkt und die Albedo auf Gründächern vergleichsweise gering ist. Andererseits ermöglicht dieser Ansatz 100 % begrünte Dächer und ist vorteilhaft für die Pflege, was in Abbildung 46 bis Abbildung 49 illustriert wird. Darüber hinaus kann eine dichte Anordnung von Vertikalmodulen als Option in Betracht gezogen werden, um den Gesamtenergieertrag für eine bestimmte Dachfläche zu maximieren und gleichzeitig den Charakter eines Gründachs zu erhalten. Es ist wichtig hervorzuheben, dass es eine nichttechnische Abwägung ist, inwieweit die Vorteile die zusätzlichen Kosten aufgrund der größeren Anzahl von Modulen bei dieser Auslegungsvariante überwiegen.



Quelle: Muntwyler et. al. Swiss PV conference 2019

Abbildung 46: PV-System mit flachem Kippwinkel und teilweiser PV-Belegung der Dachfläche. Die verbleibende Fläche kann begrünt werden.



Mit Erlaubnis der Paul Bauder GmbH & Co. KG

Abbildung 47: PV-System mit moderatem Kippwinkel und teilweiser PV-Belegung der Dachfläche mit Abstand zum Grund. Die verbleibende Fläche und auch die Fläche unter den Modulen kann begrünt werden. Bei ausreichendem Abstand und Höhe ist der begrünte Bereich für Wartungsarbeiten zugänglich.

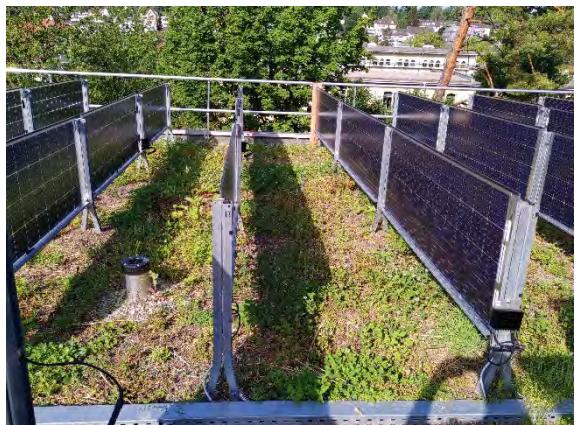


Abbildung 48: PV-System mit vertikalen Modulen. Die Fläche zwischen den Modulen kann begrünt werden und ist für Wartungsarbeiten zugänglich.

Werden nur begrenzte Dachflächenanteile mit konventionellen Anlagen belegt, dann kann man von einer Kombination von PV und Gründach sprechen. Beispiele werden in Abbildung 46 und Abbildung 47 gezeigt.

Hierbei ist zusätzlich anzumerken, dass beispielsweise das Planungs- und Baugesetz des Kantons Zürich (BZO) seit 2015 ökologisch wertvolle Begrünungen verlangt, auch in Kombination mit Solaranlagen. Laut Art. 11 Abs.1 BZO Dachbegrünung ist in allen Zonen der nicht als begehbarer Terrasse genutzte Bereich eines Flachdachs ökologisch wertvoll zu begrünen, auch dort, wo Solaranlagen installiert sind. Die Pflicht, ökologisch wertvoll zu begrünen, besteht, soweit dies technisch und betrieblich möglich sowie wirtschaftlich tragbar ist. Gemäss dieser Verordnung müssen seit 2015 Solaranlagen und Dachbegrünung kombiniert werden, was bedeutet, dass sie nicht räumlich getrennt, sondern übereinander angeordnet werden [24].

Beim Beispiel in Abbildung 47 ist prinzipiell auch der Bereich unter den Modulen begrünbar und zur Wartung zugänglich. Dies ist auch beim Beispiel mit den vertikalen Modulen in Abbildung 48 möglich, aber nur bedingt bei der Anlage in Abbildung 46.

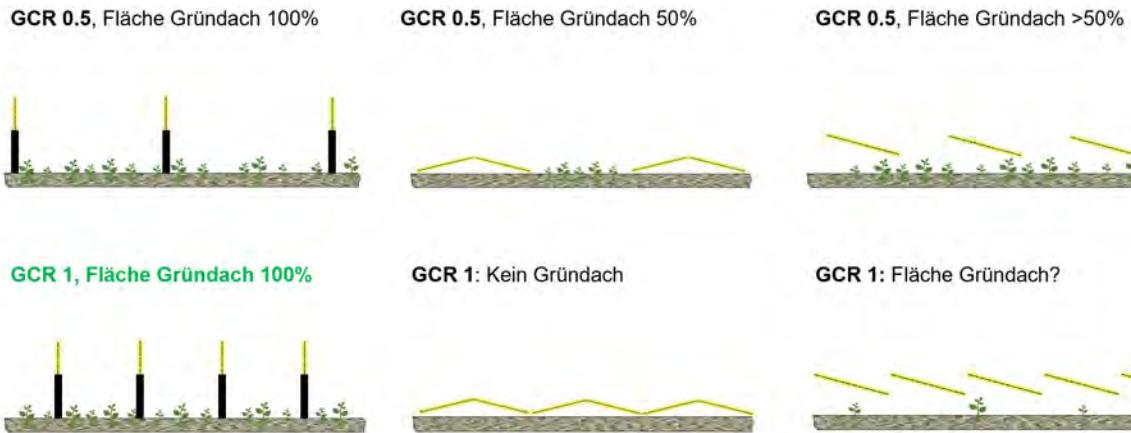


Abbildung 49: Bei zunehmender GCR nimmt der Gründachanteil bei den nicht-vertikalen Systemen immer weiter ab. Irgendwann kann man nicht mehr von einem Gründach sprechen, ohne dass es hierfür eine feste Grenze gibt. Bei vertikalen Systemen bleibt die gesamte Dachfläche begrünt.

Sowohl Butterfly-Systeme als auch Varianten mit nach Süden ausgerichteten etwas höher aufgeständerten Modulen können eine Alternative zu den vertikal aufgeständerten bifazialen Modulen darstellen. Wird die GCR erhöht und somit die Anordnung dichter mit PV belegt, dann wird der Gründachanteil bei den nicht-vertikalen Systemen immer kleiner. Ab einer gewissen GCR wird auch bei Systemen wie in Abbildung 47 keine wirkliche Begrünung unter den Modulen und kein einfacher Wartungszugang mehr möglich sein, insbesondere bei starkem Bewuchs wie bei dem hier untersuchten Gründach mit hoher Substratstärke (siehe folgende Abschnitte). Die Checkliste «Dachbegrünungen und Solaranlagen» der Stadt Zürich [26] geht auf diese Gegebenheiten ein und empfiehlt eine Ausdünnung der Substratdicke im Bereich vor den Modulen, um den Bewuchs zu verringern, wobei an anderer Stelle die Dicke erhöht werden soll, um die Qualität der Begrünung und den Wasserrückhalt aufrecht zu erhalten. Ab einem Reihenabstand von 50 cm wird empfohlen nur noch ein durchgehend dünnes Substrat zu verwenden, um hohen Bewuchs zu vermeiden, wobei in diesem Dokument explizit darauf hingewiesen wird, dass es sich in diesem Fall nicht mehr um eine ökologisch wertvolle Begrünung handelt. Bereits bevor dieser Punkt erreicht ist, kann man nicht mehr wirklich von einem Gründach sprechen, ohne dass es hierfür eine klare Grenze gibt.

Bei den vertikalen Systemen kann dagegen praktisch die gesamte Dachfläche als begrünt betrachtet werden, auch bei sehr hohen GCR (Abbildung 49). Dies motiviert die Untersuchung noch enger gestaffelter Systeme als sie auf dem Solargrün dach in Mattenbach realisiert wurden. Es soll im Folgenden untersucht werden, ob eine nochmals doppelt so GCR von 100 % einen Ansatz darstellen können, um die Vorteile eines Gründachs mit PV zu kombinieren und dabei auch hohe absolute Erträge zu erzielen.

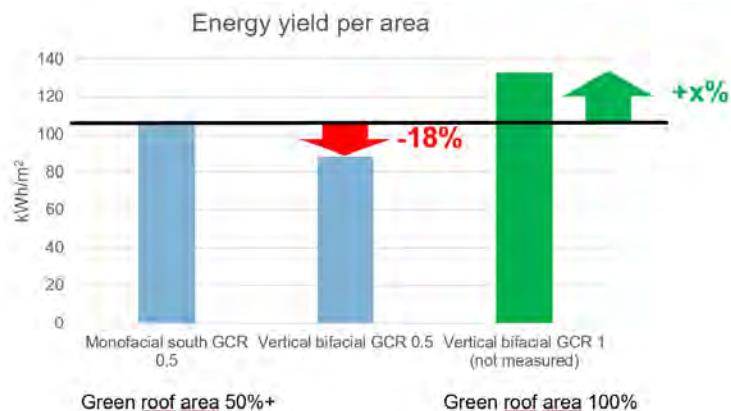


Abbildung 50: Bei den in Mattenbach realisierten GCRs liegen die flächenbezogenen spezifischen Erträge in etwa um 18 % niedriger als jene eines südausgerichteten monofazialen Systems mit gleicher GCR. Der Unterschied fällt für flach installierte Ost/West-Systeme etwas geringer aus.

Aus Simulationen ergeben sich die spezifischen Erträge für solche engen und sehr engen Anordnungen. In Abbildung 51 werden die gemessenen spezifischen Erträge der vertikalen Systeme in Mattenbach und des Vorgängerprojekts «Seniorenheim» abgebildet. Dabei wird die Ausrichtung berücksichtigt und die Abhängigkeit von der Modulreihenausdehnung und der GCR dargestellt (siehe dazu auch Abbildung 3). Ebenso wird auf eine GCR von 100 % extrapoliert (grünes Kreuz).

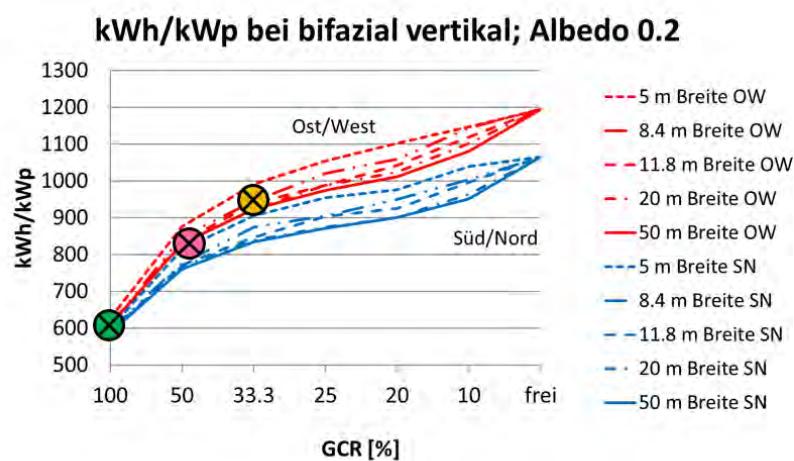


Abbildung 51: Simulation (Linien) und Messwerte (Kreuze) des jährlichen spezifischen Ertrags der vertikalen Systeme «Seniorenheim» (gelb) und Mattenbach (rot). Extrapolation des spezifischen Ertrags auf eine GCR von 100 % (grünes Kreuz).

Interessant ist aber neben dem spezifischen Ertrag auch die Frage, wie hoch der mögliche flächen spezifische Ertrag mit vertikalen Modulen sein kann, wenn man auch noch dichtere Belegungen als in diesem Projekt in Betracht zieht.

Derartige Variationen mit noch engeren Belegungen wurden auch experimentell an miniaturisierten Systemen im parallelaufenden BFE-Projekt «PV-Eye» durchgeführt. In Abbildung 52 werden beispielhaft zwei Teststände mit varierter GCR (50 % und 100 %) auf weißem Untergrund (Albedo ca. 50 %) abgebildet. Einzelne Module der Teststände werden gemessen, was einen direkten Vergleich der Messwerte und eine Validierung von Simulationen ermöglicht.



Abbildung 52: Miniaturisierte Teststände aus dem PV-Eye Projekt in welchem die Effekte unterschiedlicher GCRs (0.5 und 1) untersucht werden (Albedo 0.5)

In Abbildung 53 wird der spezifische Ertrag für die miniaturisierten Systeme mit GCR 50% und GCR 100% dargestellt. Ebenso wird dargestellt, wie sich der Ertrag eines Moduls am äusseren Rand (Nord) vom zentralen Modul unterscheidet. Hierdurch kann die Grösse von «Randeffekten» erfasst werden, die auf Dächern mit inhärent begrenzter Ausdehnung eine Rolle spielen, sowie der Effekt der Modulreihenausdehnung erfasst werden.

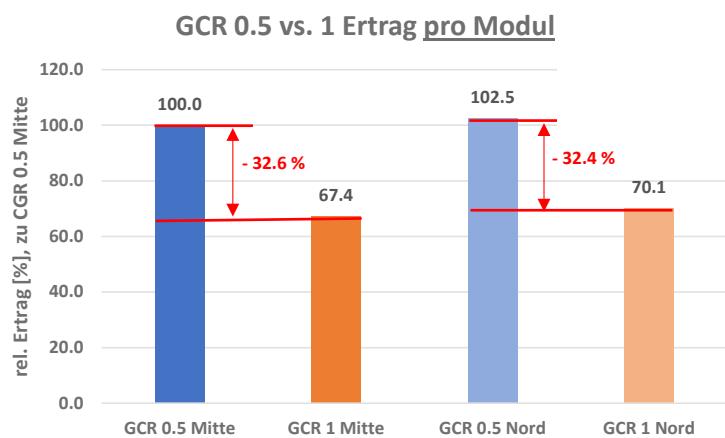


Abbildung 53: Spezifischer Ertrag aus vergleichenden Untersuchungen miniaturisierter Teststände mit varierter GCR (0.5 und 1) und Position im System (Mitte und aussen «Nord»).

Aus den spezifischen Erträgen lassen sich die flächenbezogenen Erträge berechnen. Qualitativ ist klar, dass diese einem gegenläufigen Trend folgen. Aus den Simulationen folgt ein Verlauf wie in Abbildung 54 dargestellt.

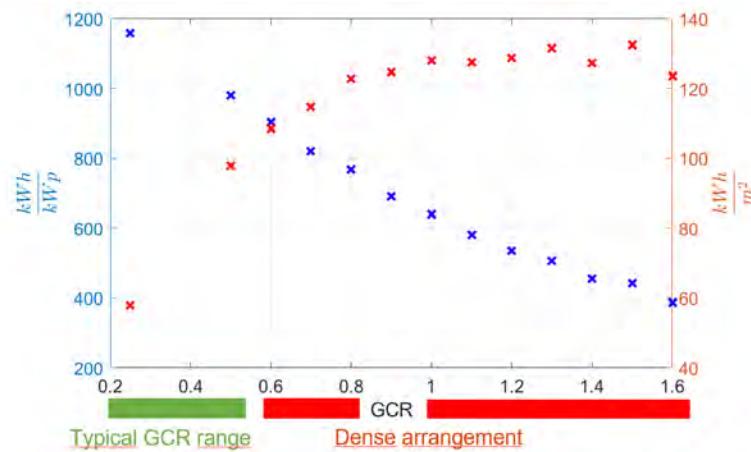


Abbildung 54: Der spezifische und der flächenbezogene Ertrag folgen bei varierter GCR einem gegenläufigen Trend.

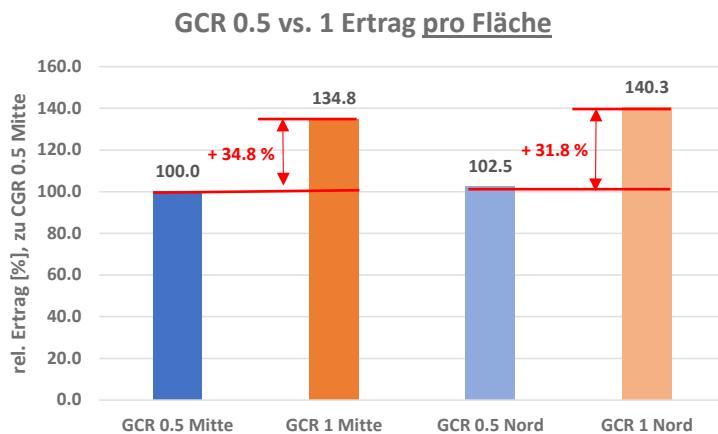


Abbildung 55: Flächenbezogener spezifischer Ertrag aus vergleichenden Untersuchungen miniaturisierter Teststände mit varierter GCR (0.5 und 1) und Position im System (Mitte und aussen «Nord»).

In Abbildung 55 werden die entsprechenden Messwerte aus dem miniaturisierten System dargestellt. Die Messungen an den miniaturisierten Systemen stimmen sehr gut mit den Ergebnissen der Simulationen in Abbildung 51 und Abbildung 54 überein. Es wird jeweils für den spezifischen Ertrag ein etwa 33% geringerer Wert und ein betragsmäßig ähnlicher, aber positiver relativer Wert von 30-35 % für den flächenbezogenen spezifischen Ertrag gemessen.

Neben den Energieerträgen sind auch die Kosten bei derartigen Überlegungen relevant. Bei zugrunde liegender Kostenstruktur des Mattenbach-Projektes ergibt sich bei einer Erhöhung der GCR von 50 % auf 100 % folgender Vergleich (Abbildung 56)

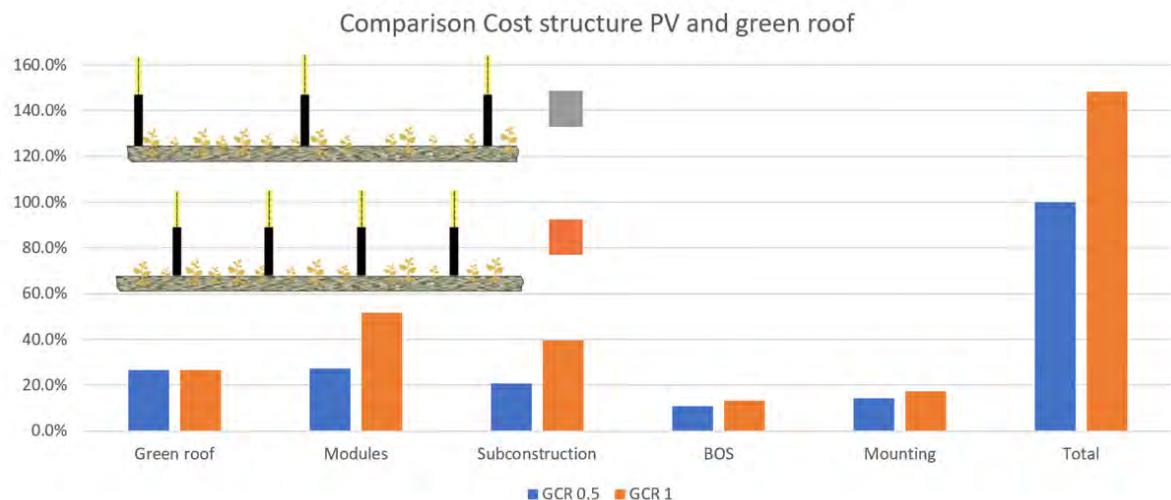
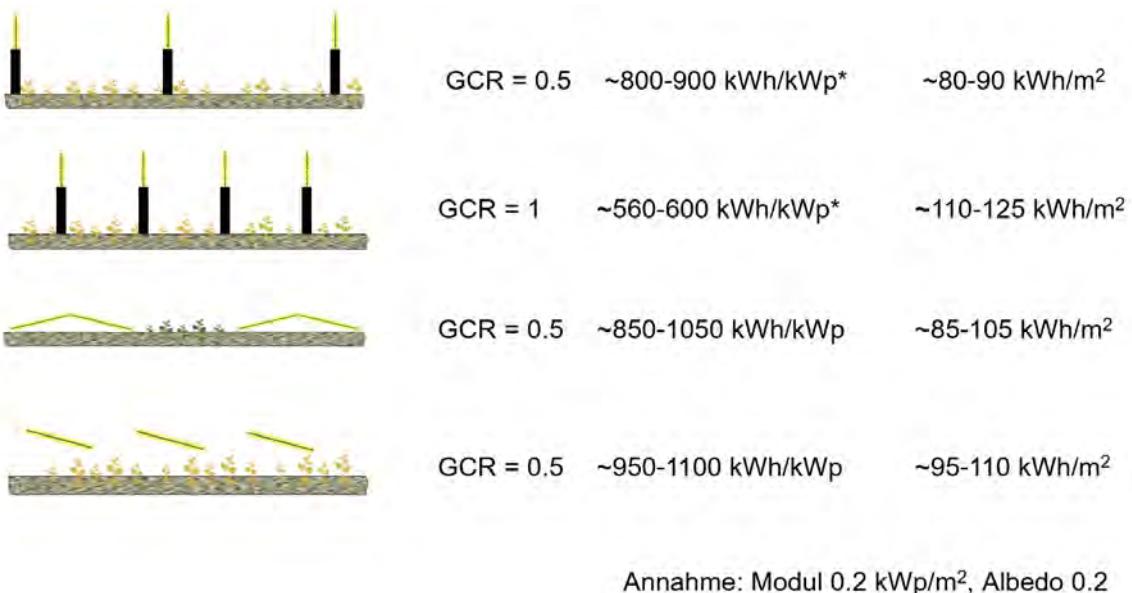


Abbildung 56: Veränderte Kostenstruktur bei verdoppelter installierter Leitung auf der gleichen Fläche, wodurch sich die GCR von 50% auf 100% erhöht.

Die Verdopplung der GCR entspricht einer verdoppelten installierten Leistung in kWp und somit auch der doppelten Anzahl verbauter PV-Module. Nach der zuletzt gezeigten Kostenverteilung bewirkt dies eine Erhöhung der totalen Kosten um 48 %. Je geringer der Anteil der Modul- und Unterkonstruktionskosten an den Gesamtkosten des Solargründachs, desto geringer fällt die Erhöhung der totalen Kosten aus. Es muss erwähnt werden, dass die 48-zelligen Module und die Unterkonstruktionen keine Serienprodukte waren und die Kosten entsprechend höher lagen.



* Je nach Systemgrösse, da der Ertrag vertikaler Systeme auch von der Ausdehnung abhängig ist

Abbildung 57: Zusammenfassende Abschätzung der spezifischen und flächenbezogenen Erträge verschiedener PV-Auslegungen auf einem Gründach.

Der Erhöhung der Kosten steht ein höherer absoluter Ertrag auf der Dachfläche entgegen. Zusammenfassend lassen sich die Ergebnisse der Untersuchungen wie in Abbildung 57 darstellen:



Der Nachteil der geringeren Erträge bei vertikal installierten Modulen kann durch einen geringeren Reihenabstand ausgeglichen werden. Es gibt keine Grenze, ab welcher man bei einer flachen konventionellen PV-Installation aufgrund der Flächenbelegung mit Modulen nicht mehr von einem Gründach sprechen kann. Setzt man als Grenze eine GCR von 50 % an, dann kann somit mit einem vertikalen System und einer GCR von 100 % ein sogar höherer absoluter Ertrag (ca. + 10-20% je nach Vergleichssystem) auf der Dachfläche erzeugt werden, wobei das Dach gleichzeitig zu praktisch 100 % als Grünfläche gewertet werden kann (Abbildung 57). Mit der Kostenstruktur der Projektrealisierung erhöht sich der Invest für das gesamte Solargründach in diesem Fall um 48 % im Vergleich zum vertikalen System mit einer GCR von 50 %.

Es gibt auch aus ökonomischer Sicht auch günstige Effekte der vertikalen Anordnung. In jüngster Zeit treten wegen der klassisch installierten PV-Anlagen immer häufiger negative Strompreise am frühen Nachmittag am Markt auf. Hier kann das kamelhöckerartige Erzeugungsprofil der vertikal installierten Module Abhilfe leisten. Peakspitzen zur Mittagszeit werden vermieden, wohingegen vormittags und nachmittags zwei Erzeugungsmaxima auftreten. Es gibt somit die Möglichkeit das Erzeugungsprofil an den Bedarf anzupassen, sowohl zur Vermeidung der Mittagslastspitze («Peakshaving») wie auch zur Anpassung an die Last zur Optimierung des Eigenverbrauchs («Peakshaping»).

In der Zwischenzeit wurden entsprechende vertikale Gründachsysteme in ähnlicher Form projektiert, insbesondere auch ein sehr ähnliches Forschungssystem mit noch engerer Staffelung in Landquart, mit Unterstützung der Gemeinde und des Kantons Graubünden.

3.3 Untersuchte PV-Systeme: Zusammenfassung weiterer relevanter Aspekte

Die Belegung des Daches mit PV erfolgte in diesem Projekt vor allem auch unter ästhetischen Aspekten, da die Struktur des alten Industriegebäudes durch die vertikalen Module unterstrichen werden sollte. Die Sichtbarkeit war in diesem Fall somit explizit gewünscht, was in vielen Fällen nicht so sein wird oder einen ernsten Hinderungsgrund darstellt. Dies war unter anderem auch eine Motivation, neben den grossen 72-Zellern auch schmalere 48-Zeller aufzunehmen, als Zwischenschritt zu den nochmals schmaleren Modulen wie sie im Vorgängerprojekt eingesetzt wurden. Die Ausrichtung an der Dachfläche bewirkt eine erhebliche unerwünschte Verdrehung der Systemorientierung. Dies betrifft insbesondere die vertikal installierten Module, welche bei dieser Versuchsanlage eher eine Süd/Nord- als eine Ost/West- Orientierung aufweisen. Dementsprechend fallen die typischen Kamelhöcker nur sehr schwach ausgeprägt aus und der insgesamt erreichbare Ertrag ist niedriger als bei Ost/West- Orientierung, wie in einer früheren Arbeit gezeigt wurde.

Neben der Gesamtausrichtung ist auch die Verschattung durch Bäume, Dachaufbauten und die Begrenzungsmauer störend, was bei fast jedem realen Gebäude in ähnlicher Form gegeben sein wird. Die lokal aufgelöste Messung und die Form der Auswertung wurden unter anderem gewählt um entsprechende Effekte erfassen und bewerten zu können. Es zeigte sich, dass derartige Abschattungseffekte insbesondere bei tiefstehender Sonne in den Wintermonaten stark ausgeprägt sind, die sich aber im Gesamtertrag nur begrenzt widerspiegeln.

Ein Einfluss der Substrathelligkeit auf den Ertrag ist bei der Mattenbach-Anlage aufgrund des dichten Bewuchses nicht gegeben. Vor Einsetzen eines nennenswerten Bewuchses war ein Effekt des helleren Substrates und somit ein Effekt der höheren Albedo erkennbar. Mit Bewuchs nivellierten sich die anfänglichen Unterschiede, d.h. die Begrünung sorgte für einheitlichere Bedingungen mit geringerer Albedo, auch wenn auf dem gesamten Dach Schwankungen der Begrünungsdichte vorhanden sind.

Die grossen Module sind einerseits selbst mit einem konventionellen Rahmen versehen und wurden zudem in der Unterkonstruktion mit einem weiteren massiven Rahmen unterstützt. Die entsprechenden Glas/Glas-Module mit dem gleichen Zellentyp und gleicher Stringlänge wie die kleineren 48-zelligen Module (zwei statt drei Strings) erbrachten trotz eines um 10 % höheren Reihenabstands einen



geringeren Ertrag als die kleineren Glas/Glas-Module ohne Rahmen. Rahmenlose Optionen sind bei der vertikalen Installation also vorzuziehen.

Die verschiedenen PV-Konfigurationen in diesem Projekt eignen sich zudem sehr gut die Vorhersagen von verschiedenen Simulationstools zu vergleichen. Zwei Tools werden eingesetzt, das allgemein im wissenschaftlichen Bereich eingesetzte PVsyst und das neuere PVcase. Insbesondere durch die Berücksichtigung der Nahverschattung konnten gut mit den Messwerten übereinstimmende jährliche Ertragsabschätzungen erzielt werden, auch bei den vertikalen Systemen. Die beiden Tools zeigen jeweils charakteristische Trends, die aber im Hinblick auf den Jahresertrag nur geringe Auswirkungen haben. Bei monatlicher Auflösung erkennt man, dass in Monaten mit tiefen Sonnenständen die Simulationen stärker von den Messwerten abweichen.

Neben inhärent nicht durch die Simulationstools erfassbare Eigenschaften (Rahmen, Abschattungsdetails, etc.) bleiben auch noch weitere Eigenschaften der Systeme, bei welchen die Simulationstools an ihre Grenzen stossen. So wurde festgestellt, dass die eingesetzten Optimizer bei bestimmten Abschattungsszenarien in deutlich ungünstigeren Arbeitspunkten betrieben wurden, als durch die Software simuliert. Gerade in Monaten mit starker Abschattung ist es nur schwer einzuschätzen, durch welche Effekte Abweichungen der Simulation entstehen.

Wichtig ist dabei anzumerken, dass die verschattende Umgebung in diesem Projekt in mehreren Simulationsdurchgängen angepasst wurde, bis sie Realität möglichst genau abbildete. Dies ist bei einer ersten Ertragsabschätzung eines neuen Projekts nicht möglich, wobei die Relevanz der Detailierung mit der Komplexität des Szenarios zunimmt.

3.4 Neue Erkenntnisse aus dem Projekt zu Vegetationsentwicklung (inkl. Wechselwirkung PV) und Wasserrückhalt

In diesem Projekt wurden neue Erkenntnisse zu den Themen Vegetationsentwicklung und Wasserrückhalt gewonnen, welche über das Bekannte (Faktenblatt von Swissolar und allgemeines Verständnis von Installateuren dazu) hinausgehen und die aus diesem Projekt gut dokumentiert sind

Bedeutung der Ansaat für die Vegetationsentwicklung

Die Vegetationserhebungen haben gezeigt, dass der Bewuchs auf der Untersuchungsfläche sich bereits kurz nach der Einrichtung verändert mit der Besiedlung durch sich spontan einfindenden Pflanzen. In der dritten Vegetationsperiode betrug der Anteil an spontanen Pflanzenarten 70 % des Gesamtartenvorkommens. Dies relativiert die Bedeutung der Erstansaat mit der Auswahl des Saatguts. In den meisten bestehenden Empfehlungen und Vorgaben (bspw. Faktenblatt Swissolar) wird lediglich darauf hingewiesen, dass eine niedrig wachsende Ansaat verwendet werden sollte. Dies impliziert leider bei ArchitektInnen und PlanerInnen, dass der Bewuchs primär durch die Ansaat gesteuert werden kann. Es wird nicht oder nur ungenügend darauf hingewiesen, dass der Bewuchs und mögliche Beschattungswirkungen primär aufgrund der Anlageausrichtung mit den Details von Lücken zwischen den Modulen zum Problem werden können.

Weiter als problematisch muss der in der von vielen Verbänden publizierten Broschüre genannte Hinweis auf magere Substrate (=mageren Bewuchs) bezeichnet werden. Sicher haben nährstoffärmere Substrate geringere Wuchsleistungen der Pflanzen, jedoch fehlt auch hier der Zusammenhang zur Ausrichtung der PV-Module. Zudem ist es wesentlich darauf hinzuweisen, dass vor allem die Schichtdicke – relativ unabhängig vom Substrattyp – die Wuchsleistung bestimmt. D.h. auch bei der Verwendung von sog. «mageren» (nährstoffarmen) Substraten ist ab einer gewissen Schichthöhe resp. bei entsprechender Anlagekonzeption der PV-Module eine erhöhte Biomassenentwicklung möglich ist.

Im Rahmen der Ansaat wurden auch silbriglaubige Pflanzenarten verwendet. Einige der angesäten Arten konnten sich als Art halten und erscheinen in der Artenliste. Allerdings konnten sich die silbriglaubigen Pflanzen nicht verstärkt ausbreiten und zu einem Wuchsbiß entwickeln, welches einen Einfluss auf



die Energieerzeugung auswirkt. In der Regel sind es eher die sich spontan ansiedelnden Arten, welche das Wuchsbiß und Vegetationsdeckung prägen. Vergleichbar mit den oben angeführten Hinweisen würden wir deshalb empfehlen silbriglaubige Pflanzen nicht speziell zu erwähnen bei Richtlinien oder Empfehlungen, da sie eher irreführend sind und insinuieren, man könne die Vegetationsentwicklung in diese Richtung mit den entsprechenden Pflanzen steuern.

Ansatz Schwammstadt mit Optimierung Wasserrückhaltung

In der vorliegenden Untersuchung mit den vertikalen bifazialen PV-Modulen konnte nachgewiesen werden, dass ein Höhenwachstum der Pflanzen gut mit einer effizienten Pflege verknüpft werden kann, selbst bei einer Optimierung der Wasserrückhaltung, welche die Biomassenentwicklung zusätzlich begünstigt.

Beachtenswert ist seitens Biodiversitätsförderung sicher der Nachweis von feuchteliebenden Arten, welche die gute Wasserspeicherung des Retentionsdaches widerspiegeln und gleichzeitig der Bewuchs nicht zu erhöhten Unterhaltskosten geführt haben. Das Vorkommen auch von seltenen Trockenwiesenarten weist auf die breite Ausrichtung der verschiedenen Standortbedingungen hin.

3.5 Biodiversität auf Solar-Gründächern

Im Rahmen der vorliegenden Studie konnten auf der Versuchsfläche Mattenbachstrasse 35 Käferarten im Verlauf einer Vegetationsperiode nachgewiesen werden. Diese Artenvielfalt ist leicht höher als auf bisher untersuchten Dachbegrünungen in der Schweiz mit Kombinationen von Solarenergienutzung und Dachbegrünung. Ob diese relativ hohe Artenzahl tatsächlich ursächlich mit den besseren Standortbedingungen von Dachbegrünungen mit vertikalen PV-Modulen begründet ist, müssten weiterführende Untersuchungen aufzeigen. Dazu wäre es empfehlenswert weitere vergleichbare Dachflächen zu beproben. Grundsätzlich ist in Winterthur mit einer etwas geringeren Artenvielfalt an Käfern zu rechnen wie in der Region Basel, aus der die meisten vergleichbaren Daten vorliegen. Weil in Basel aufgrund der naturräumlichen Lage im Zwischengebiet des Hochrheins, des Oberrheingebietes und der Sundgauer Pforte einige wärmeliebende Arten vorkommen, ist das mögliche Artenspektrum grösser als in Winterthur.

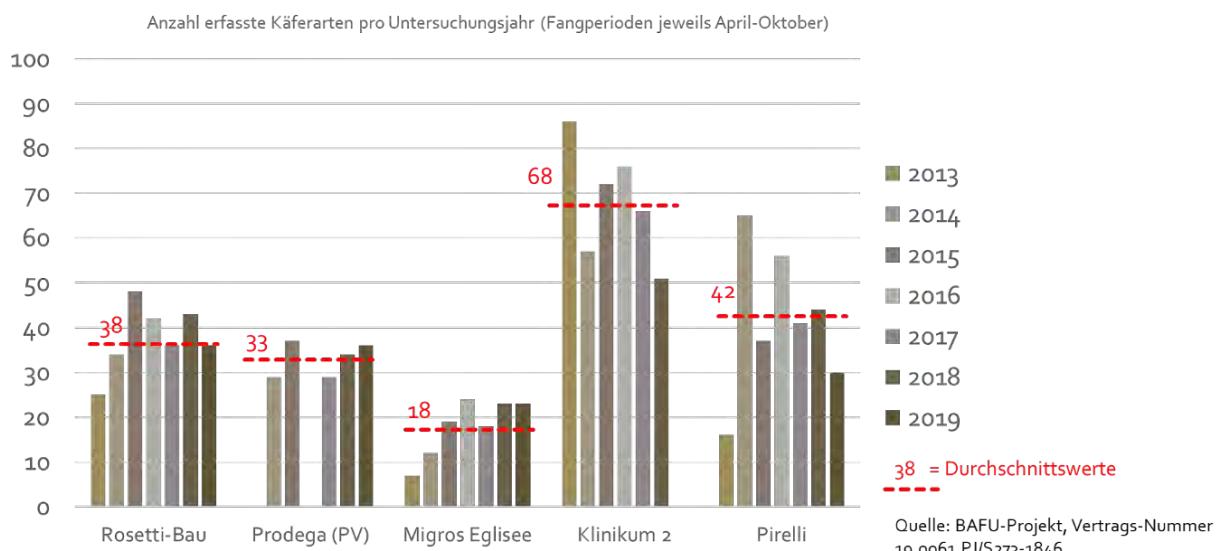


Abbildung 58: Artenzahlen von Käfern auf verschiedenen Dachbegrünungen in Basel im Vergleich zu einer Anlage mit Kombination PV-Modulen.



Abbildung 59: Untersuchungsfläche auf dem Einkaufszentrum Stücki in Basel mit Bereichen mit Kombinationen Dachbegrünungen und PV sowie ohne PV-Belegungen. Fotos: Andreas Hofstetter, Swisstopo

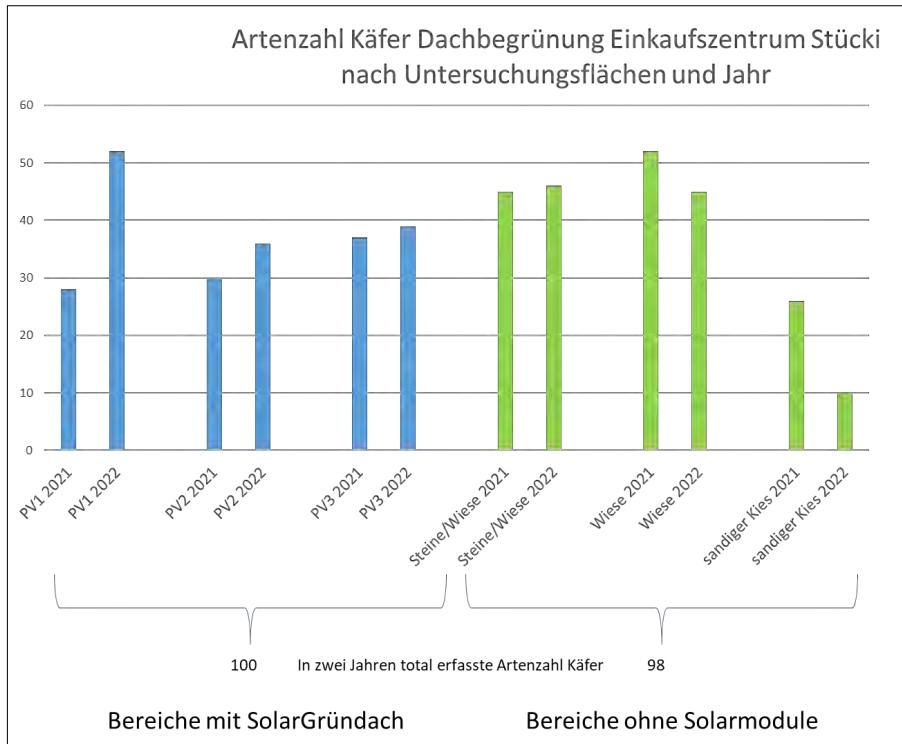


Abbildung 60: Vergleich der Artenzahl von Käfern auf dem Einkaufszentrum Stücki in Basel mit Bereichen mit Kombinationen Dachbegrünungen und PV sowie ohne PV-Belegungen.

Im Rahmen der vorliegenden Untersuchung hat sich gezeigt, dass die spezielle Anordnung von vertikalen PV-Modulen für die Biodiversität einige Vorteile bringen kann. Zum einen erhalten viele Blütenpflanzen, welche auf Sonnenlicht und Wärme angewiesen sind, bessere Standortbedingungen als Kombinationsanlagen, welche sehr viele Schattenbereiche erzeugen.

Begrünte Dächer bieten neuartige Lebensräume für Pflanzen und Tiere. Lange dachte man nur hochmobile, anspruchslose Arten können begrünte Dächer besiedeln. Wissenschaftliche Untersuchungen konnten nachweisen, dass auch anspruchsvollere und seltene Arten, die auf Roten Listen als gefährdet eingestuft werden, die Ersatzlebensräume nutzen können.

Die gezielte Einrichtung von Naturförderelementen wie Totholz, spezielle Substrate aus natürlichen Böden oder bspw. Wildbienensand kann die Biodiversität auf begrünten Dachflächen zusätzlich begünstigen. Zu berücksichtigen gilt es, dass solche Naturförderelemente nicht nur in „Kleinstportionen“ ausgetragen werden, sondern in ausreichender Menge, so, dass sich überlebensfähige Populationen im Lebensraummosaik festlegen können. Für verschiedene Tiergruppen konnten Nachweise von Rote Liste Arten erfolgen wie für Bienen, Spinnen, Käfer, Heuschrecken sowie Tagfalter. Dadurch ergibt sich auch die Forderung an den städtischen Naturschutz das Potenzial begrünter Dachflächen für den Arten- und Naturschutz adäquat zu implementieren und entsprechend in den Baurichtlinien und weitere geeignete Instrumente einzubinden.

Da Dachbegrünungen leider oft in Konkurrenz zur Solarenergienutzung stehen, gilt es nach Möglichkeiten zu suchen Biodiversitätsförderung mit der Stromproduktion zu verbinden und deren Bedeutung aufzuzeigen. Zur Abschätzung der Wirkung der PV-Module auf die Biodiversität können verschiedene Organismengruppen als Bioindikatoren verwendet werden. Neben den Pflanzenarten bieten sich vor



allem die Käfer an, welche die artenreichste Gruppe der Insekten darstellen. Käfer weisen sehr vielfältige Anpassungen auf an Substrate, weitere Standortbedingungen und Nahrungsangebote.

Im Rahmen einer Studie für das Schweizerische Bundesamt für Umwelt BAFU wurde ermittelt, dass die Käfervielfalt auf begrünten Dachflächen mit kombinierten PV-Modulen nicht signifikant geringer ist wie auf Flächen ohne Energienutzung. Die Anzahl der erfassten Käferarten lag im Spektrum der generellen Differenzen, welche sich zwischen artenarmen Dachbegrünungen auf eher dünnsschichtigen (< 10 cm), spärlich bewachsenen Flächen und solchen mit höheren Schichtdicken (> 10 cm) und gezielt eingerichteten Variationen der Schichtdicke sowie Naturförderelementen ergeben.

3.6 Stadtklimatische Effekte von Solar-Gründächern, Aspekte zur Raumkühlung

Projekt Mattenbachstrasse als Wegweiser

Das Projekt Mattenbachstrasse hat eine wegweisende Bedeutung. Die im vorliegenden Projekt Mattenbachstrasse angestrebte und nachgewiesene Optimierung der Wasserrückhaltung führt deshalb zu einer bedeutenden Kühlleistung für das Gebäude selbst sowie die Umgebungsluft. Zusätzliche Bedeutung kommt dem gut und dicht entwickelten Bewuchs zu, der via die Verschattung der Oberfläche durch die Blätter zu einer geringeren Erwärmung der Substrate und der Oberfläche führt. Diese Erkenntnisse sind insbesondere von grosser Bedeutung, weil extensive Dachbegrünungen oft in den längeren heissen und niederschlagsfreien Perioden im Sommer austrocknen und damit die Verdunstungsleistung und -kühlung minimiert wird.

Drei Faktoren dürften wesentlich sein für den Erfolg bezüglich der stadtklimatischen Effekte

- Gedrosselter Dacheinlauf, ermöglicht die gezielte Zurückhaltung von Regenwasser in der Vegetationsperiode von April bis Ende Oktober. Ohne Drosselung und Steuerung wird im Sommerhalbjahr ein grosser Teil des Niederschlagswassers in die Kanalisation abgeführt und der möglichen Verdunstung und Kühlleistung entzogen.
- Beschattungswirkung und dadurch Reduktion der schnellen Verdunstung des Regenwassers im Sommerhalbjahr. Am Morgen und am Abend trifft die Sonne nicht direkt auf die Substratoberfläche und verringert deshalb die Verdunstung im Vergleich zu offenen Dachbegrünungen ohne Verschattung.
- Erhöhte Wasserspeicherung im Systemaufbau. Im vorliegenden Fall wurden Wasserspeicherelemente eingesetzt zu einem Schichtaufbau von total 15 cm. Allenfalls könnte ein solcher Aufbau mit der entsprechenden Wasserspeicherung auch mit einem Substrataufbau von 15 cm realisiert werden, ohne spezifische Wasserspeicherelemente aus Kunststoff.

3.7 Interdisziplinäre Aspekte, Zusammenarbeit der Projektpartner

In diesem Projekt wurden neue Erkenntnisse zu den Themen Vegetationsentwicklung und Wasserrückhalt auf Gründächern gewonnen, welche über das allgemein Bekannte hinausgehen. Der Gründachaufbau mit gedrosseltem Dacheinlauf / Wasserrückhalt erlaubte selbst im Extremsommer 2022 eine Bepflanzung ohne Bewässerung. Das Projekt kann als wegweisend im Hinblick auf Gründächer mit hohem Wasserrückhalt und dennoch besonnte Standortbedingungen (vertikale PV) gewertet werden, was sich auch in den Untersuchungen zur Biodiversität zeigte.

Die hohe Substratdicke und der gewünschte hohe Wasserrückhalt führen zu einem dichten Bewuchs, der durch die vertikalen Module dennoch gut gewartet werden kann. Dies wäre bei konventionellen PV-Gründächern so nicht möglich und stellt somit ein wichtiges Resultat dar, welches sich aus der interdisziplinären Zusammenarbeit im Projekt ergab und kommende Gründachprojekte, wie auch die



Zielsetzungen von Planern, Betreibern und Gesetzgebern beeinflussen kann. Dies betrifft sowohl Entscheider aus den Bereichen PV, wie auch Stadtplaner, Architekten und Ökologen. Der starke Bewuchs und die gute Zugänglichkeit vertikaler PV-Systeme motivieren die Entwicklung automatischer Wartungssysteme («Mähroboter»), die nun auch in Form eines weiteren Forschungsprojektes umgesetzt wird.

Die Ergebnisse liefern für die Hersteller von Unterkonstruktionen, insbesondere auch den Partner ZinCo der die Unterkonstruktionen designte und herstellte, wesentliche Ergebnisse für die Entwicklung, Herstellung und den weiteren Vertrieb entsprechender Produkte. Durch den ökologischen Aspekt werden nun eventuell auch innovativere Ansätze, wie beispielsweise Unterkonstruktionen aus Robinienholz eher in Betracht gezogen. Dies betrifft beispielsweise auch die Wahl des Substratmaterials und den positiven Effekt der Beimischung von Pflanzenkohle.

Die Ergebnisse liefern Ansätze für die weitere Fortführung in verschiedenen Richtungen. Die Wasserrückhaltung ist in städteplanerischer Hinsicht (Schwammstadt) interessant, kann aber auch gebäude-technisch und energetisch von sehr grossem Interesse sein, da es eine Durcherhitzung trockener Isolierungen in langen Hitzephasen unterdrückt und die Haltbarkeit der Dachabdichtung durch das Vermeiden von Temperaturextremen verbessert [22].

3.8 Fazit und Empfehlungen

Zahlreiche Faktoren wie Biodiversität, Stadtklima und Urban Heating sprechen für eine Begrünung von Dachflächen, insbesondere mit optimiertem Wasserrückhalt und hoher Substratdicke [3] [4] [5] [6] [7] [24] [25] [26] [27] [28] [29]. Dazu zählen weiter auch Effekte welche direkt das Gebäude betreffen, wie eine verbesserte Kühlung in langanhaltenden Hitzeperioden [5] [6] [27], bei welchen auch die beste trockene Isolierung durchwärmt wird und als Wärmespeicher fungiert, oder die Schonung des Folienmaterials im Dach durch gleichmässigere Temperaturverhältnisse. Andere Faktoren wie insbesondere RegenwasserRetention sind einfacher zu fassen und zu quantifizieren und können ebenfalls durch begrünte Dachflächen adressiert werden. All diese Aspekte bewegen die Entscheider auf verschiedenen Ebenen dazu die Begrünung grosser Dächer zur Pflicht zu machen.

Gleichzeitig ist Installation von PV auf grossen Dachflächen für die Schweiz essenziell, um den Zubau in der angestrebten Höhe zu ermöglichen, da das Potenzial von Freiflächenanlagen sehr begrenzt ist. Die Schweiz ist global der erste GW PV-Markt, der praktisch ausschliesslich auf Dachanlagen beruht, wobei die grossen Dachflächen grob die Hälfte der installierten PV-Kapazität aufnehmen. Dies führt dazu, dass sowohl die Begrünung wie auch die PV-Installation zunehmend vorgeschrieben und sicherlich politisch gewollt sind. Beispielsweise verlangt das Planungs- und Baugesetz des Kantons Zürich (BZO) seit 2015 ökologisch wertvolle Begrünungen, auch in Kombination mit Solaranlagen. Laut Art. 11 Abs.1 BZO Dachbegrünung ist in allen Zonen ist der nicht als begehbarer Terrasse genutzte Bereich eines Flachdachs ökologisch wertvoll zu begrünen, auch dort, wo Solaranlagen installiert sind [25]. Gemäss dieser Verordnung müssen seit 2015 Solaranlagen und Dachbegrünung kombiniert werden, was bedeutet, dass sie nicht räumlich getrennt, sondern übereinander angeordnet werden [24].

Die klassische Form der PV-Installation mit flachen Kippwinkeln führt zu einer Bedeckung der darunter liegenden Dachfläche. Bei dichter Belegung mit PV kann die Dachfläche weitgehend bedeckt sein, so dass man kaum oder nicht mehr von einem Gründach sprechen kann. Enge Belegungen führen zudem zu Schwierigkeiten bei der Wartung, die insbesondere aufgrund des Bewuchses auf jeden Fall notwendig ist. Als Beispiel für Vorgaben, welche aus diesem Zielkonflikt resultieren, kann die Checkliste Dachbegrünungen und Solaranlagen der Stadt Zürich [26] genannt werden. Dort wird neben einer reduzierten Substratdicke im Bereich zwischen den Modulen (Unterdrückung Bewuchs) bei Abständen ab 50 cm gleich zu einer durchgehend niedrigen Substratdicke geraten, wobei explizit darauf hingewiesen wird, dass es sich dann nicht mehr um eine ökologisch wertvolle Begrünung handelt.

Die Formulierungen der Vorgaben lassen einen Interpretationsspielraum («Die Pflicht, ökologisch wertvoll zu begrünen besteht, soweit dies technisch und betrieblich möglich, sowie wirtschaftlich tragbar



ist») [26]. Nimmt man aber die Intention der Vorgaben ernst und versucht diese maximal umzusetzen, dann bedeutet das, dass bei gegebenen Dachflächen sowohl die Begrünung wie auch der PV-Ertrag zu maximieren sind. In diesem Projekt wurde gezeigt, dass dies durch die vertikale Installation bifazialer Module möglich ist und mit welchen zusätzlichen Kosten dieser Ansatz verknüpft ist.

Es ist von vorneherein klar, dass die Entscheidung für ein Solagründach keine rein ökonomische Entscheidung sein wird, da schon allein das Gründach an sich mit Kosten verbunden ist und dem Besitzer nur sehr beschränkt direkten finanziellen Gegenwert bieten kann (Einsparungen: Wasserretention statt Abgabe für Kanalisationskapazität bei Starkregen, je nach Isolierung Kühlung und verminderte Klimatisierungskosten, verbesserte Haltbarkeit Dachfolien durch Vermeidung von Temperaturspitzen, ...).

Im vorhergehenden Projekt («Seniorenheim») mit vertikal installierten Modulen wurde eine PV-Flächenbedeckung (GCR) von ca. 33 % gewählt, wobei die Minimierung von «Verlusten» beim spezifischen Ertrag (kWh/kWp) ein wichtiger Aspekt war. Tatsächlich können mit dieser Flächenbedeckung Verluste beim spez. Ertrag im Vergleich zu konventionellen PV-Anlagen weitgehend vermieden werden, d.h. jedes der installierten Module erzielt einen ähnlichen Ertrag bei beiden Installationsformen.

Um das Ertragspotenzial pro Dachfläche besser zu nutzen, muss die PV-GCR erhöht werden. Bei den konventionellen Systemen führt dies zu einer verstärkten Flächenabdeckung, bei den vertikalen Systemen vor allem zu verstärkter gegenseitiger Verschattung der Module.

In diesem Projekt wurde etwa 50 % Flächenbelegung gewählt, um den absoluten Ertrag im Vergleich zum Vorgängerprojekt zu erhöhen. Dabei wurden die Erträge mit denen konventioneller Systeme verglichen, um die Höhe der «Verluste» beim spezifischen Ertrag zu bestimmen. Dies ist bewusst in Anführungszeichen gesetzt, da es sich dabei nicht um Verluste handelt, sondern die Verwirklichung eines zusätzlichen Nutzens, in diesem Fall eines unbedeckten Gründachs, ermöglicht. In vielen Bereichen der PV ist das üblich, seit die Kosten für die Module gesunken sind. So sind die hier als Referenz häufig zitierten flachen, konventionellen Systeme mit Kippwinkeln vom 10°-15° heute der Standard, obwohl der spezifische Ertrag niedriger liegt als bei nach Süd ausgerichteten Systemen mit ca. 35° Kippwinkel. Hier wird bewusst ein geringerer spezifischer Ertrag zur Optimierung des absoluten Ertrages in Kauf genommen. Ähnliches gilt beispielsweise bei Fassadensystemen, insbesondere bei solchen mit farbigen frontseitigen Verblendungen und bei allen anderen Systemen deren Ausrichtung vom Optimum abweicht.

Die spezifischen Erträge der vertikalen Systeme mit etwa 50 % GCR liegen niedriger als jene der flach installierten konventionellen Anlagen. Je nach Wahl der einzelnen Systemtypen zum Vergleich werden 2023 mit den vertikalen Systemen 83- 95 % des Ertrags der klassischen Systeme erreicht während dies 2022 nur 71- 86 % waren (im Mittel als grobe Faustformel ca. knapp 20 % weniger Ertrag bei GCR von etwa 50 %). Die Variationen röhren von den Einstrahlungsbedingungen in den Jahren her, die sich bei den Systemen unterschiedlich stark auswirken.

Die jahreszeitliche Variation der Ausbeute zeigt sich bei den Ertragsverläufen in monatlicher Auflösung. Der prinzipielle Vorteil der vertikalen Systeme im Winter für die vertikalen Systeme kann bestätigt werden, wobei der absolute Ertrag durch den Standort im Mittelland durch die geringe Sonneneinstrahlung beschränkt wird. Im alpinen Bereich mit höherer Einstrahlung im Winter liegt der Anteil der Erträge im Winter höher und der Vorteil des Mehrertrages kommt hier mehr zum Tragen.

Im Projekt wurde der Einfluss von hellem Substratmaterial auf den Ertrag untersucht, wobei sich hier nur ganz zu Beginn Unterschiede zeigten, welche sich aber mit zunehmender Begrünung nivellierten. Ein Effekt heller, silberlaubiger Pflanzen wurde nicht untersucht, da einerseits die Farbe der Pflanzen nicht unbedingt das Reflexionsverhalten vorherbestimmt und auch der Bewuchs nach einiger Zeit nur sehr begrenzt das Saatgut zu Beginn widerspiegelt.

In Mattenbach wurden vertikale Systeme mit einem Flächennutzungsgrad von etwa 50 % untersucht. Im Vergleich zu einer klassischen, flachen PV-Anlage mit gleichem Flächennutzungsgrad auf einem Kiesdach liegen die Kosten des Solagründachs wie im Projekt realisiert bei:



- + 15-25 % Invest für Butterfly auf Gründach, vs. PV konventionell, flach auf Kiesdach
- + 25-35 % Invest für Vertikal auf Gründach, vs. PV konventionell, flach auf Kiesdach, dabei 70-95 % der Erträge von konventionellen Systemen, je nach Jahr und ausgewähltem Vergleichssystem.

Ausser den Investitionskosten für die PV-Komponenten selbst und den erzielten Erträgen spielt die Wartung eine wesentliche Rolle für die Wirtschaftlichkeit der Anlage. Von den Kosten her konnte im Rahmen der Projektlaufzeit gezeigt werden, dass der Aufwand für die Pflege der Vegetation im Bereich von 15-20 CHF / kWp oder grob überschlagen bei 1.6-2.1 Rp / kWh liegt. Hinsichtlich der Wartung ergeben sich keine wesentlichen Unterschiede zwischen vertikalen Systemen und gut ausgelegten Alternativen, wie hoch aufgeständerten Butterfly-Systemen mit weitem Reihenabstand, wobei das vertikale System bei sehr starkem Bewuchs besser zugänglich bleibt. Bei schlecht ausgelegten Standardsystemen liegen die Wartungskosten jedoch sehr viel höher. Die zusätzlichen Wartungskosten der Begrünung entsprechen somit in etwa den üblichen Wartungskosten einer PV-Anlage auf einem Kiesdach, die hier natürlich ebenfalls anfallen. Insgesamt ergeben sich so Betriebskosten von ca. 3-4 Rp / kWh. Derzeit läuft ein Forschungsprojekt mit dem Ziel eines geeigneten Mäheroboters zur automatischen Durchführung von Mäharbeiten, was die Wartungskosten erheblich senken dürfte. Durch integrierte Kameras sollten dann auch Inspektionsgänge teilweise entfallen.

Insgesamt kann gesagt werden, dass durch die vertikale Installation eine Option zur Verfügung steht, welche prinzipiell die optimale Umsetzung der Vorgaben sowohl für PV wie auch Begrünung ermöglicht, allerdings zu höheren Energiekosten (siehe Tabelle 9, Abschnitt 3.1). Unterkonstruktionen wie sie in diesem Projekt eingesetzt wurden, sind beim Hersteller ZinCo nun serienmäßig zu erhalten, wobei auch die Höhe über Grund den Bedürfnissen angepasst werden kann. Dies erlaubt auch den Einsatz von Standardmodulen, was zu niedrigeren Kosten führt und diese Variante wirtschaftlich attraktiver macht. Auch andere Hersteller bieten inzwischen Unterkonstruktionen für die vertikale Installation an, wobei sich beispielsweise die Verankerung im Grund unterscheidet.

Durch tageszeitabhängige Strompreise können sich vor allem zukünftig ökonomische Vorteile aus der vertikalen Anordnung der Module ergeben. Vor allem seit Frühling 2024 treten am frühen Nachmittag wegen der klassisch installierten PV-Anlagen mit Südausrichtung immer häufiger negative Strompreise am Markt auf. Das kamelhöckerartige Erzeugungsprofil der vertikal installierten Module vermeidet Peakspitzen zur Mittagszeit, wohingegen vormittags und nachmittags zwei Erzeugungsmaxima auftreten. Es trägt somit dazu bei das Erzeugungsprofil an den Bedarf anzupassen. Auch wenn im Moment noch nicht klar ist, wie dynamische Einspeisetarife umgesetzt werden, ist doch klar, dass diese Art der Installation geeignet ist die Vorgaben zu erfüllen.

Im Hinblick auf die Planung ist auch die Simulation projektierter Erträge wichtig. Im Rahmen des Projekts konnte gezeigt werden, dass beide eingesetzte Simulationstools, PVSyst und PVcase gut geeignet sind um sowohl die konventionellen wie auch die klassischen Systeme abzubilden. Durch die Berücksichtigung der Nahverschattung konnten gut mit den Messwerten übereinstimmende jährliche Ertragsabschätzungen erzielt werden, auch bei den vertikalen Systemen. Die beiden Tools zeigen jeweils charakteristische Trends, die aber im Hinblick auf den Jahresertrag nur geringe Auswirkungen haben. Bei monatlicher Auflösung erkennt man, dass in Monaten mit tiefen Sonnenständen die Simulationen stärker von den Messwerten abweichen.

Neben inhärent nicht durch die Simulationstools erfassbare Eigenschaften (Rahmen, Abschattungsdetails, etc.) bleiben auch noch weitere Eigenschaften der Systeme, bei welchen die Simulationstools an ihre Grenzen stossen. So wurde festgestellt, dass die eingesetzten Optimizer bei bestimmten Abschattungsszenarien in deutlich ungünstigeren Arbeitspunkten betrieben wurden, als durch die Software simuliert. Gerade in Monaten mit starker Abschattung ist es nur schwer einzuschätzen, durch welche Effekte Abweichungen der Simulation entstehen. Wichtig ist dabei anzumerken, dass die verschattende Umgebung in diesem Projekt in mehreren Simulationsdurchgängen angepasst wurde, bis sie Realität möglichst genau abbildete. Dies ist bei einer ersten Ertragsabschätzung eines neuen Projekts nicht möglich, wobei die Relevanz der Detailierung mit der Komplexität des Szenarios zunimmt.



Im Projekt zeigte sich, dass die Art der PV-Installation den Bewuchs mitbestimmt, wobei die vertikalen Module in Kombination mit der hohen Substratdicke und dem Wasserrückhalt zu einer erhöhten Biomasse und einer anderen Zusammensetzung der Begrünung führt. Gleichzeitig konnte gezeigt werden, dass das Höhenwachstum der Pflanzen bei den vertikalen PV-Installationen gut mit einer effizienten Pflege verknüpft werden kann. Nur in wenigen Bereichen war ein Rückschnitt der Vegetation erforderlich und wenn notwendig konnte mit einfachen Geräten gearbeitet werden.

Der Test einer effizient möglichen Wartung mit vertikalen Modulen auch bei stärkerem Bewuchs ist ein wichtiges Ergebnis des Projekts, da sich auf dem Dach ein dichterer Bewuchs entwickelte, als er auf heute typischen Gründächern beobachtet wird. Insbesondere in Verbindung mit PV werden oft bewusst niedrige Substratdicken (6-10 cm) und die Ansiedlung von niedrig wachsenden Pflanzen (Sedum) empfohlen, welche auch extreme Trockenphasen im Sommer überstehen können. In städteplanerischer Hinsicht sind jedoch grösserer Substratstärken sinnvoll (RegenwasserRetention, Urban Heating, ...) und teilweise vorgeschrieben. Vorgabe für Zürich ist beispielsweise ein Qualitätsubstrat mit genügender Wasserspeicherfähigkeit (mind. 45 Liter pro Quadratmeter) und einer Schichtdicke von 10 Zentimeter im gesetzten Zustand [24]. Die Vorgaben der Städte und Gemeinden unterscheiden sich im Einzelnen, aber dennoch wird es zukünftig mehr Dächer mit ähnlichen Verhältnissen wie beim Mattenbach-Projekt geben, wobei höhere Schichtdicken als 10 cm teilweise auf Gemeindeebene bereits vorgeschrieben sind oder empfohlen werden [24]

Aus den Erfahrungen im Projekt heraus würden wir insbesondere für diese Art des Gründachs die üblichen Empfehlungen kritisch sehen. So wird der Einfluss der Einsaat von Planern und auch in Empfehlungen überschätzt. Bereits in der dritten Vegetationsperiode betrug der Anteil an sich spontanen einfindenden Pflanzenarten 70 % des Gesamtartenvorkommens. Auch silbriglaubige Pflanzen die bewusst ausgesät wurden, sollten in dieser Hinsicht nicht mehr explizit empfohlen werden, da ein gezielter Bewuchs nicht langfristig steuerbar ist. Ähnliches kann zur Empfehlung magerer Substrate gesagt werden, deren Verwendung durch geringere Wuchsleistung Probleme mit der PV-Abschattung unterdrücken soll. Hier muss darauf hingewiesen werden, dass recht unabhängig vom Substrattyp vor allem die Substratdicke die Wuchsleistung bestimmt. Bei Substraten geringerer Dicke und ohne optimierten Wasserrückhalt kommt es in den Sommermonaten zu einem Durchtrocknen, was die Vegetation stark beeinflusst.

Die im vorliegenden Projekt Mattenbachstrasse angestrebte und nachgewiesene Optimierung der Wasserrückhaltung hat auch in städteplanerischer Hinsicht starke Effekte. Kiesbedeckungen unter PV-Modulen führen zu einer höheren Oberflächentemperatur sowie stark reduzierter Kühlwirkung aufgrund des geringeren Verdunstungspotenzials und tragen zur Bildung von stadttypischen „Wärmeinseln“ bei. Eine begrünte Dachoberfläche verhindert zum einen strukturbedingt weitgehend die Umwandlung der Einstrahlungsenergie in Wärmeenergie. In zweiter Linie wird durch die Verdunstung sowie die pflanzliche Transpiration des im Begrünungsubstrat gespeicherten Regenwassers der Umgebungsluft von Dachbegrünungen Feuchtigkeit zugeführt. Da die Verdunstung ein physikalischer Prozess ist, der Wärmeenergie benötigt und diese der Umgebung entzieht, kühlen Dachbegrünungen das Substrat selbst, die darüber liegende Luftsicht sowie das darunter liegende Gebäude mit den darin befindlichen Räumen ab [3].

Drei Faktoren dürften wesentlich sein für den Erfolg bezüglich der stadtclimatischen Effekte

- Gedrosselter Dacheinlauf, ermöglicht die gezielte Zurückhaltung von Regenwasser in der Vegetationsperiode von April bis Ende Oktober. Ohne Drosselung und Steuerung wird im Sommerhalbjahr ein grosser Teil des Niederschlagswassers in die Kanalisation abgeführt und der möglichen Verdunstung und Kühlleistung entzogen.
- Beschattungswirkung und dadurch Reduktion der schnellen Verdunstung des Regenwassers im Sommerhalbjahr. Am Morgen und am Abend trifft die Sonne nicht direkt auf die Substratoberfläche und verringert deshalb die Verdunstung im Vergleich zu offenen Dach-begrünungen ohne Verschattung.



- Erhöhte Wasserspeicherung im Systemaufbau. Im vorliegenden Fall wurden Wasserspeicherelemente eingesetzt zu einem Schichtaufbau von total 15 cm. Allenfalls könnte ein solcher Aufbau mit der entsprechenden Wasserspeicherung auch mit einem Substrataufbau von 15 cm realisiert werden, ohne spezifische Wasserspeicherelemente aus Kunststoff.

Beachtenswert ist seitens Biodiversitätsförderung der Nachweis von feuchteliebenden Arten, welche die gute Wasserspeicherung des Retentionsdaches widerspiegeln und gleichzeitig der Bewuchs nicht zu erhöhten Unterhaltskosten geführt haben. Das Vorkommen auch von seltenen Trockenwiesenarten weist auf die breite Ausrichtung der verschiedenen Standortbedingungen hin.

Mit der Erfassung der Biodiversität durch eine Vegetationsanalyse sowie einem Käfer-Biomonitoring konnte gezeigt werden, dass die vertikalen Module ausreichende Sonneneinstrahlung zulassen, um lichtbedürftige Arten zu fördern. Dies kann sowohl Trockenwiesenarten zugutekommen wie auch Insekten, welche auf blühende Pflanzen angewiesen sind.

Abschliessend soll nochmals auf die wegweisende Bedeutung des Projekts hingewiesen werden, in dem ein Gründachtyp getestet wurde, welchem aufgrund der in vielerlei Hinsicht günstigen gewünschten Effekte und dementsprechend eingeführter Vorgaben in Zukunft grössere Bedeutung zukommen wird. Dabei kann das Gründach, trotz des vergleichsweise dichten und hohen Bewuchses, mit einer PV-Anlage kombiniert werden. Insbesondere die vertikale Installation erlaubt einen guten Zugang zur Wartung und ermöglicht eine optimale gleichzeitige Realisierung von Begrünung und der PV-Nutzung auf der gesamten Dachfläche.

In der nachfolgenden Tabelle wurden die unterschiedlichen PV-Systeme in Kombination mit Gründächern verglichen.

Tabelle 10: Vergleich der unterschiedlichen Photovoltaiksysteme in Kombination mit Gründächern

Kriterium	Aufgeständerte, südorientierte Anlage	Aufgeständerte, ost-west orientierte Anlage	Aufgeständerte, bifaziale ost-wet orientierte Anlage
Flächennutzungsgrad	~50%	50%-70%	50-100%
Spezifischer Energieertrag	950 -1150 kWh/kWp	950 -1100 kWh/kWp	560 - 900 kWh/kWp
Energieertrag pro Fläche	95-110kWh/m2	95-125 kWh/m2	80-125 kWh/m2
Zeitabhängige Energieertragskurve	-	0	+
Investitionskosten		+ 20-25 % Invest für Butterfly auf Gründach, vs. konventionell, flach auf Kiesdach	+ 30-35 % Invest für Vertikal auf Gründach, vs. konventionell, flach auf Kiesdach
Stromgestehungskosten	+	+	-
Wartungskosten, Wartungszugänglichkeit	-	-	+
Gebäudekühlungseffekt über Verdunstungskälte	-	+	++
Verbesserung Stadtklima	-	+	++
Kompatibilität Gebäudeanforderungen	+	+	0
Dachflächenbedeckungsgrad Bewuchs	0	0	++
Biodiversität	0	0	+
WasserRetention	0	+	++
Gebrauchsduer Abdichtung	0	+	+

Wie aus der Tabelle ersichtlich, ist eine eindeutige Empfehlung für ein System nur durch eine wirtschaftliche Betrachtung unter Berücksichtigung eher «weicher» Faktoren zu ermitteln. Die wirtschaftliche Analyse sollte insbesondere auch den Einfluss des tageszeitabhängigen Wertes des Stromes berücksichtigen, der je nach Eigenbedarf oder Einspeisetarifen zukünftig unterschiedlich bewertet werden sollte. Gebäudekühlungseffekte, WasserRetention und Brauchwasserreduktion haben sicherlich auch einen wirtschaftlichen Einfluss auf den Betrieb der Anlage und Einfluss auf das Design. Diese Faktoren sind aber jeweils projektspezifisch zu bewerten.



3.9 Ausblick

Inzwischen wurden entsprechende vertikale Gründachsysteme in ähnlicher Form und basierend auf den Erkenntnissen und Erfahrungen realisiert. Beispiele sind Anlagen in Zürich (Josefstrasse und Zwischenbächen) in Flims Berg und Talstation Flemexpress, Privathaus in Wolfwil und weitere Energiegründächer im Raum Bern/Genfersee, bisher total ca. 15 Anlagen mit einer Gesamtleistung von gut 500 kWp, weitere Anlagen in den Bergen wurden mit Kies kombiniert.

Insbesondere wurde auch ein sehr ähnliches Forschungssystem in Landquart, auf dem Dach des Werkhofs, mit Unterstützung der Gemeinde und des Kantons Graubünden, projektiert. Bei diesem Projekt werden vertikale Modulreihen mit einem Flächennutzungsgrad von bis zu 100% aufgeständert werden. Im parallel laufenden BFE-Projekt PV-Eye werden unter anderem vergleichbare Systeme in miniaturisierter Form nachgestellt und simultan betrieben. Hieraus werden weitere Erkenntnisse zum Themenbereich dichter Flächenbelegung auf grossen Flachdächern gewonnen, die auch weitere Komponenten enthalten wie beispielsweise eng gestaffeltes Tracking auf Dächern.

In Zukunft werden vermehrt speziell entwickelte Mähroboter für Energiegründächer die Arbeit übernehmen, diese sollten ab Sommer 2025 erprobt und erhältlich sein. Hierzu läuft ein Innosuisse-Projekt mit der Firma WepfAir aus Andelfingen und 2 Abteilungen der ZHAW in Winterthur. Der Mähroboter hat neben dem Mähwerk noch zusätzlich Kamera, Infrarot- und Wärmebildkamera, damit technische Probleme auch ohne Einsatz vor Ort bewertet und gegebenenfalls gelöst werden können. Mit diesem Mähroboter werden die Kosten für den Unterhalt massiv eingeschränkt und liegen dann schätzungsweise noch max. 20 % höher. Durch die Kameras können die Kosten noch weiter reduziert werden, Ziel ist es durch den Einsatz des Mähroboter+ höhere Kosten über die Lebensdauer der Anlage beim Unterhalt des Solargründaches im Vergleich zum Solardach ohne Begrünung zu erhalten.

Weitere Optimierungen wurden ausprobiert und sind im Test, z.B. Ersatz vertikaler Unterkonstruktionen aus Stahl durch UK's aus Robinienholz, um nachhaltigere Ressourcen zu nutzen. Ein anderes Beispiel hierfür wäre beim Gründachsystemaufbau die Verwendung geschrotteter Pflanzenkohle, um ebenfalls den CO₂-Fussabdruck zu senken.

Auf dem Dach werden weiterhin praktische Test durchgeführt, z.B. mit dem neuen Mähroboter+ und mit Kleinwindturbinen. Auch in Bezug auf Urban Gardening/Permakultur werden wir weitere Testflächen anpflanzen, um auch da den Multiuse solcher Dachlandschaften aufzuzeigen. Das sehr grosse Interesse aus dem in- und Ausland an dieser Art Solargründach zeigt auf, dass das praktische und wissenschaftlich begleitete Vorgehen sehr geschätzt wird und eine Weiterentwicklung somit sehr gefragt ist.

Durch das Projekt wurden in den Bereichen Vegetationsentwicklung und Wasserrückhalt wichtige neue Erkenntnisse gewonnen. Die Ergebnisse liefern Ansätze für die weitere Fortführung in verschiedenen Richtungen. Wasserrückhaltung ist in städteplanerischer Hinsicht (Schwammstadt) interessant, kann aber auch gebäudetechnisch und energetisch von sehr grossem Interesse sein, da es beispielsweise eine Durcherhitzung trockener Isolierungen in langen Hitzephasen unterdrückt. In diesem Segment ist noch einiges an Forschungsarbeit zu leisten, um das entsprechende Potenzial ausschöpfen zu können.

Wie dieses Projekt gezeigt hat, gibt es nicht die optimale PV und Gründachlösung. Die optimale Lösung hängt von verschiedenen Faktoren ab:

- Nutzungsgrad als Gründach
- Erlaubte Höhe des PV-Systems über dem Dachrand
- Kosten für die Unterkonstruktionen
- Zeitabhängiger Strompreis
- Bedarfsprofil
- Wartungskosten (Nutzbarkeit von Robotern, Zugänglichkeit, Verfügbarkeit von Servicepersonal,...)



- Dachgrösse
- Gebäudeisolierung und Energieeinsparungseffekte durch verringerte Kühlleistung
- Einsparung für Brauchwasser
- Quantifizierung RegenwasserRetention (Auflagen, Incentives, ...)
- Vorgaben zur Begrünung Dachflächen. Vorgaben zu PV auf Dachflächen....

Um für Architekten, Solarinstallateure, Dachplaner und Gartenplaner eine Entscheidungshilfe für die Planung einer optimalen PV-Gründachs zu geben sollte ein Kosten- und Ökomodell entwickelt werden, welches die oben genannten Faktoren einbringt und wirtschaftliche Kennzahlen, wie Stromgestehungskosten, Amortisationszeit, Net Present Value aber auch ökologische Kennzahlen ermittelt, die dann abhängig von den verschiedenen Dachdesigns verglichen werden können.

Dieses Modell könnte in einem Folgeprojekt entwickelt werden und hätte zum Ziel ein solches Programm für Nutzer zur Verfügung zu stellen.

4 Nationale und internationale Zusammenarbeit

Das Projekt wird in Zusammenarbeit mit zahlreichen nationalen Firmen und Institutionen durchgeführt, welche Material und Knowhow beisteuern und teilweise Komponenten entwickeln (ZinCo AG, Fenaco, Weiss & Appetito).

Schubiger Immobilien

Bauherr

Finanzierung

Projektleiter (A777)

Leitung

Praktische Umsetzung

Förderer

Klimafonds Stadtwerk Winterthur
SFG Schweizerische Fachvereinigung Gebäudebegrünung
Jardin Suisse

ZHAW (IUNR) und (IEFE)

Messung

Auswertung

Reporting

Dissemination

Begleitmassnahmen

ZinCo AG Entwicklung Unterkonstruktion

Fenaco & SFG Saatgut und Substrat

Weiss&Appetito AG Belegung mit Substrat

Die erhobenen Daten zur Biodiversität können mit Untersuchungen verglichen werden, welche wir (ZHAW / IUNR) in verschiedenen Städten in der Schweiz sowie auch in Berlin, Hamburg und dem Land Vorarlberg durchführen.



5 Publikationen

BIFI PV 2022; Ankara / Türkei: Posterbeitrag
Nationale PV-Tagung 2023: Vortrag
SolarEdge-Anwendertreffen (Schweiz): Vortrag
EUPVSEC 2023; Lissabon / Portugal: Vortrag
BIFI PV 2023: Doha / Katar: Vortrag
EUPVSEC 2024: Wien / Österreich: Posterbeitrag
Solar & Storage 2024; Zürich: Vortrag

6 Literaturverzeichnis

- [1] D. Anderegg et al. Photovoltaik Potenzial auf Dachflächen in der Schweiz - Synthese aus Sonnen-dach.ch und einer repräsentativen Stichprobe an Dachbelegungen. ZHAW IUNR, 2022, <https://doi.org/10.21256/zhaw-2425>
- [2] Swissolar, Detailanalyse des Solarpotenzials auf Dächern und Fassaden, Zürich, 2020, https://www.swissolar.ch/02_markt-politik/detailanalyse-solarpotenzial-schweiz.pdf
- [3] I. Adilkhanova, M. Santamouris, und G. Y. Yun, „Green roofs save energy in cities and fight regional climate change“, Nat Cities, Bd. 1, Nr. 3, S. 238–249, Feb. 2024, doi: 10.1038/s44284-024-00035-7.
- [4] Stadt Zürich, “Dachbegrünung - Stadt Zürich.” <https://www.stadt-zuerich.ch/ted/de/index/gsz/beratung-und-wissen/wohn-und-arbeitsumfeld/dachbegruenungen.html> (accessed Jan. 14, 2020).
- [5] M. S. und S. Häne, “Mit grünen Dächern gegen die Hitze,” *Tages-Anzeiger*, Jul. 09, 2015.
- [6] V. Azeñas et al., “Thermal regulation capacity of a green roof system in the mediterranean region: The effects of vegetation and irrigation level,” *Energy Build.*, vol. 164, pp. 226–238, Apr. 2018, doi: 10.1016/j.enbuild.2018.01.010.
- [7] Jackie Snow, “Green Roofs Take Root Around the World,” *National Geographic News*, Oct. 27, 2016. <https://www.nationalgeographic.com/news/2016/10/san-francisco-green-roof-law/> (accessed Jan. 13, 2020).
- [8] Stephan Brenneisen, “Herausforderung Gründach – Chancen und Risiken für den Betrieb der PV-Anlage,” presented at the ERFA Photovoltaik Dachdichtigkeit und Gründach, Swissolar, Uzwil, Sep. 26, 2018, Accessed: Jan. 13, 2020. [Online]. Available: https://www.swissolar.ch/fileadmin/user_upload/Tagungen/ERFA_2018/180926_ERFA-Uzwil_3_Brenneisen.pdf.
- [9] Stephan Brenneisen, “Naturschutz auf Dachbegrünungen in Verbindung mit Solaranlagen,” Sep. 20, 2016. https://web.archive.org/web/20160920102605/http://www.stadtgaertnerei.bs.ch/dms/stadtgaertnerei/download/der-eigene-garten/dach_solar.pdf (accessed Jan. 13, 2020).
- [10] H. Nussbaumer et al., “Accuracy of simulated data for bifacial systems with varying tilt angles and share of diffuse radiation,” *Sol. Energy*, vol. 197, pp. 6–21, Feb. 2020, doi: 10.1016/j.solener.2019.12.071.
- [11] T. Baumann, H. Nussbaumer, M. Klenk, A. Dreisiebner, F. Carigiet, and F. Baumgartner, “Photovoltaic systems with vertically mounted bifacial PV modules in combination with green roofs,” *Sol. Energy*, vol. 190, pp. 139–146, Sep. 2019, doi: 10.1016/j.solener.2019.08.014.



- [12] D. Berrian, J. Libal, M. Klenk, H. Nussbaumer, and R. Kopecek, "Performance of Bifacial PV Arrays With Fixed Tilt and Horizontal Single-Axis Tracking: Comparison of Simulated and Measured Data," *IEEE J. Photovolt.*, vol. 9, no. 6, pp. 1583–1589, Nov. 2019, doi: 10.1109/JPHOTOV.2019.2924394.
- [13] T. Baumann, "Vertikale Solarpaneele – Gründach und Solaranlage müssen intelligent kombiniert sein," *Emw Energ. Markt Wettbew.*, no. 6, Dec. 2018, [Online].https://www.zhaw.ch/storage/engineering/institute-zetren/ife/PDFs/emw_Vertikale_Solarpaneele_Gr%C3%BCndach_und_Solaranlage_m%C3%BCssen_intelligent_kombiniert_sein.pdf.
- [14] T. Baumann, "Senkrechte Solarpanels sollen Leistung glätten," *Spektrum Gebäude Technik*, pp. 50–51, Feb. 2018.
- [15] M. R. Khan, A. Hanna, X. Sun, und M. A. Alam, „Vertical bifacial solar farms: Physics, design, and global optimization“, *Applied Energy*, Bd. 206, S. 240–248, Nov. 2017, doi: 10.1016/j.apenergy.2017.08.042.
- [16] S. Guo, T. M. Walsh, und M. Peters, „Vertically mounted bifacial photovoltaic modules: A global analysis“, *Energy*, Bd. 61, S. 447–454, Nov. 2013, doi: 10.1016/j.energy.2013.08.040.
- [17] H. Nussbaumer *u. a.*, „PV Installations Based on Vertically Mounted Bifacial Modules Evaluation of Energy Yield and Shading Effects“, *31st European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition; 2037-2041*, 2015, doi: 10.4229/eupvsec20152015-5av.6.34.
- [18] T. Baumann, H. Nussbaumer, M. Klenk, A. Dreisiebner, F. Carigiet, und F. Baumgartner, „Photovoltaic systems with vertically mounted bifacial PV modules in combination with green roofs“, *Solar Energy*, Bd. 190, S. 139–146, Sep. 2019, doi: 10.1016/j.solener.2019.08.014.
- [19] H. Nussbaumer *u. a.*, „Accuracy of simulated data for bifacial systems with varying tilt angles and share of diffuse radiation“, *Solar Energy*, Bd. 197, S. 6–21, Feb. 2020, doi: 10.1016/j.solener.2019.12.071.
- [20] E. Landolt, *Flora indicativa: ökologische Zeigerwerte und biologische Kennzeichen zur Flora der Schweiz und der Alpen*, 2., Völlig neu bearbeitete und Erweiterte Aufl. Bern: Haupt, 2010.
- [21] G. Klaus, F. Cordillot, und I. Künzle, „Gefährdete Arten und Lebensräume in der Schweiz“. BBL, Verkauf Bundespublikationen, 2016. [Online]. Verfügbar unter: www.bafu.admin.ch/uz-2305-d
- [22] D.J. Sailor et al., "Field measurement of albedo for limited extent test surfaces", *Solar Energy* 80 (2006) 589–599, doi:10.1016/j.solener.2005.03.012
- [23] BAFU (hrsg.), „Gebietsfremde Arten in der Schweiz. Übersicht über die gebietsfremden Arten und ihre Auswirkungen.“, Bafu Bundesamt für Umwelt, Bern, Okt. 2022. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/biodiversitaet/publikationen-studien/publikationen/gebietsfremde-arten.html>
- [24] I. Sutter, B. Tschander, Anpassung an den Klimawandel / Naturschutz, ZUP Nr. 97, pp. 35-38, Juli 2020
- [25] Vorgaben Dachbegrünung (Checkliste), Stadt Zürich, Amt für Hochbauten, Lindenhofstrasse 21, Postfach 8021 Zürich, 2020
- [26] Checkliste Dachbegrünungen und Solaranlage, Stadt Zürich, Grün Stadt Zürich, Beatenplatz 2, 8001 Zürich, 2020
- [27] I. Adilkhanova, M. Santamouris, und G. Y. Yun, „Green roofs save energy in cities and fight regional climate change“, *Nat Cities*, Bd. 1, Nr. 3, S. 238–249, Feb. 2024, doi: 10.1038/s44284-024-00035-7.
- [28] Jackie Snow, „Green Roofs Take Root Around the World“, National Geographic News. Zugegriffen: 13. Januar 2020. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.nationalgeographic.com/news/2016/10/san-francisco-green-roof-law/>
- [29] O. US EPA, „Using Green Roofs to Reduce Heat Islands“. Zugegriffen: 26. November 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.epa.gov/heatislands/using-green-roofs-reduce-heat-islands>



7 Anhang

7.1 Monatliche Erträge des Messjahres 2022/2023

Die Messungen anhand der Optimizer-Daten verliefen ab April weitestgehend stabil. Eine Ausnahme stellen vier Module am südöstlichen Dachende dar (Butterfly, bifazial), welche herausgenommen wurden und in den folgenden Abbildungen als weisse Flächen erkennbar sind. In Abbildung 61 wird zunächst der spezifische Ertrag [kWh/kWp] im gesamten Zeitraum von April bis Ende August dargestellt. Die Darstellung der Ergebnisse ermöglicht eine räumliche Auflösung und dadurch insbesondere eine Zuordnung zum Systemtyp, sowie das Erkennen von lokalen Unterschieden, beispielsweise durch abschattende Objekte in der Umgebung.

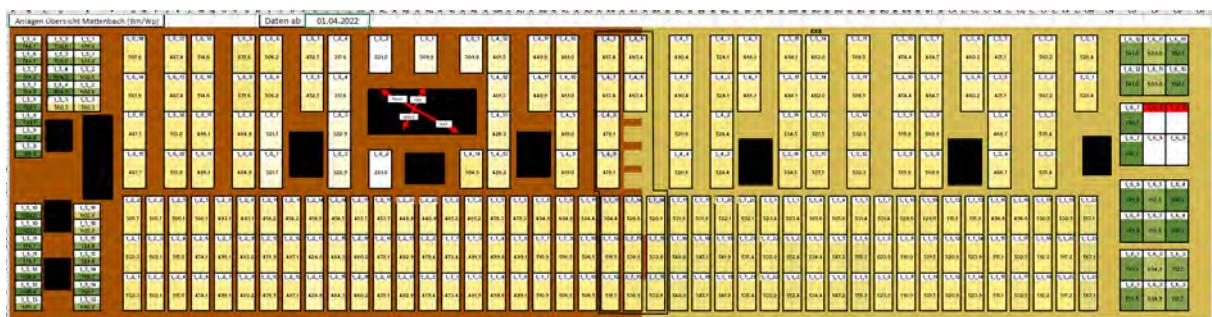


Abbildung 61: Spezifischer Ertrag [kWh/kWp] im gesamten Zeitraum von April bis Ende August 2022.

Insgesamt sieht das Gesamtbild von April bis Ende August sehr ähnlich aus zu jenem, welches bereits zuvor in der Systembeschreibung für den Juli gezeigt wurde. Dies macht auch Sinn, da die sonnenreichen Monate den Gesamtertrag dominieren und sich in den Sommermonaten um den Juni herum nur wenig Variationen ergeben.

Aus der Farbgebung und der Position ist anhand der bedingten Formatierung direkt erkennbar, dass die Systeme am jeweils schmalen Ende des Daches, also die Butterfly- und Portrait-Installationen einen höheren spezifischen Ertrag erzielen, als die vertikalen Systeme. Die spezifischen Erträge der vertikalen Systeme (gross, klein, hell, dunkel) unterscheiden sich nur wenig, wobei jene auf dem hellen Substrat tendenziell etwas höhere spezifische Erträge liefern. Die «Nordostseiten» der Butterfly-Systeme erzielen erwartungsgemäss etwas geringere Erträge. Die entsprechenden Unterschiede innerhalb des Butterflies und zu den südausgerichteten Modulen sind allerdings nicht sehr ausgeprägt, da die Kippwinkel nur 15° betragen. Somit sind die Module annähernd horizontal ausgerichtet und erbringen daher vergleichbare Ergebnisse. Systematische Abschattungseffekte zeigen sich insbesondere um die grossen Dachaufbauten herum im nordwestlichen Bereich, durch blassere Färbung.

Insgesamt scheint die gewählte Art der Darstellung gut geeignet zu sein, um vergleichende Untersuchungen von Systemtypen und Positionen durchzuführen.

Betrachtet man die verschiedenen Monate zeigen sich deutliche Unterschiede zur Gesamtdarstellung des spezifischen Ertrages. Die Monate Februar und März werden aufgeführt, um die Trends zu zeigen, auch wenn die Daten im Einzelnen noch vermehrt von Ausfällen betroffen waren.

Im Wintermonat Februar ist das generelle Erscheinungsbild in der obigen Abbildung mit lokaler Auflösung deutlich inhomogener. Abschattungseffekte zeigen sich deutlich in der Umgebung der Aufbauten, was den niedrigen Sonnenstand im Februar widerspiegelt. Abschattungen sind aber insbesondere auch auf dem Feld der vertikalen Module erkennbar, in Bereichen die in der Nähe stehenden Bäumen

zugeordnet werden können. Vergleichbare Effekte treten auch in den Sommermonaten in den Morgen- und Abendstunden auf.

Interessant dabei ist, dass der mittlere Bereich der vertikalen Installation (Bereich mit schmalen Modulen) von den Abschattungen weniger betroffen ist und die höchsten Erträge liefert. Bei einer Bewertung des Systemeigenschaften, ohne Einfluss der realen, nichtidealen Umgebungsbedingungen muss somit dieser Bereich ausgewählt werden, um das Potenzial einzuschätzen. Dies gilt bei allen Auswertungen entsprechend generell jeweils auch für die alle Teilsysteme.

Februar 2022

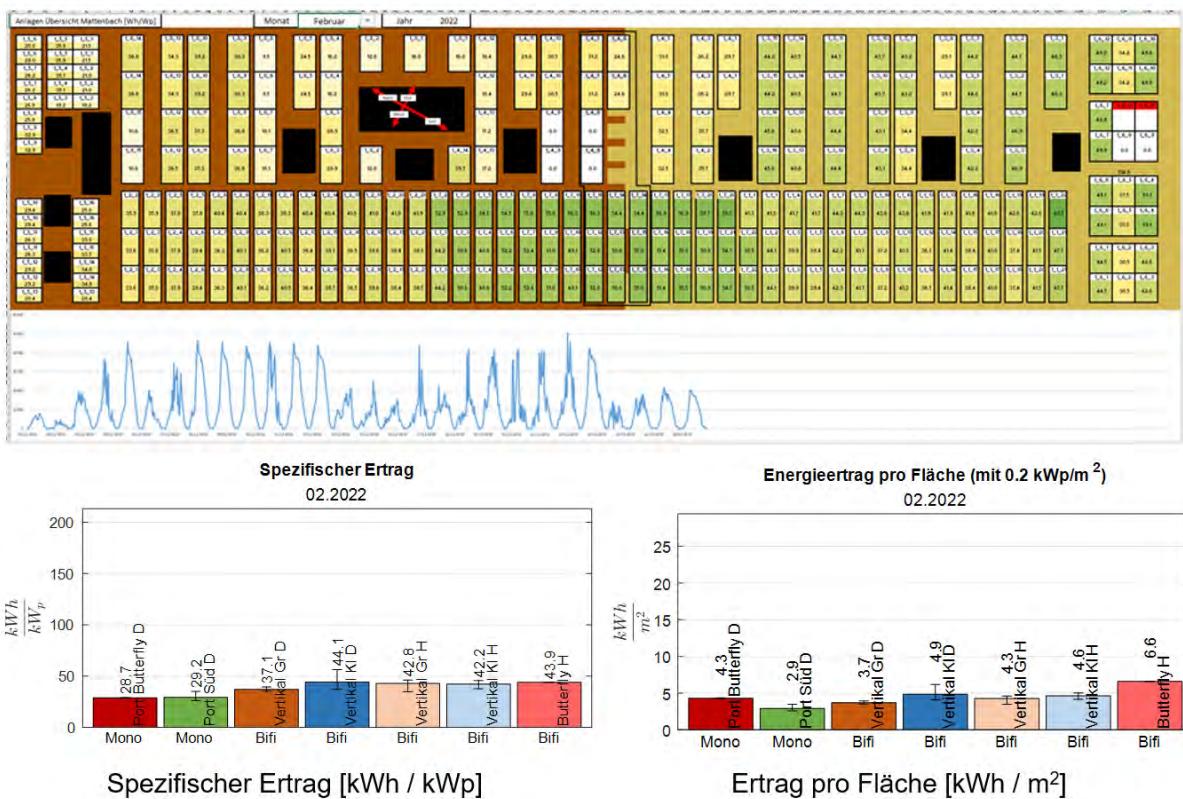


Abbildung 62: Februar 2022: Übersicht des spezifischen Ertrages über die Dachfläche lokal aufgelöst und durch bedingte Formatierung dargestellt, sowie der spezifische Ertrag der einzelnen Teilsysteme mit und ohne Flächenbezug.

In dieser Phase war auf der Dachfläche noch kein Bewuchs vorhanden und das Substrat war unverwittert. Unterschiede zwischen dem hellen und dunklen Substrat sind in der Übersicht anhand der bedingten Formatierung tendenziell erkennbar, wobei die Unterschiede in den Balkendiagrammen nochmals deutlicher werden. Die spezifischen Erträge liegen bei den jeweiligen vergleichbaren Systemen (vertikal klein zu vertikal gross, sowie Butterfly mono und bifazial mit Albedoeinfluss) im hellen Bereich höher. Die spezifischen Erträge der bifazialen Systeme und insbesondere der vertikalen Systeme liegen im Februar auch im Bereich mit dunklem Substrat höher als jene der Monofazialen. Obwohl wie gerade beschrieben aufgrund der Abschattung entsprechende Aussagen mit Vorsicht zu betrachten sind bestätigt ein Vergleich der Maximalwerte pro System die Tendenz.

Die spezifischen Erträge der vertikalen Systeme sind vergleichbar, die höhere Abschattung der grossen Module wird somit durch den gewählten Abstand mit geringerer GCR in etwa ausgeglichen. Die geringere GCR verringert sich allerdings der flächenbezogene spezifische Ertrag [kWh / kWp] pro m² bei den vertikalen Systemen mit grossen Modulen.



März 2022

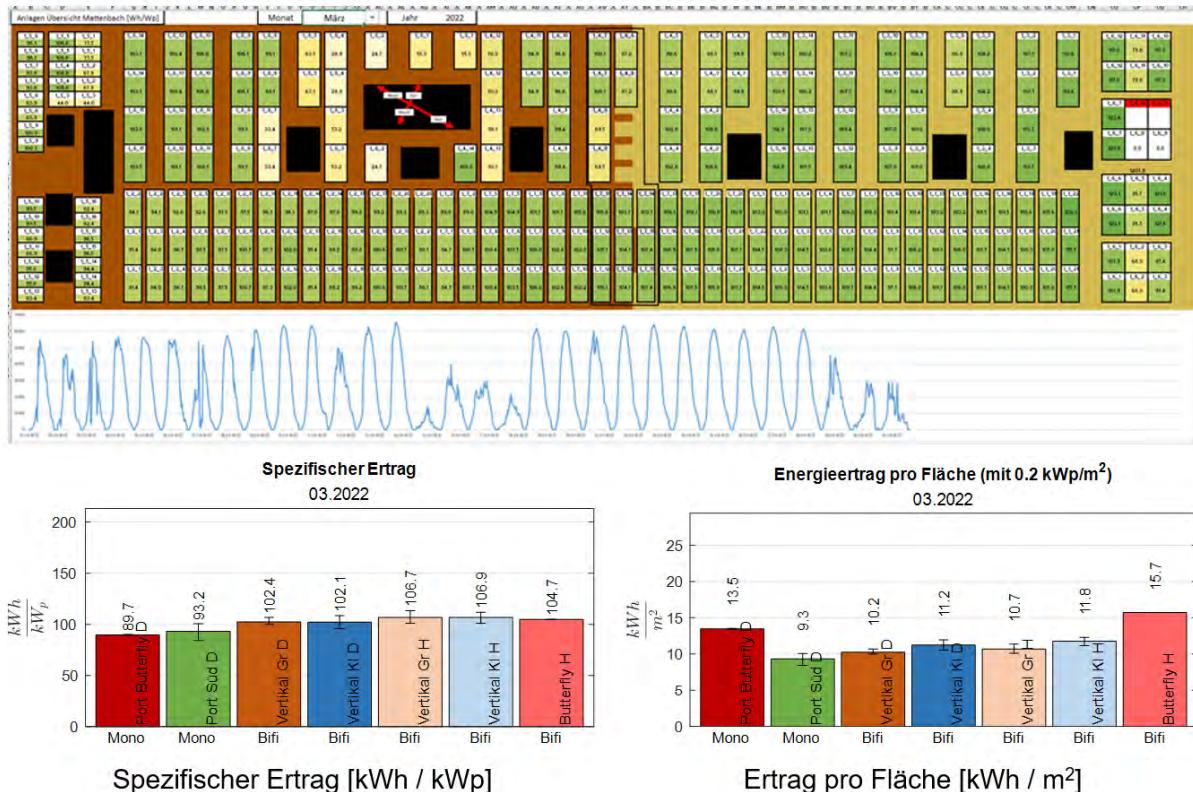


Abbildung 63: März 2022: Übersicht des spezifischen Ertrages über die Dachfläche lokal aufgelöst und durch bedingte Formatierung dargestellt, sowie der spezifische Ertrag der einzelnen Teilsysteme mit und ohne Flächenbezug.

Die gute Performance der vertikalen Systeme wird im März noch deutlicher. Das entsprechende Modulfeld, nun fast ganzflächig und inklusive der grossen Module im östlichen Bereich, liefert spezifische Erträge, welche jenen der anderen Systeme übertreffen. Abschattungseffekte sind deutlich geringer und vor allem noch im Bereich des grossen Aufbaus (Aufzug) nordöstlich der Mitte erkennbar. Die Systeme mit hellem Substrat erzielen höhere spezifische Erträge. Anzumerken ist, dass es im März, trotz des homogenen Erscheinungsbildes, immer wieder Ausfälle gab.



Abbildung 64: Dunkles und helles Substrat vor Einsetzen der Wachstumsphase.



April 2022

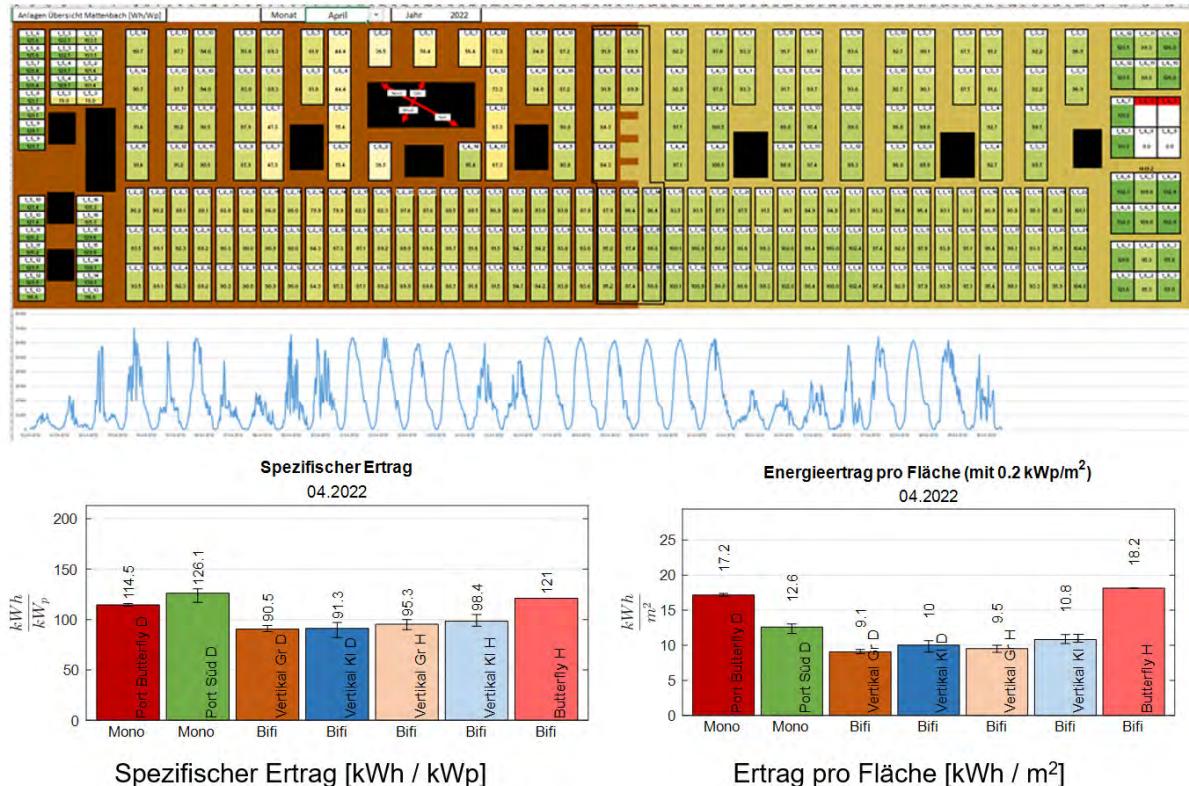


Abbildung 65: Übersicht des spezifischen Ertrages über die Dachfläche lokal aufgelöst und durch bedingte Formatierung dargestellt, sowie der spezifische Ertrag der einzelnen Teilsysteme mit und ohne Flächenbezug.

Im März reduzieren sich die Inhomogenitäten aufgrund von Abschattungseffekten weiter. Ab März liegen die spezifischen Erträge der nicht-vertikalen Systeme höher. Der höchste spezifische Ertrag wird vom südausgerichteten System erreicht, gefolgt von den zwei Butterfly-Systemen. Die Unterschiede des spezifischen Ertrags zwischen den zwei Butterfly-Systemen (monofazial HJT vs. bifazial) sind gering, der bisherige Vorteil des bifazialen Systems schwindet. Die spezifischen Erträge der vertikalen Systeme sind ähnlich, wobei sich nach wie vor ein kleiner Vorteil für die Systemteile im Bereich mit hellem Substrat ergeben.



Mai 2022

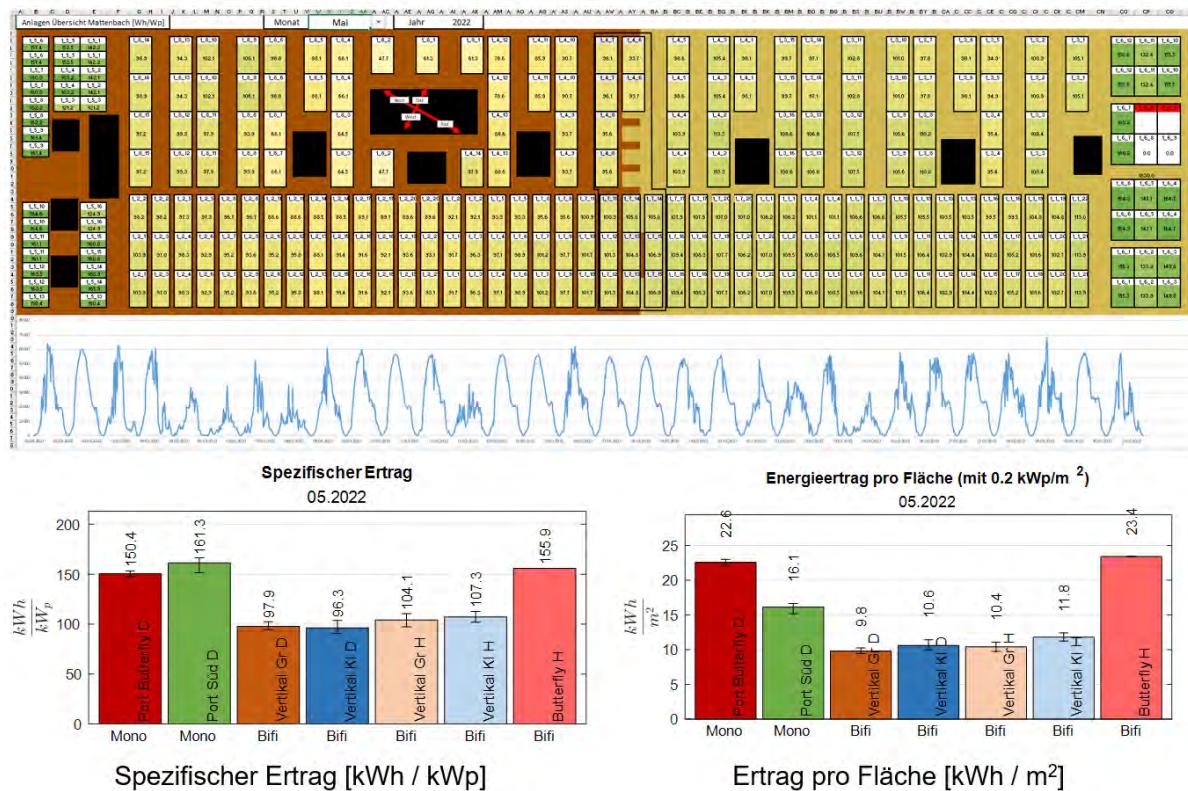


Abbildung 66: Mai 2022: Übersicht des spezifischen Ertrages über die Dachfläche lokal aufgelöst und durch bedingte Formatierung dargestellt, sowie der spezifische Ertrag der einzelnen Teilsysteme mit und ohne Flächenbezug.

Im Mai verringern sich die Inhomogenitäten im Monatsmittel weiter. Der Vorsprung der nicht-vertikalen Systeme nimmt nochmals gering zu.



Juni 2022

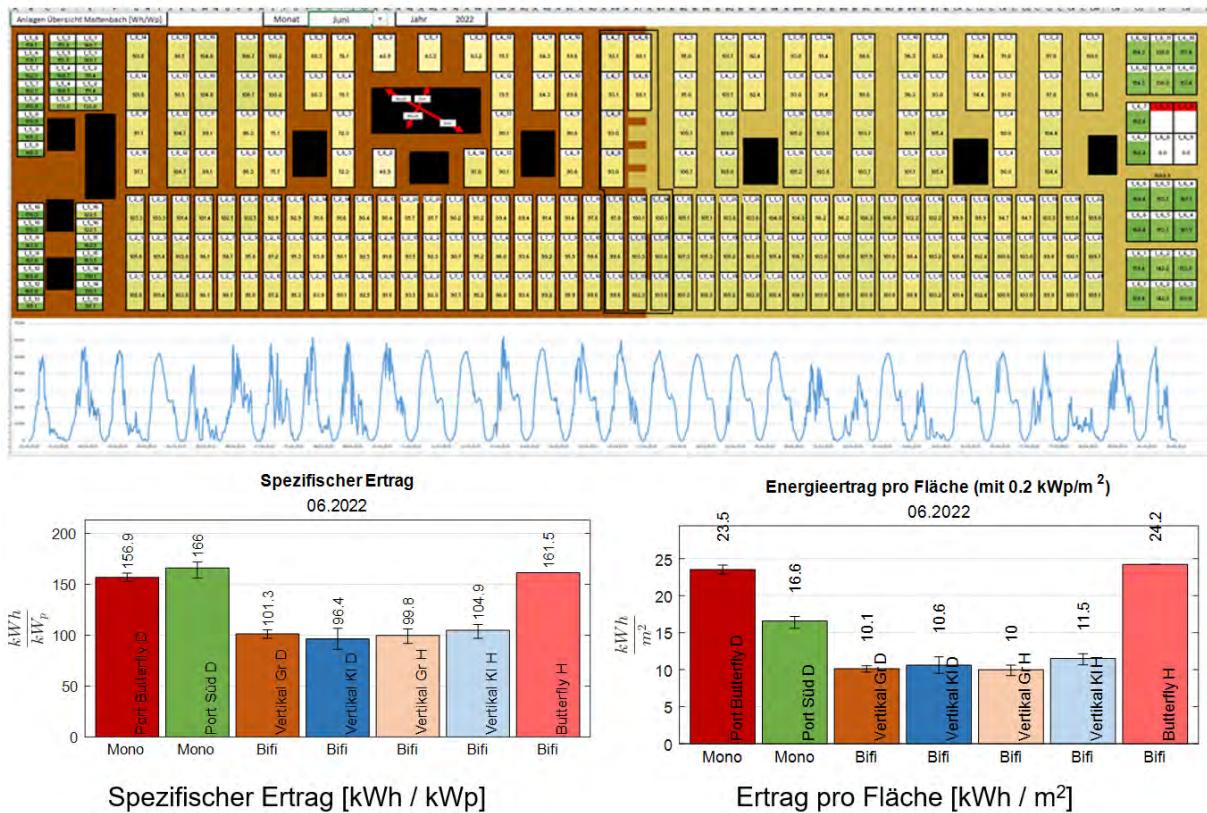


Abbildung 67: Juni 2022: Übersicht des spezifischen Ertrages über die Dachfläche lokal aufgelöst und durch bedingte Formatierung dargestellt, sowie der spezifische Ertrag der einzelnen Teilsysteme mit und ohne Flächenbezug.

Nur geringe Unterschiede zum Juni sind zu beobachten. Beide Monate mit hohem Sonnenstand und grossem Anteil von Tagen mit «Clear-Sky»-Bedingungen. Der bisher zu beobachtende Vorteil der vertikalen Systeme auf hellem Substrat schwindet, gleichzeitig nimmt der Bewuchs des Energiedachs zu. Auch der Juli zeigt sich sehr ähnlich zu den Vormonaten.



Abbildung 68: Dunkles und helles Substrat mit jeweils schwach und normal ausgeprägtem Bewuchs in den Sommermonaten.



Juli 2022

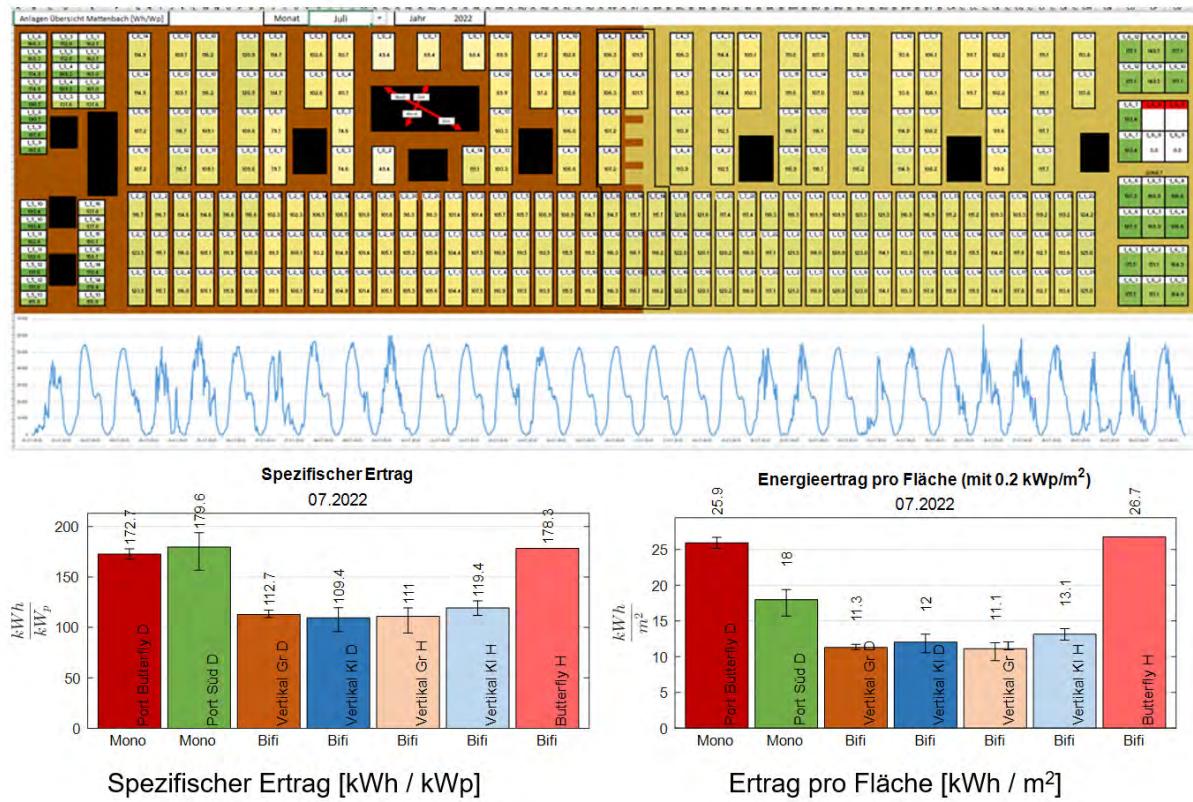


Abbildung 69: Juli 2022: Übersicht des spezifischen Ertrages über die Dachfläche lokal aufgelöst und durch bedingte Formatierung dargestellt, sowie der spezifische Ertrag der einzelnen Teilsysteme mit und ohne Flächenbezug.



August 2022

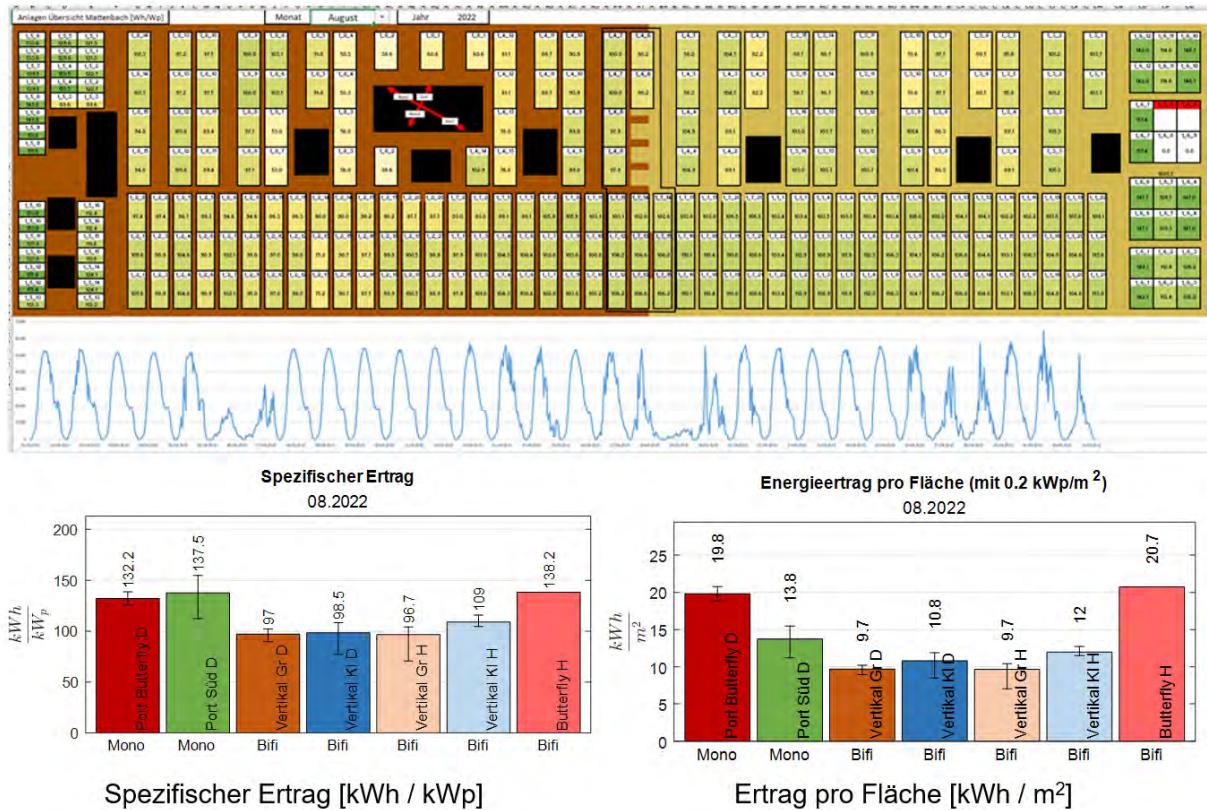


Abbildung 70: August 2022: Übersicht des spezifischen Ertrages über die Dachfläche lokal aufgelöst und durch bedingte Formatierung dargestellt, sowie der spezifische Ertrag der einzelnen Teilsysteme mit und ohne Flächenbezug.

Die spezifischen Erträge sinken im August insgesamt deutlich ab, wobei der geringere spezifische Ertrag der vertikalen Systeme sich wieder jenem der nicht-vertikalen Systeme annähert.



September 2022

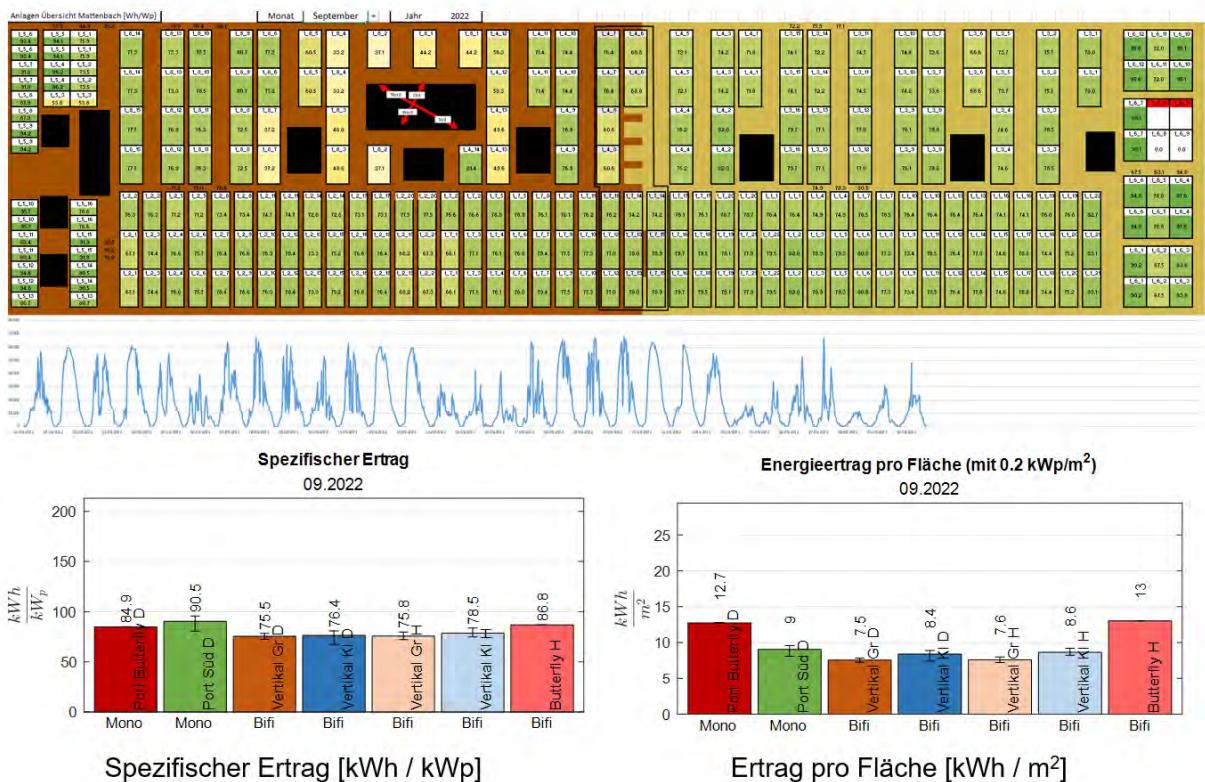


Abbildung 71: September 2022: Übersicht des spezifischen Ertrages über die Dachfläche lokal aufgelöst und durch bedingte Formatierung dargestellt, sowie der spezifische Ertrag der einzelnen Teilsysteme mit und ohne Flächenbezug.

Die spezifischen Erträge im September sinken von allen Systemen weiter ab. Die nicht-vertikalen Systeme verzeichnen jedoch eine höhere Reduktion des spezifischen Ertrages, sodass sie sich noch mehr an die vertikalen Systeme annähern.



Oktober 2022

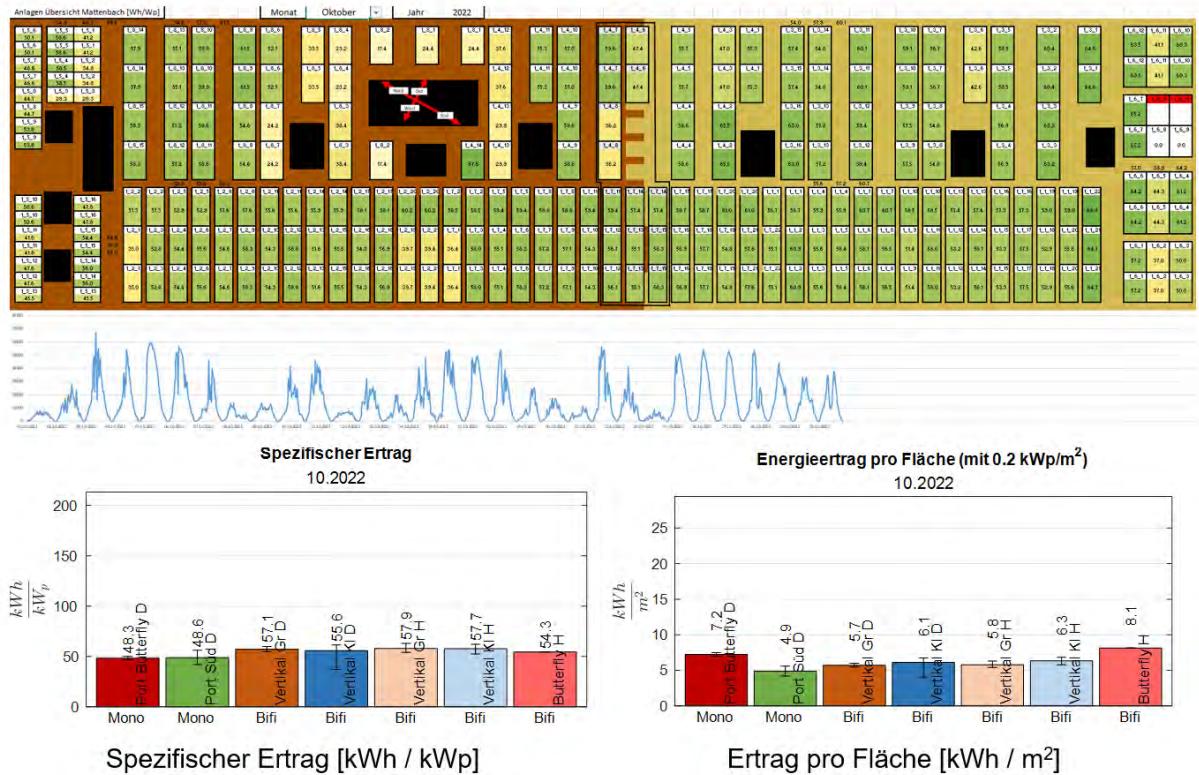


Abbildung 72; Oktober 2022: Übersicht des spezifischen Ertrages über die Dachfläche lokal aufgelöst und durch bedingte Formatierung dargestellt, sowie der spezifische Ertrag der einzelnen Teilsysteme mit und ohne Flächenbezug.

Die spezifischen Erträge nehmen im Oktober weiter ab. Der Ertrag der vertikalen Systeme nimmt dabei etwas weniger stark ab als jener der übrigen Systeme. Es ergibt sich sogar erstmals eine insgesamt minimal höhere Produktion der vertikalen Systeme in diesem Monat. Dieser Trend wird sich in den weiteren Wintermonaten noch verstärken, wobei das Ertragsniveau insgesamt ist.



November 2022

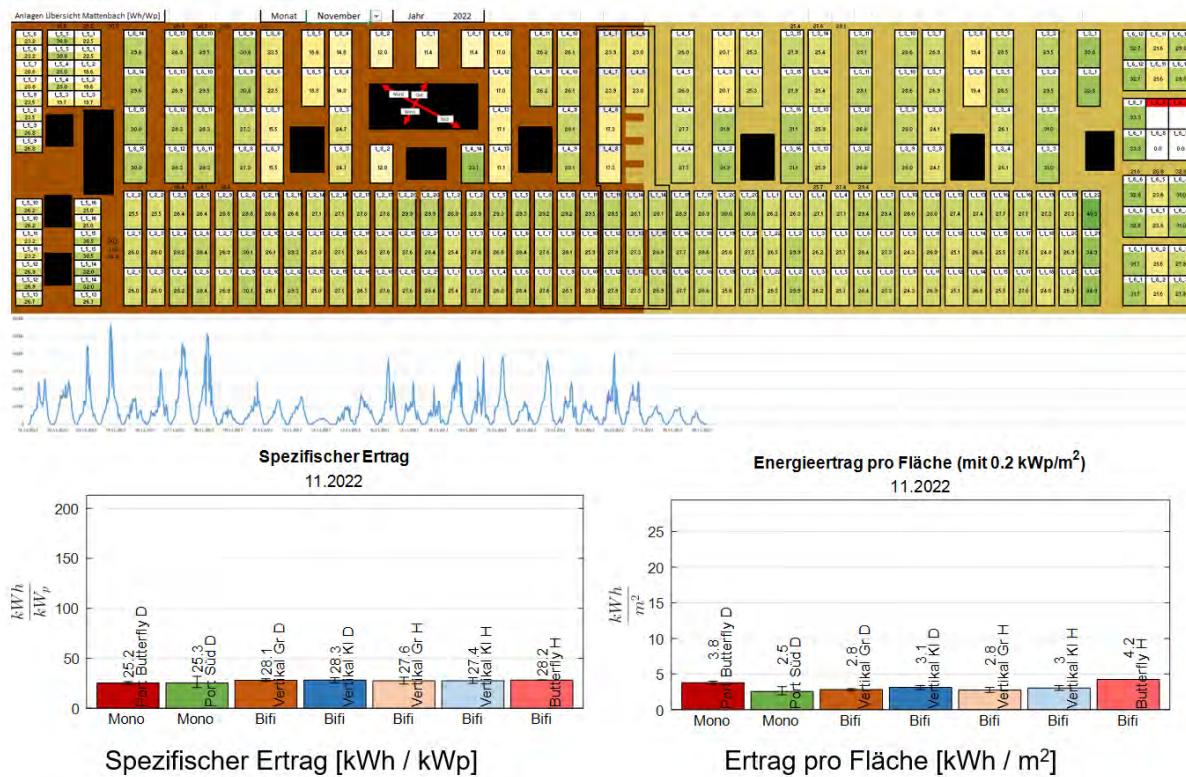


Abbildung 73: November 2022: Übersicht des spezifischen Ertrages über die Dachfläche lokal aufgelöst und durch bedingte Formatierung dargestellt, sowie der spezifische Ertrag der einzelnen Teilsysteme mit und ohne Flächenbezug.



Dezember 2022

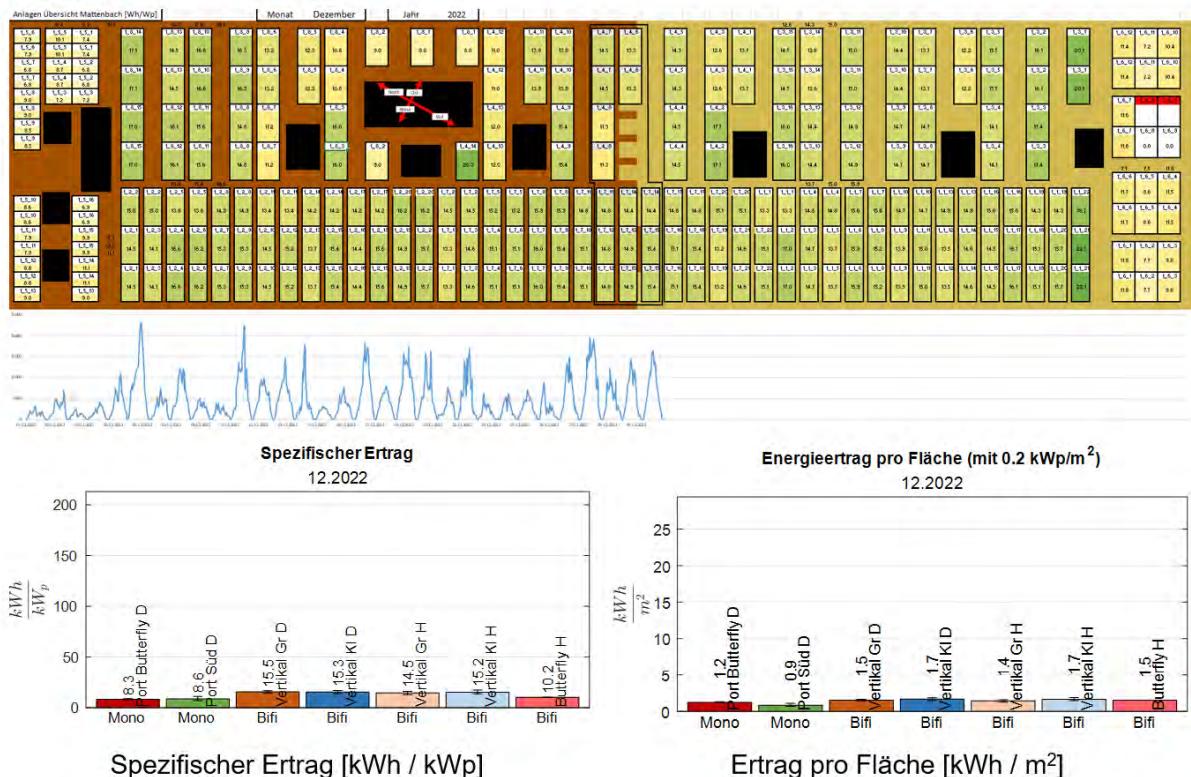


Abbildung 74: Dezember 2022: Übersicht des spezifischen Ertrages über die Dachfläche lokal aufgelöst und durch bedingte Formatierung dargestellt, sowie der spezifische Ertrag der einzelnen Teilsysteme mit und ohne Flächenbezug.

Erwartungsgemäss ist der Dezember der Monat mit den geringsten Erträgen. Die vertikalen Systeme zeigen dabei einen höheren spezifischen Ertrag auf als die nicht-vertikalen Systeme, was im Dezember neben dem allgemeinen Trend auch auf die vereinzelt aufgetretenen Schneetage zurückzuführen ist. An diesen Tagen sind alle geneigten Module vollständig mit Schnee bedeckt. Der absolute Mehrertrag der vertikalen Systeme bleibt jedoch insgesamt klein. Siehe Diskussion zu dieser Thematik im Abschnitt 4.1 und in den Abbildungen 22 bis 25.



Januar 2023

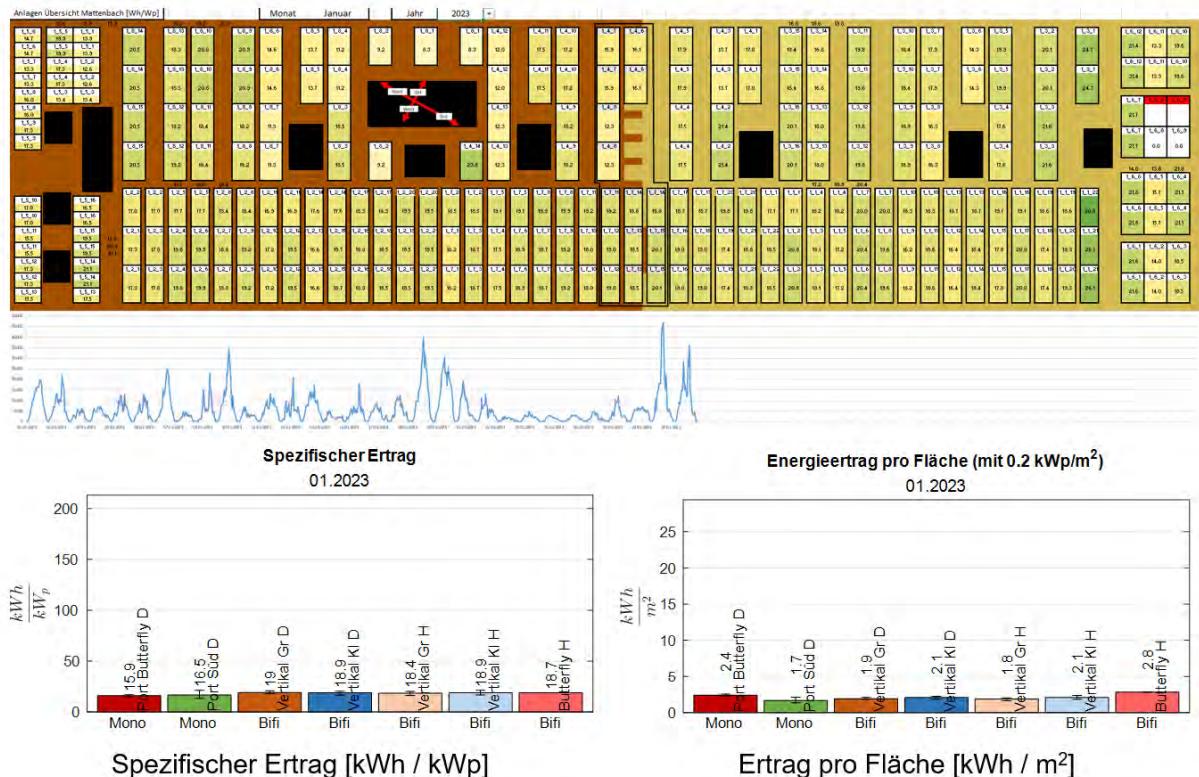


Abbildung 75: Januar 2023: Übersicht des spezifischen Ertrages über die Dachfläche lokal aufgelöst und durch bedingte Formatierung dargestellt, sowie der spezifische Ertrag der einzelnen Teilsysteme mit und ohne Flächenbezug.

Im Januar gab es keine nennenswerte Schneedeckung auf dem Dach. Die spezifischen Erträge der vertikalen und der nicht-vertikalen Systeme glichen sich an.

7.2 Details zu den Simulationen

Simulation des kleinen vertikalen Systems auf der Seite mit dunklem Substrat

Für die Simulation wurde das kleine Vertikal-System auf der dunklen Substratseite mit einem repräsentativen Teilsystem nachmodelliert. Dieses wurde möglichst an jenem Systemabschnitt angepasst, welches auch für die Auswertung verwendet wurde. Mittels Onlinekartendaten wurden die Position der Bäume und der Lüftungskästen, sowie deren Höhen abgeschätzt. Da das gesamte System einen Einfluss auf dem Ertrag hat, wurde mittels Abschattungselement der Systemteil auf der hellen Seite zusammengefasst. Die Abbildung 76 zeigt das beschriebene Szenario, welches für die Berechnung der Abschattungsverluste verwendet wurde. Die Bifazialität und die Reflexionen wurden mittels dem 2D-Modell der «unlimited sheds» berechnet.

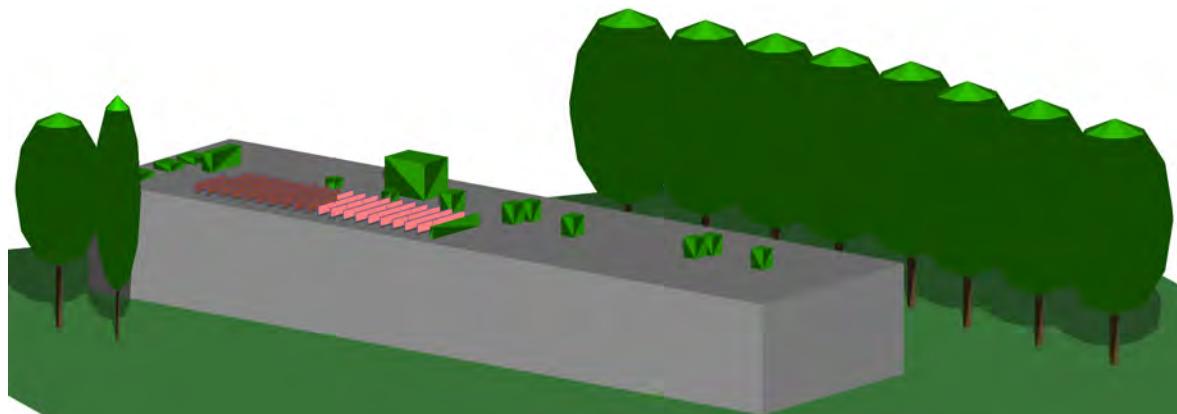


Abbildung 76: 3D-Nahverschattungsszenario vom Vertikal System mit kleinen Modulen auf der dunklen Substratseite.

Simulation des kleinen vertikalen Systems auf der Seite mit hellem Substrat

Für diese Simulation wurde lediglich das System angepasst, die Abschattungselemente bleiben immer dieselben. Auf der hellen Seite des Substrats konnte das kleine Vertikal-System beinahe vollständig modelliert werden. PVsyst lässt zu, dass man ebenfalls die Technologie der Solar Edge Optimizer für die elektrische Simulationen verwenden kann. Dennoch kann man das gewünschte System nicht eins zu eins nachmodellieren, da im realen System manchmal zwei Module pro Optimizer angeschlossen sind und manchmal ein einzelnes an einem Optimizer. Solche Unterschiede lassen sich nicht mit PVsyst abbilden, weshalb diese einzelnen Module vernachlässigt werden müssen. Auch hier wurde die Bifazialität mit dem 2D Modell der «unlimited sheds» simuliert.

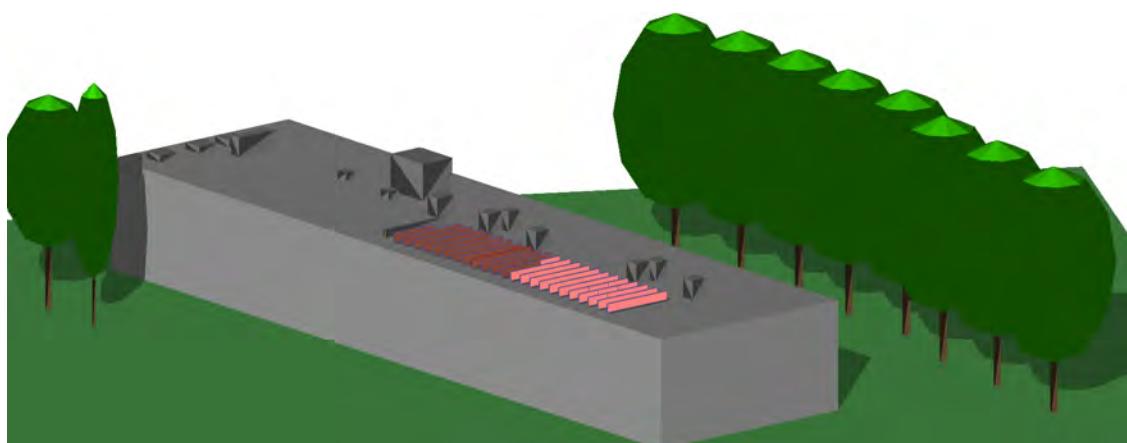


Abbildung 77: 3D-Nahverschattungsszenario vom Vertikal System mit kleinen Modulen auf der hellen Substratseite.



Simulation des monofazialen Süd-Systems

Dieses monofaziale System kann gut modelliert und auch deren Verschattung mittels dem 3D-Modell berechnet werden. Hier wurden zwei Module nahe einem grossen Lüftungskasten vernachlässigt, da diese auch in der Betrachtung der Messdaten keine Verwendung gefunden haben. Da der Lüftungskasten selbst eine Verkleidung besitzt, die wie ein Spiegel das Licht reflektiert und die Erträge der Module in der unmittelbaren Umgebung beeinflusst. Solche Details lassen sich nicht in die Simulation mit einbauen. Ebenso ist die Definition einer Flächenbedeckung in diesem Fall mit nur zwei Reihen, welche zudem durch Dachelemente getrennt sind, schwierig.

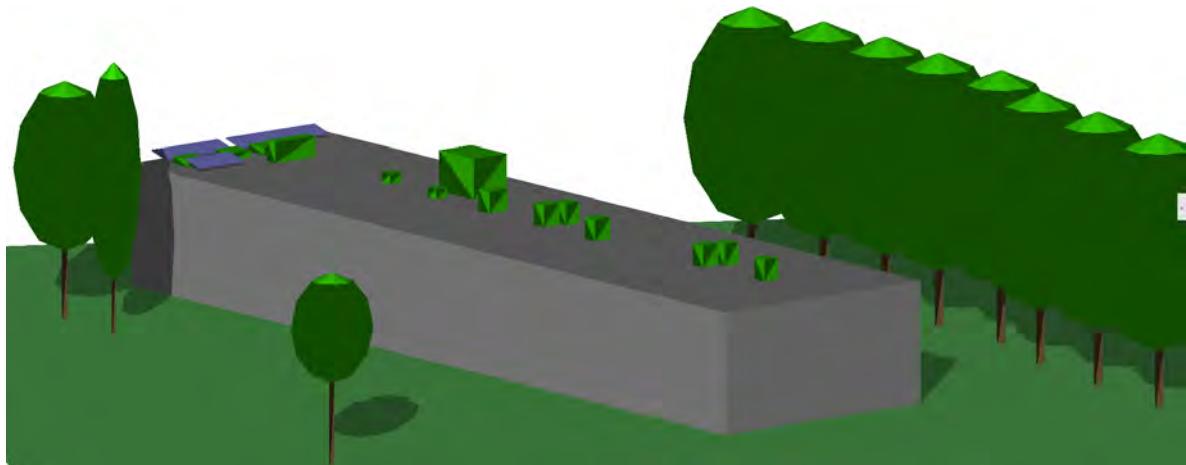


Abbildung 78: 3D-Nahverschattungsszenario vom Porträt Süd System mit monofazialen Modulen auf der dunklen Substratseite.

Simulation des monofazialen Butterfly-Systems

Das Butterfly System ist ebenfalls monofazial, hat jedoch durch die zwei verschiedenen Ausrichtungen der Module eine höhere Komplexität als das einfache Süd System. Die Optimizer dieser Ausrichtungen lassen sich in der Simulation nicht zusammenschalten, wobei man auf andere Modelle als das verwendete ausweichen musste. Ebenfalls war man wieder gezwungen zwei Module nahe dem Lüftungskasten zu vernachlässigen, da diese nach einer Verschattungsanalyse nicht als repräsentative Elemente berücksichtigt wurden.

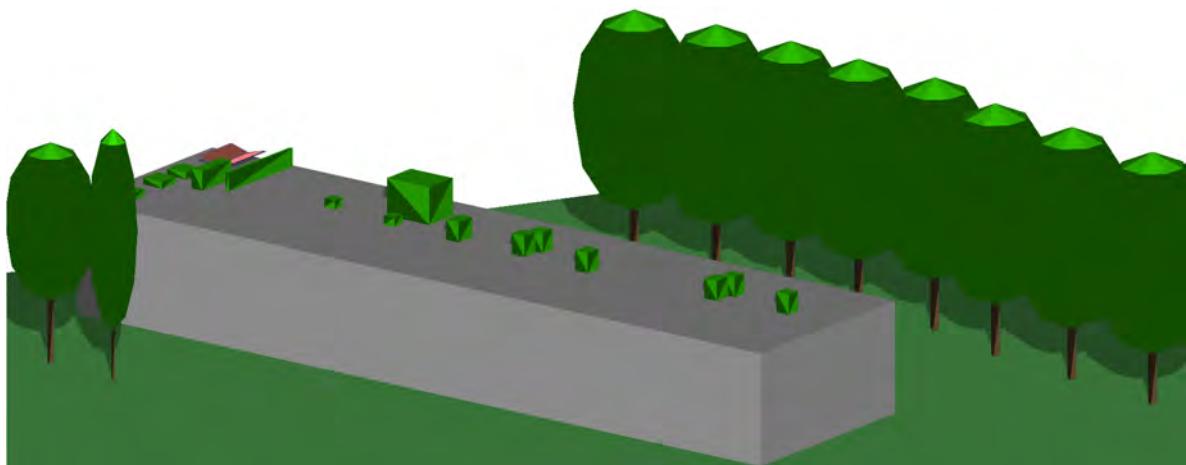


Abbildung 79: D-Nahverschattungsszenario vom Porträt Butterfly System mit kleinen Modulen auf der hellen Substratseite.



Simulation des bifazialen Butterfly-Systems

Dieses System konnte man nicht bifazial simulieren, da es ebenfalls zwei unterschiedlich Ausgerichtete Modulreihen besitzt. Daher hat man das System als ein monofaziales System in der Simulation aufgebaut, da die Verschattungen höheren Einfluss auf die Erträge haben könnten. Dies bedingt grössere Abweichungen aufgrund des fehlenden «bifacial gain».

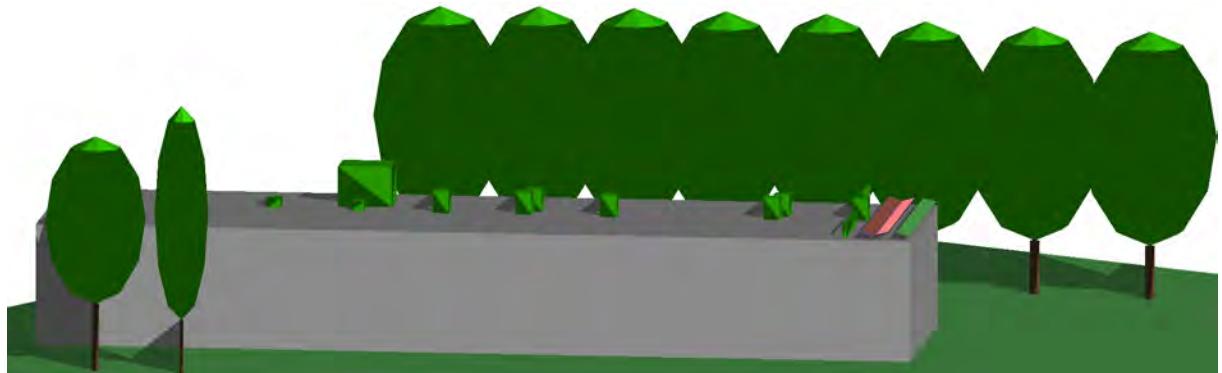


Abbildung 80: 3D-Nahverschattungsszenario vom Landscape-Butterfly-System mit bifazialen Modulen auf der hellen Substratseite.

Simulation des grossen vertikalen Systems auf der Seite mit hellem Substrat

Das Vertikal-System mit grossen Modulen konnte wieder als bifaziales System modelliert und simuliert werden. Hierbei wurde nach einer Verschattungsanalyse wieder jener Abschnitt simuliert, welcher auch für die Auswertung der Daten verwendet wurde. Alle weiteren Module werden aufgrund von Abschattung durch die Lüftungskästen und des Liftgebäudes zu stark beeinflusst, sodass sie den spezifischen Gesamtertrag verkleinern würden. Zu stark abgeschattete Module minimieren auch die Genauigkeit einer Simulation und man kann keine detaillierten Aussagen zu den Resultaten machen können.

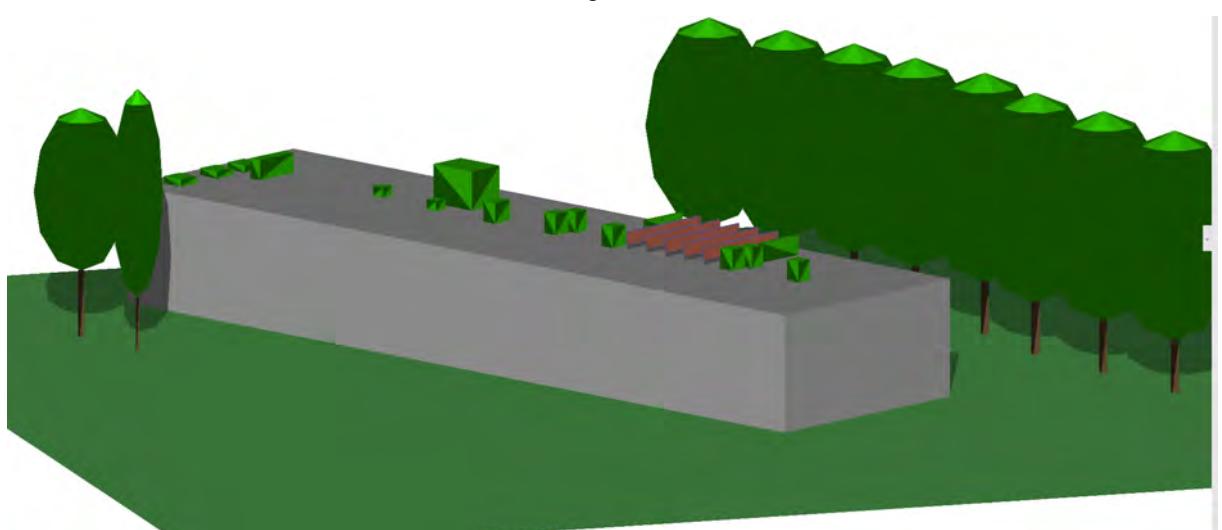


Abbildung 81: 3D-Nahverschattungsszenario vom Vertikal-System mit grossen Modulen auf der hellen Substratseite.



Simulation des grossen vertikalen Systems auf der Seite mit dunklem Substrat

Auch hier musste der betrachtete Anteil an Modulen auf das in Abbildung 82 ersichtliche Teilsystem reduziert werden. Würde man den gesamten Systemteil simulieren, so würden die am stärksten verschatteten Module das Gesamtresultat signifikant beeinflussen. Daher wurden repräsentative Reihen für die Simulation ausgewählt.

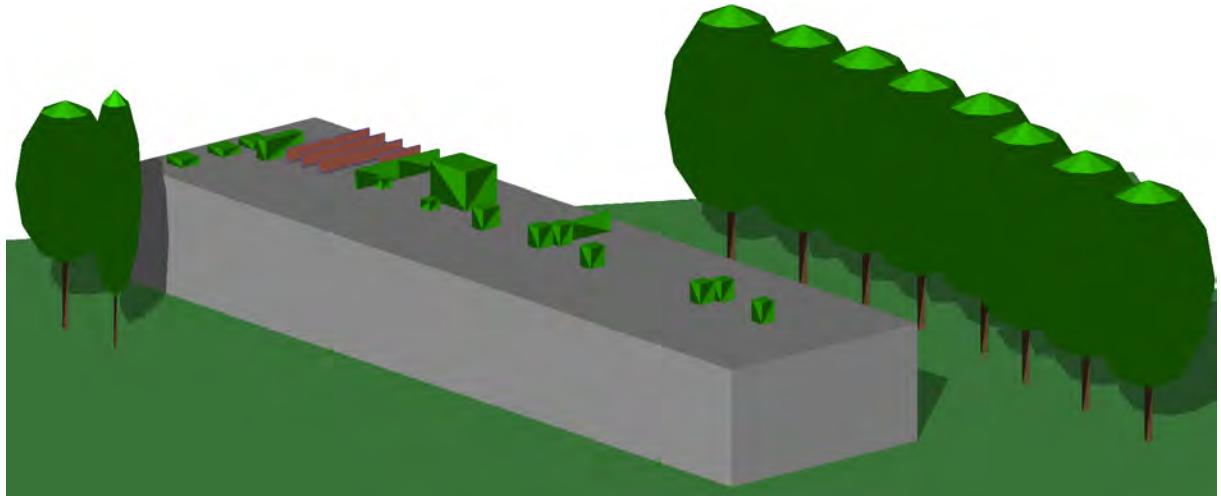


Abbildung 82: 3D-Nahverschattungsszenario vom vertikalen System mit grossen Modulen auf der hellen Substratseite.