

Probleme bei Windenstarts

Unfallstatistiken in den UK und
Modellrechnungen

Karl Bühler SG Fribourg



Unfallstatistik in UK

Unfallursachen bei Windenstarts

- Ringelpietz während der Rollphase
- Schlechte Planung der Landung nach einem Seilriss in mittlerer Höhe
- Harte Landungen nach einem Seilriss unter 50 m Höhe
- Strömungsabriss nach einem Seilriss
- Trudeln am Seil

Unfallstatistik in UK

- Der Ringelpietz während der Rollphase ist die häufigste Unfallursache in UK und zerstört viele Flugzeuge. Da sich das Flugzeug dabei überschlagen kann, ist das Verletzungspotential beträchtlich.
- Eine falsche Planung der Landung nach einem Seilriss über 30 Metern Höhe ist ebenfalls eine häufige Unfallursache mit beträchtlichen Materialschäden.
- Unfälle nach einem Seilriss bei einer geraden Landung entstehen fast ausschliesslich bei Seilrissen unter 15 Metern und in den meisten Fällen bei Seilrissen unter 10 Metern Höhe.
- Trudeln nach einem Seilriss ist in den UK im Mittel für einen tödlichen Unfall pro Jahr verantwortlich.
- Trudeln während des Aufziehens führt in den UK im Mittel zu einem tödlichen Unfall pro Jahr.

Analyse der Unfallberichte und der Schulungsunterlagen in den UK

	Ringelpietz	Falsche Landeplanung	Seilriss unter 30 Metern	Trudeln nach Seilriss über 30 Metern	Trudeln beim Aufziehen
Gefahr bewusst	ja	ja	teils	ja	nein
Massnahmen bekannt	ja	ja	teils	im Wesentlichen	teils
Massnahmen umgesetzt	nein	nein	nein	nein	nein

Massnahmen ?

- Wie kann man garantieren, dass jeder Pilot weiss, was das korrekte Verhalten beim Windenstart ist?
- Wie kann man ein korrektes Verhalten durchsetzen und "mutige" Piloten in ein schlechtes Licht rücken?
- Wie kann man die Grenzen aufzeigen innerhalb deren ein sicheres Windenstarten möglich ist? (BGA)

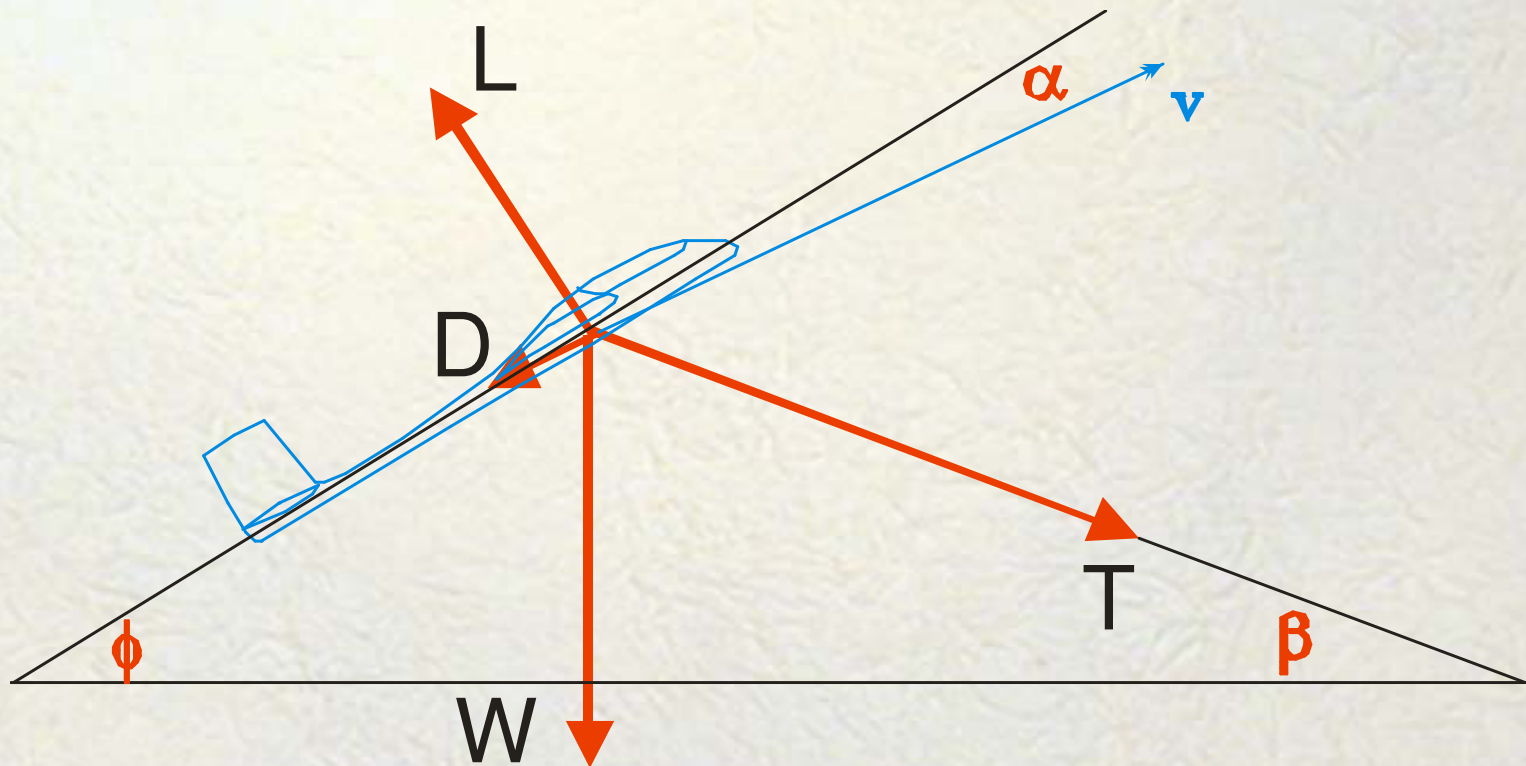
Problem:

Man kann die meisten der Grenzen nicht aus der Erfahrung erlernen: **trial and only one error!**

Erfahrungen aus anderen Flugsituationen, auch aus dem Akroflug, nützen nur wenig.

==> Modellrechnungen

Kräfte beim Windenstart



T : Track
D : Drag

L : Lift
W : Weight

v : Speed
 ϕ : Steigwinkel

β : Seilwinkel
 α : Anstellwinkel

Differentialgleichungen

$$T \cos(\beta) - L \sin(\phi) - D \cos(\phi) - \frac{W}{g} \frac{dv_h}{dt} = 0$$

$$-W - T \sin(\beta) + L \cos(\phi) - D \sin(\phi) = \frac{W}{g} \frac{dv_s}{dt}$$

$$v_s = \tan(\phi - \alpha) \cdot v_h \quad \Rightarrow \quad \frac{dv_s}{dt} = \frac{dv_s}{d\phi} \cdot \frac{d\phi}{dt} = \left(\frac{dv_h}{d\phi} \tan(\phi - \alpha) + \frac{v_h}{\cos^2(\phi - \alpha)} \right) \cdot \frac{d\phi}{dt}$$

T : Track

L : Lift

v : Airspeed

β : Seilwinkel

D : Drag

W : Weight

ϕ : Steigwinkel

α : Anstellwinkel

Modellrechnungen

Ansatz: Stabile Steigphase, Seilwinkel 5°

Φ	T/W für Gleichgewicht	N (L/W)	V _{min} ASK21	V _{min} ASW27	V _{min} ASW27 voll Wasser
5°	0.09	1.01	65.4	71.4	84.5
10°	0.18	1.03	66.0	72.1	85.3
15°	0.28	1.06	66.9	73.1	86.5
20°	0.38	1.10	68.1	74.4	88.1
25°	0.49	1.15	69.7	76.1	90.1
30°	0.61	1.22	71.7	78.3	92.6
35°	0.75	1.30	74.1	81.0	95.8
40°	0.91	1.41	77.2	84.3	99.7
45°	1.10	1.55	80.9	88.4	104.6

gemäss: Gibbson 1987, Scull 1991 BGA

Differentialgleichungen

$$T \cos(\beta) - L \sin(\phi) - D \cos(\phi) = \frac{W}{g} \frac{dv_h}{dt}$$

$$-W - T \sin(\beta) + L \cos(\phi) - D \sin(\phi) = \frac{W}{g} \frac{dv_s}{dt}$$

$$v_s = \tan(\phi - \alpha) \cdot v_h \Rightarrow \frac{dv_s}{dt} = \frac{dv_s}{d\phi} \cdot \frac{d\phi}{dt} = \left(\frac{dv_h}{d\phi} \tan(\phi - \alpha) + \frac{v_h}{\cos^2(\phi - \alpha)} \right) \cdot \frac{d\phi}{dt}$$

T : Track

L : Lift

v : Airspeed

β : Seilwinkel

D : Drag

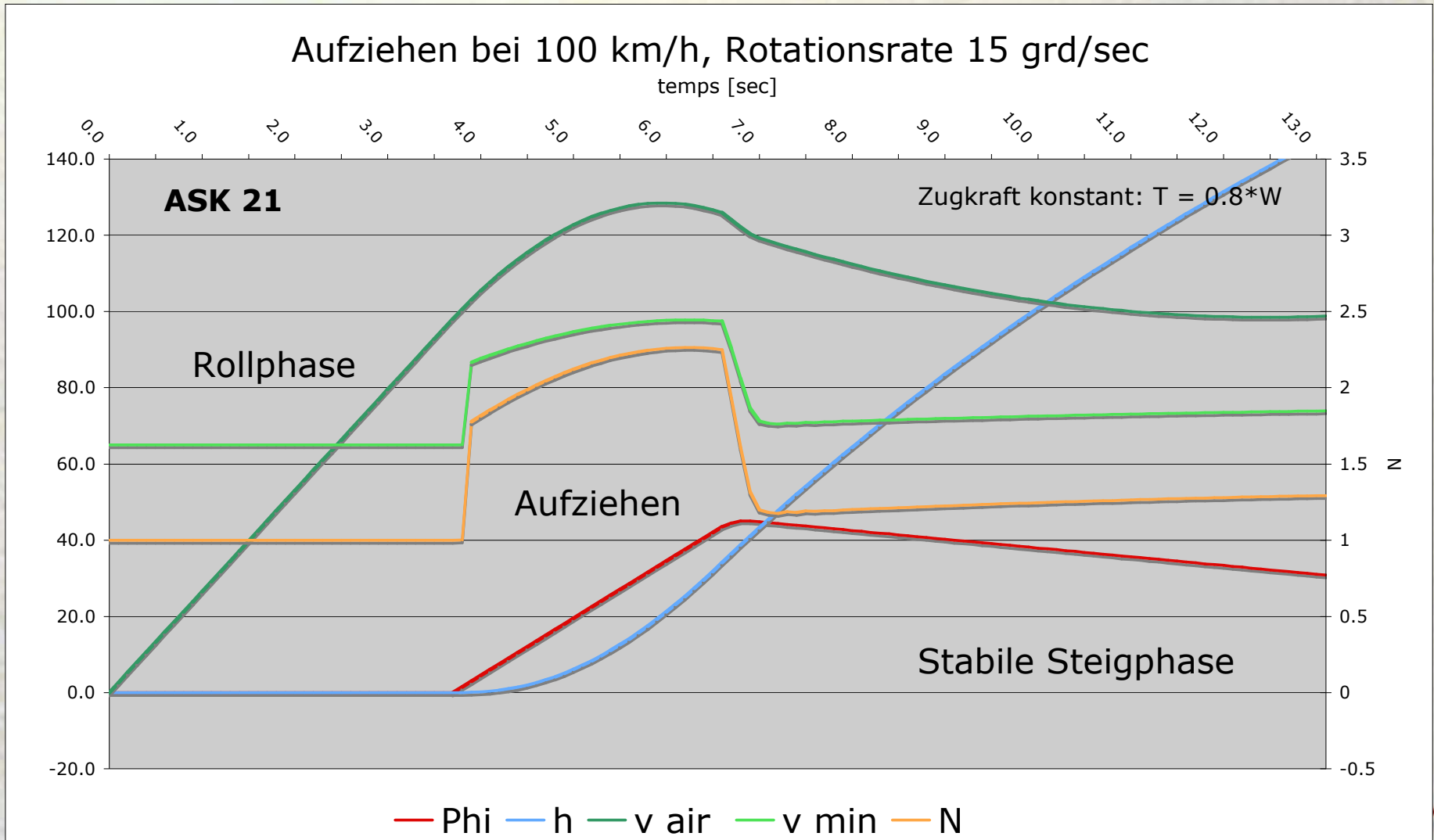
W : Weight

ϕ : Steigwinkel

α : Anstellwinkel

Modellrechnungen

Die Phasen des Windenstarts



Modellrechnungen

Belastungen beim Aufziehen ASK21

Werte verschiedener Parameter beim Aufziehen mit **15°/sec** (T/W = 0.7)

ϕ	V_{air} (km/h) für Abheben bei		v_{min} (km/h) für Abheben bei		N (g) für Abheben bei		Höhe (m) für Abheben bei	
	90	100	90	100	90	100	90	100
0 °	90.0	100.0	84.3	86.2	1.68	1.76	0.0	0.0
10 °	106.2	116.2	89.6	91.3	1.90	1.97	1.4	1.5
20 °	115.1	125.0	93.5	95.2	2.07	2.15	6.3	6.9
30 °	121.3	131.2	96.2	97.8	2.19	2.26	15.4	16.7
40 °	122.9	131.8	96.9	97.8	2.22	2.30	28.2	30.5
45 °	119.0	128.6	96.3	98.0	2.20	2.27	35.3	38.3

Modellrechnungen

Geschwindigkeiten beim Aufziehen.

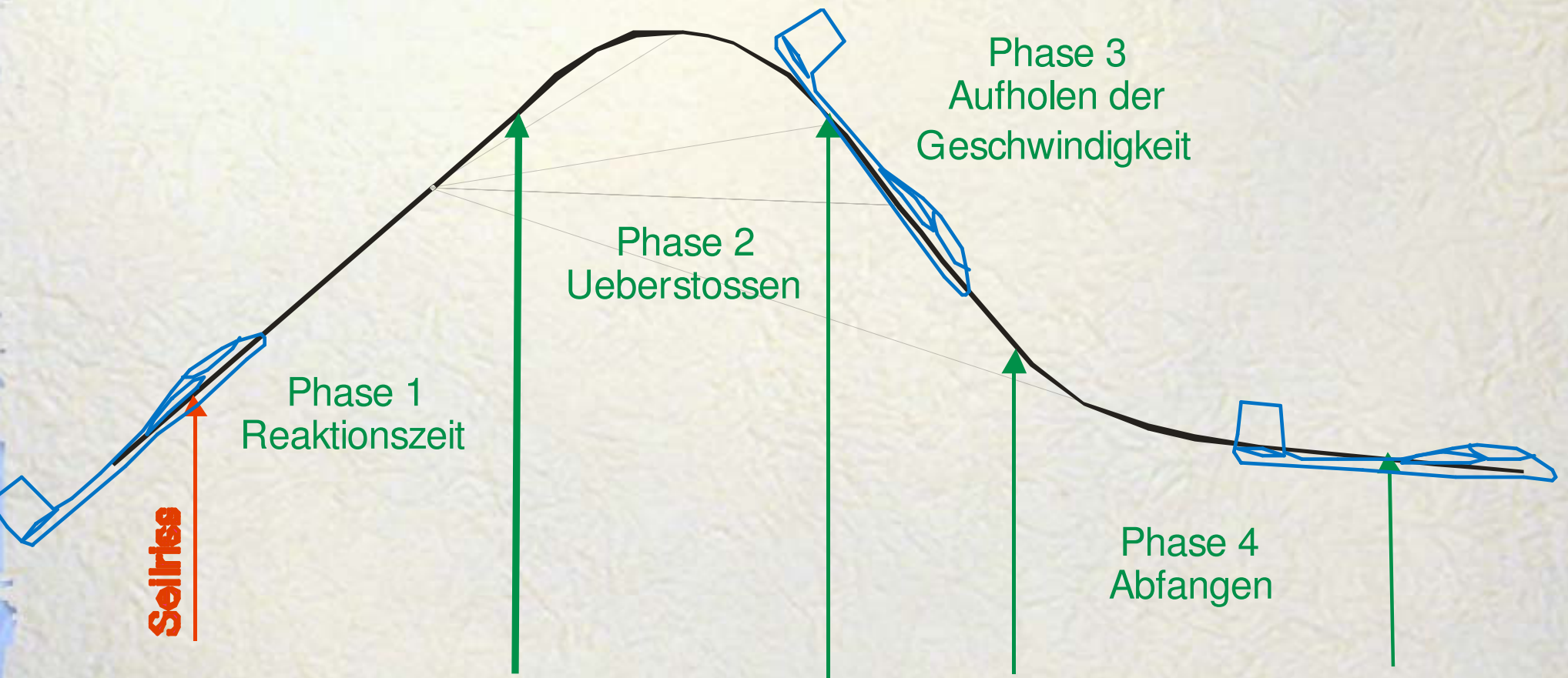
Einfluss der Zugkraft T: ASW27 mit 100l Wasser

ϕ	T = 0.6 W		T = 0.7 W		T = 0.8 W		T = 0.9 W	
	V_{air}	V_{min}	V_{air}	V_{min}	V_{air}	V_{min}	V_{air}	V_{min}
0 °	101.9	103.3	102.3	103.4	102.7	103.5	103.0	103.5
10 °	111.2	107.7	113.2	108.7	116.2	109.6	118.6	110.5
20 °	116.0	110.7	120.7	112.5	124.9	114.3	129.7	116.0
30 °	115.7	112.0	124.5	114.7	131.0	117.0	137.9	119.9
40 °	113.8	110.7	122.3	114.3	132.3	118,2	139.7	121.1
45 °	109.9	110.0	119.3	113.7	128.6	117.6	137.5	121.4

Aufziehen bei **100km/h**, Rotationsrate **15°/sec**

Modellrechnungen

Die vier Phasen beim Retablieren eines Seilrisses



Modellrechnungen

Reaktionszeiten zum Vermeiden eines Strömungsabrisses (ASK 21)

In Abhängigkeit vom Steigwinkel

Fluggeschwindigkeit beim Seilriss	Steigwinkel	Zeit bis zum Strömungsabriss im Steigflug	notwendige Reaktionszeit zum Überstossen*
110 km/h	30°	3.8 sec	3.0 sec
110 km/h	35°	3.1 sec	2.2 sec
110 km/h	40°	2.8 sec	1.7 sec
110 km/h	45°	2.3 sec	1.3 sec

In Abhängigkeit von der Geschwindigkeit

100 km/h	45°	1.9 sec	0.9 sec
105 km/h	45°	2.1 sec	1.1 sec
110 km/h	45°	2.3 sec	1.3 sec
115 km/h	45°	2.5 sec	1.6 sec

* Damit beim Erreichen der Horizontalfluglage $v \geq v_1$

Modellrechnungen

Welcher Tauchwinkel ist angezeigt?

Liegt die Geschwindigkeit beim Erreichen der Normalfluglage unter v_1 , dann **muss** der Tauchwinkel so stark vergrößert werden, dass es zu keinem Strömungsabriss kommt. Für eine ASK21 resp. für eine ASW27 (ohne Wasser) ergeben sich die folgenden Minimalgeschwindigkeiten für die verschiedenen Tauchwinkel:

Tauchwinkel	0°	-10°	-20°	-30°	-40°	-50°	-60°	-70°	-80°
V_{\min} ASK 21	65.0	64.5	63.0	60.5	56.9	52.1	46.0	38.0	27.1
V_{\min} ASW 27	71.0	70.4	68.8	66.1	62.1	56.9	50.3	41.5	29.6

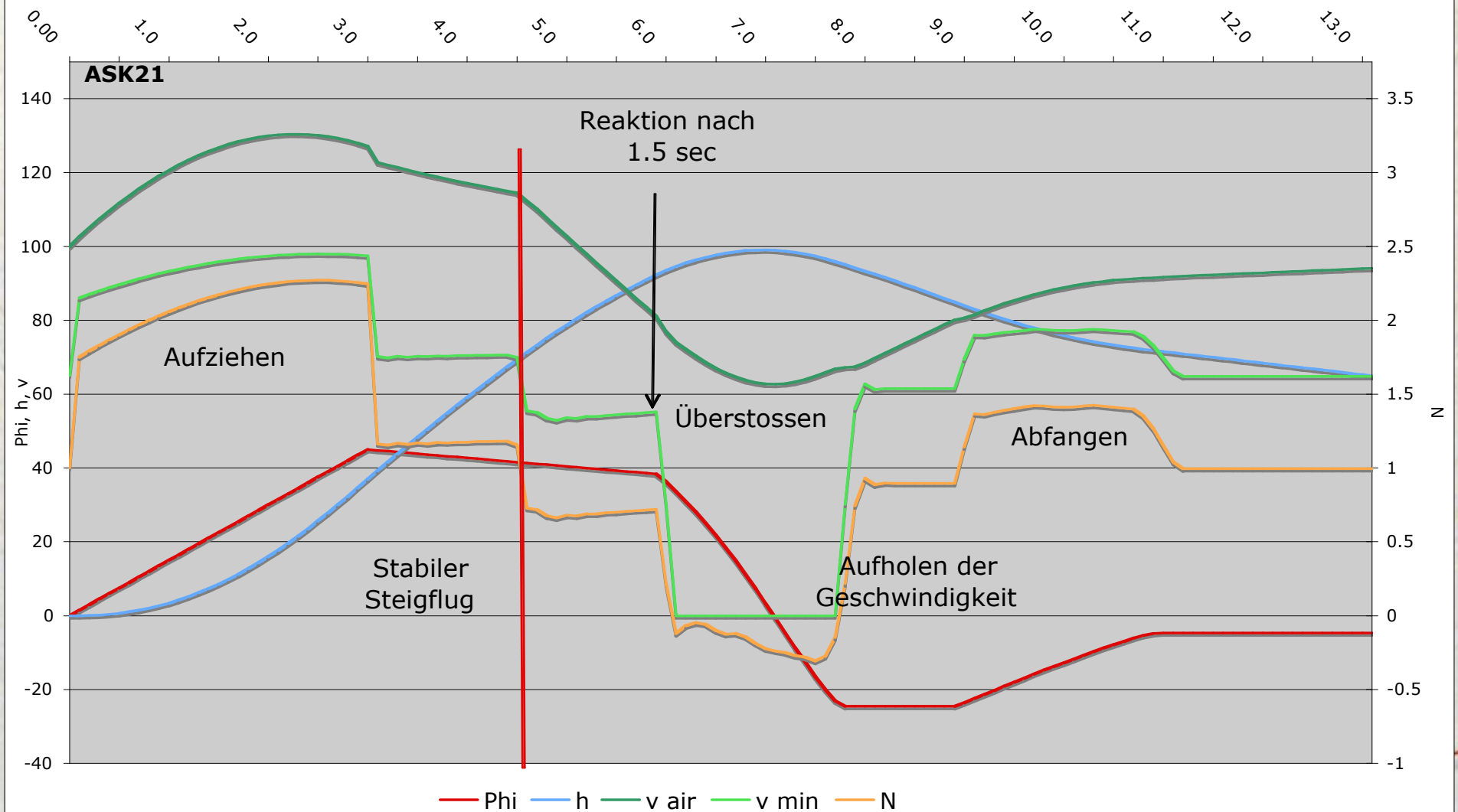
Empfehlung:

Liegt die Geschwindigkeit beim Erreichen des Flughorizontes im Bereich der Minimalgeschwindigkeit, so sollte mit ca. 20° nachgetaucht werden, bis die Landegeschwindigkeit (ASK21: 85 km/h) erreicht worden ist. Erst dann sollte mit dem Abfangen begonnen werden. Die Klappen dürfen keinesfalls vorher ausgefahren werden!

Modellrechnungen

Beispiel: Seilriss in 70 m Grund

Seilriss in 70 m Höhe; Reaktionszeit des Piloten 1.5 sec.



Modellrechnungen

Die Überschussenergie (Energiekissen)

Die Flughöhe und die Fluggeschwindigkeit bestimmen die verfügbare totale Energie pro Kilogramm des Flugzeugs.

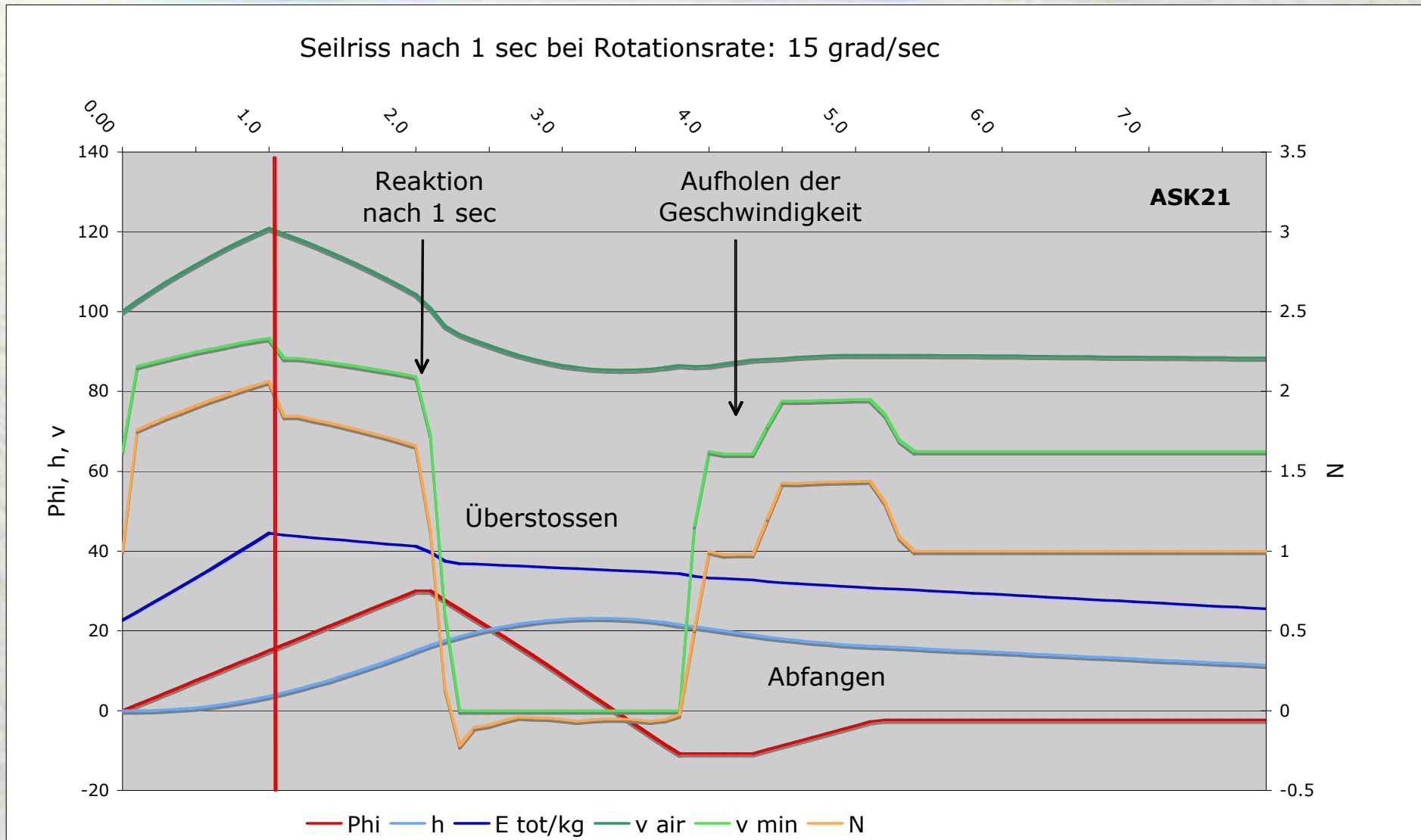
Üblicherweise gibt man den Wert dieser Energie in Form einer **virtuellen Höhe** an: Der Höhe über Grund die das Flugzeug erreichen könnte wenn man es hochzieht bis zu seiner Minimalgeschwindigkeit.

Dieses so genannte Energiekissen gibt an, über wie viel Energie man noch verfügt für allfällige Flugmanöver.

Der Erfahrung nach ist beim Erreichen der Horizontalfluglage ein minimales Energiekissen von 30 m notwendig. Dieses erlaubt es Geschwindigkeit aufzunehmen und eine saubere Landung durchzuführen.

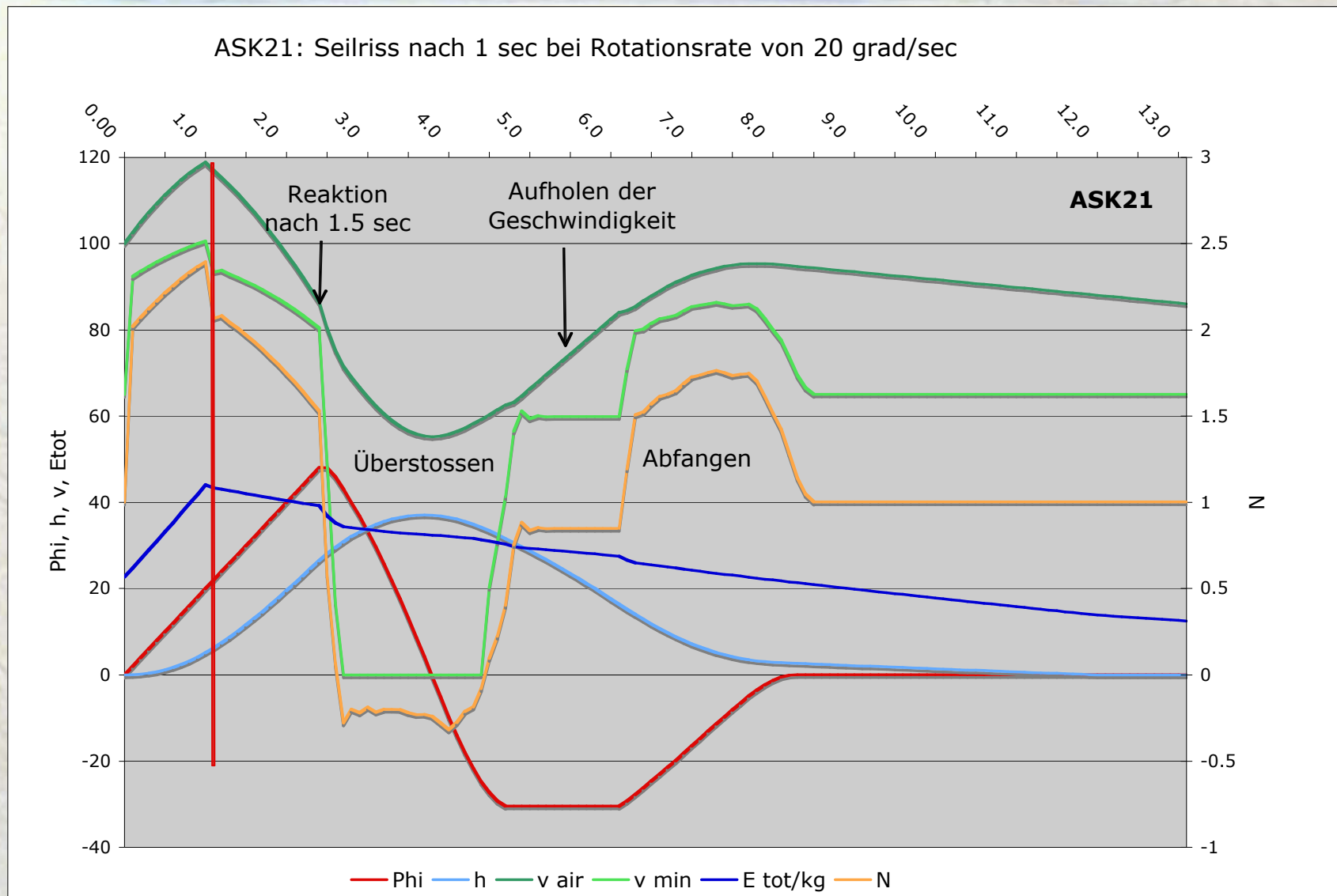
Modellrechnungen

Beispiel: Seilriss nach 1 sec.



Modellrechnungen

Beispiel: Reaktionszeit 1.5 sec, Rotationsrate 20°/s



Modellrechnungen

Energiekissen/Geschwindigkeit beim Erreichen der Horizontalfluglage

Einfluss der Reaktionszeit (ASK21, Nachstossen mit 0 g)

Abheben bei	Reaktionszeit 1.0 sec		Reaktionszeit 1.5 sec	
	15°/sec	20°/sec	15°/sec	20°/sec
90 km/h	27m/77kmh	25m/60kmh	25m/63kmh	24m/46kmh
100 km/h	35m/84kmh	33m/67kmh	33m/72kmh	31m/53kmh

Einfluss des Nachstossens (ASK21, Reaktionszeit 1.5 sec)

Abheben bei	Nachstossen mit <-0.5 g		Nachstossen mit 0 g	
	15°/sec	20°/sec	15°/sec	20°/sec
90 km/h	26m/67kmh	23m/50kmh	25m/63kmh	24m/46kmh
100 km/h	32m/74kmh	30m/60kmh	33m/72kmh	31m/53kmh

Zusammenfassung

- Beim Aufziehen einer ASK21 sollte die Rotationsgeschwindigkeit von $15^\circ/\text{sec}$ in keinem Fall überschritten werden. Leistungsflugzeuge mit Wasserballast sollten sanft, und mit weniger als $12^\circ/\text{sec}$ aufgezogen werden (BGA empfiehlt $7^\circ/\text{sec}$).
- Mit dem Aufziehen sollte erst bei 100 km/h begonnen werden.
- Nach einem Seilriss sollte mit dem Nachstossen in weniger als 1.5 Sekunden begonnen werden.
- Den kleinsten Höhenverlust erzielt man beim Nachstossen mit 0g.
- Hat man langsam reagiert, so kann der Geschwindigkeitsverlust durch ein Stossen mit negativen g's reduziert werden. Dies geht allerdings auf Kosten der Höhe.

Zusammenfassung

Genügendes Restkissen

- Zum korrekten Retablieren nach einem Seilriss benötigt man genügend Energie (Höhe und/oder Geschwindigkeit). Es ist von primärer Bedeutung dass das Flugzeug nach einem Seilriss in keiner der vier Phasen "stallt".
- Der Tauchwinkel muss entsprechend der Geschwindigkeit v_h beim Erreichen der Horizontalfluglage gewählt werden. Ein Stall muss vermieden werden.
- Ist $v_h > v_1$, so liegt der optimale Tauchwinkel zum Aufholen der Geschwindigkeit bei ca. 20° . Bei Höhen unten 30 Metern ist ein Winkel von 15° , bei extrem niedrigen Höhen ein Winkel von 5° angezeigt.
- Den kleinsten Höhenverlust beim Abflachen in der Phase 4 erzielt man beim Durchziehen mit etwa 1.5 g bei 85 km/h (ASK21). Ein Durchziehen mit maximalen g's verringert den Höhenverlust nur minimal (bei 85km/h ca. 1-2 m) und man riskiert ein "Durchfallen" des Flugzeugs.

Allgemeine Bemerkungen

- Die kritischsten Situationen, die auch statistisch gesehen die meisten fatalen Unfälle verursachen, treten bei Seilrissen in Höhen unter 20 Metern auf, d.h. bei Seilrissen beim Aufziehen, in den ersten paar Sekunden nach dem Abheben.
- Bei steilen Steigwinkeln sind die notwendigen Reaktionszeiten zum Vermeiden eines Strömungsabriss sehr kurz. Bei einem Seilriss in niedriger Höhe sollte der Fluglehrer nicht die Reaktion des Flugschülers abwarten, sondern sofort selbst eingreifen.
- Mit Flugschülern sollten keine Seilrissübungen in niedriger Höhe durchgeführt werden.
- Klappen dürfen erst in der Schlussphase des Manövers ausgefahren werden, wenn die übliche Landegeschwindigkeit (85 km/h für ASK21) erreicht worden ist.
- Erfahrungen die mit einer ASK21 gemacht wurden lassen sich nur sehr bedingt auf Leistungssegelflugzeuge mit grosser Flächenbelastung übertragen.