



# Reduktion der Windlasten durch integrierte Windleitmodule - eine CFD basierte Analyse

## Vertikal bifaziale PV-Anlagen

Bei vertikal bifazialen PV-Anlagen sind die Kosten für PV-Module und Unterkonstruktion (UK) ein wesentlicher wirtschaftlicher Faktor. Zwar sind durch den Einsatz von Standardmodulen erhebliche Kosteneinsparungen realisierbar, jedoch stellt die Dimensionierung der UK aufgrund hoher Windlasten eine konstruktive und wirtschaftliche Herausforderung dar. In der vorliegenden Arbeit wird der Einsatz von photovoltaisch aktiver Windleitmodule untersucht, um die Windlasten zu reduzieren und somit die UK-Kosten zu senken.



**Alexandre Voirol**  
BSc. Energie und  
Umwelttechnik  
alexandre.voirol@ost.ch  
T +41 58 257 41 45



### Anforderungen an Unterkonstruktionen für vertikal bifaziale PV-Systeme

Die Anforderungen an Unterkonstruktionen für vertikal bifaziale PV-Systeme sind widersprüchlich: Einerseits müssen die Träger hohe Knicklasten aufnehmen können, andererseits sollen sie möglichst schmal ausgeführt werden, um Verschattungsverluste zu minimieren. Da das Flächenträgheitsmoment jedoch kubisch mit der Trägertiefe zunimmt, ist eine schlanke und gleichzeitig knicksichere Konstruktion nur schwer realisierbar. Eine klassische Abstützung zur Lastverteilung in den Untergrund ist konstruktiv erst ab der Modulunterkante möglich. Somit entspricht der massgebende Lastfall dem ungünstigsten Fall der Eulerschen Knicklast - unten eingespannt, oben frei.

### Windlasten an vertikal bifazialen PV-Anlagen

Gemäss SIA 261 werden Dachbereiche in drei Windzonen unterteilt. Dabei erfahren Dachecken die höchsten Lasten, gefolgt von Dachrändern und der Dachmitte. Beim Einsatz von porösem Substrat (Gründach) entfallen Sogprobleme, weshalb die Ballastierung primär gegen Knicken zu dimensionieren ist.

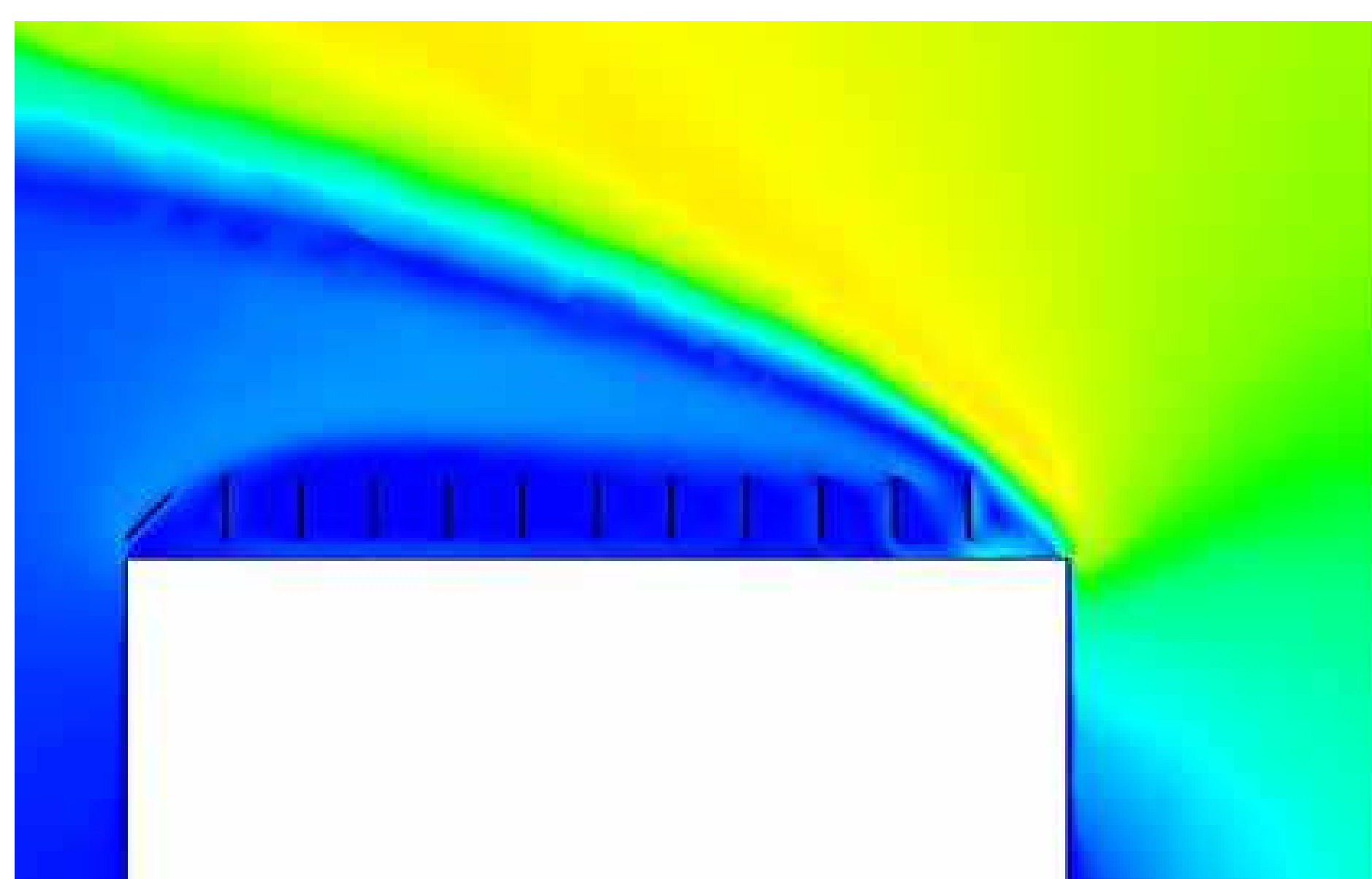


Abb. 1: Windgeschwindigkeiten in m/s bei frontal auf das Gebäude angreifendem Wind.

### Modellaufbau

In einer CFD-Simulation (Ansys Fluent, k-epsilon Turbulenzmodell) wurde ein Referenzgebäude (30 × 20 × 15 m) in Rapperswil am See mit einer vertikal bifazialen PV-Anlage (Reihenabstand 1.5 m) analysiert. Dabei wurden zwei Varianten verglichen: eine ohne und eine mit Windleitmodulen. Die Windleitmodule sind PV-Module mit verstärkter UK, die im 45°-Winkel an der Gebäudekante mit einer maximalen Unterkantenhöhe von 20 cm montiert werden und gleichzeitig als normkonformer Kollektivschutz gegen Absturz dienen.

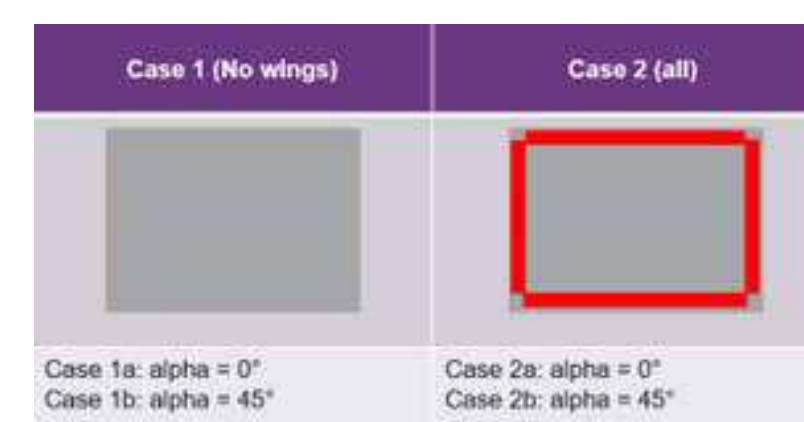


Abb. 2 Simulierte Varianten der Windleitmodule

Die Dimensionierung der Windleitmodul-UK ist nicht Gegenstand dieser Untersuchung; ausgewertet werden ausschliesslich die resultierenden Kräfte auf die Dachanlage.

### Resultate

Für alle Simulationen wurden die resultierenden Kräfte in X-, Y- und Z-Richtung für jedes einzelne PV-Modul auf dem Dach abgeleitet. Die Windkräfte beziehungsweise das Windprofil wurden aus der SIA261:2020 für den Standort Rapperswil (Referenzstaudruck 1.3 kN/m<sup>2</sup> mit Geländekategorie II «Seeufer») angenommen. Auf einer Gebäudehöhe von 15 m entspricht dies etwa einer Windgeschwindigkeit von 50 m/s.

### Kräfte bei frontal angreifenden Windlasten

Bei Windlasten, die senkrecht zur Gebäudefläche auftreten, leitet das Gebäude den Wind über das Dach ab (siehe Abb. 1). Wenn die erste Modulreihe einen ausreichenden Abstand zur Gebäudekante aufweist, sind die resultierenden Kräfte auf die Module vernachlässigbar.

### Kräfte bei 45° zur Gebäudefront angreifenden Windlasten

Bei diagonalem Windangriff (45° zur Gebäudefront) werden die Lasten nicht über das Gebäude abgeleitet, sodass die Module vollständig von den Windkräften erfasst werden. Die Kräfte sind in den Eckbereichen am grössten. Abbildung 3 zeigt die resultierenden Kräfte in X-Richtung (Knickkräfte) in N/m<sup>2</sup> – mit und ohne umlaufende Windleitmodule. Der Einsatz von Windleitmodulen reduziert die Knickkräfte so

	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	o
12	55	42	35	30	26	33	-52	316	326	310	293	-287	-196		
11	20	17	1	2	8	-18	-273	-291	-240	-192	-228	-200	-98		
10	27	24	9	12	24	-250	-363	-380	-190	-176	-208	-40	12		
9	57	52	50	66	186	408	275	173	174	139	26	113	86		
8	98	76	81	-145	-637	-475	-283	-195	-51	195	247	134	17		
7	217	186	16	660	-448	204	96	94	373	352	181	77	-76		
6	465	180	742	-640	634	-128	431	695	456	168	81	129	107		
5	520	261	-130	476	640	911	691	40	132	261	221	122	43		
4	-113	-465	-321	185	1401	726	248	227	177	-1	-90	44	60		
3	-106	617	546	116	-412	-387	111	203	195	84	60	10	-30		
2	176	1781	-709	-76	102	34	-120	265	-102	222	168	132	137		
	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	o

Abb. 3. Oben: Kräfte vertikal auf die Modulflächen pro Modul in N/m<sup>2</sup> ohne Windleitmodule (Case 1 - Abb.2). Unten: Kräfte vertikal auf die Modulflächen pro Modul in N/m<sup>2</sup> mit vollumfänglichen Windleitmodulen (Case 2 - Abb.2)

### Resultierende Ballastierung

Zur Sicherung der Module gegen Umkippen ist eine Ballastierung mittels Gründach oder Zusatzlast notwendig. Die erforderlichen Ballastierungslasten (kg/m<sup>2</sup>) sind für beide Varianten in Abbildung 4 modulweise ausgewiesen. Beim wohl im Eckbereich als auch in der Feldmitte signifikant. Bei Belastungen über 200 N/m<sup>2</sup> wird eine mittlere Kraftreduktion von 200% erzielt.

	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	o
12.2	212	91	36	4	5	2	6	6	2	5	4	36	91	212	
12	5	32	28	6	21	20	6	6	20	21	6	28	32	5	
11	6	24	16	9	58	37	13	13	37	58	9	16	24	6	
10	27	13	7	24	39	46	35	35	46	39	24	7	13	27	
9	24	9	38	48	32	7	22	22	7	32	48	38	9	24	
8	11	9	1	34	23	10	5	5	10	23	34	1	9	11	
7	11	9	1	34	23	10	5	5	10	23	34	1	9	11	
6	24	9	38	48	32	7	22	22	7	32	48	38	9	24	
5	27	13	7	24	33	46	35	35	46	33	24	7	13	27	
4	6	24	16	9	58	37	13	13	37	58	9	16	24	6	
3	5	32	28	6	21	20	6	6	20	21	6	28	32	5	
2	212	91	36	4	5	2	6	6	2	5	4	36	91	212	
	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	o

Abb. 4. Oben: Benötigte Ballastierung in kg/m<sup>2</sup> ohne Windleitmodule (Case 1 - Abb.2). Unten: Benötigte Ballastierung in kg/m<sup>2</sup> mit vollumfänglichen Windleitmodulen (Case 2 - Abb.2)

System mit Windleitmodulen wird etwa 60% weniger Ballastierungsgewicht benötigt.

### Fazit

Der Einsatz von Windleitmodulen – die gleichzeitig als Kollektivschutz gemäss SUVA-Richtlinien fungieren – ermöglicht in Kombination mit einem Gründachsystem mit durchgehenden Bodenschienen und einer Substratbeschwerung von 66 kg/m<sup>2</sup> bei einem Sicherheitsfaktor von 2 den vollständigen Verzicht auf zusätzliche Ballastierung. Darüber hinaus können die Module im Dachmittelnbereich mit schlanken 40 × 40 mm Aluprofilen mit 2 mm Wandstärke ausgeführt werden. Dies minimiert Verschattungsverluste und führt zu einer wesentlichen Material- und Kosteneinsparung bei der Unterkonstruktion.