

4. Abstand zu den M-Werten: Gradientenfaktoren

Mit den Gradientenfaktoren hält man einen Abstand zu den maximal tolerierten M-Werten im Bühlmann-Modell ein. Eine feste Regel oder Anleitung gibt es dafür aber nicht.

Wir haben im letzten Kapitel gesehen, auf welcher Grundlage die M-Werte gesetzt werden, die maximal tolerierte Übersättigung in den Sättigungsmodellen wie von Bühlmann. Einen Inertgasüberdruck in den Geweben bis zum M-Wert zu akzeptieren, scheint heute zu riskant und auch bei Werten darunter kommen Fälle von DCS bereits vor. Deshalb existieren verschiedene Ideen, wie man die Modelle sicherer machen kann als das »Original«. Eine Möglichkeit dazu ist es, Abstand zur M-Linie zu halten – aber wie viel Abstand soll es in welchem Moment des Tauchgangs sein? Darum geht es bei den Gradientenfaktoren.

Was sind Gradientenfaktoren genau?

Gradientenfaktoren sind Ergänzungen des Bühlmann-Modells, mit denen man versucht, das Modell neueren Erkenntnissen und Ideen anzupassen. Sie erzeugen einen Abstand zur ursprünglichen M-Linie und gleichzeitig eine deutliche Modifikation: Man verändert das Modell, ohne die Konsequenzen empirisch überprüft zu haben. Deshalb ist ein wenig Vorsicht angebracht: Im Bereich der Gradientenfaktoren sind die Unsicherheiten ziemlich groß und es kann sein, dass nicht jede dieser Modifikationen einen realen Sicherheitsgewinn erbringt.

Wenn man bis an die Grenze der M-Linie auftaucht, senkt man den Umgebungsdruck so weit, dass der noch vorhandene Inertgasdruck im Gewebe dem M-Wert entspricht. Stoppt man vorher, hält man einen »Sicherheitsabstand« zu dieser Grenze ein. Mit den Gradientenfaktoren erzeugt man diesen Abstand und zieht eine neue Grenze: Man verschiebt die M-Linie nach unten – oder man verbiegt sie sogar ein wenig.

Wie genau? Zunächst einmal schaut man sich die Distanz zwischen (aktuellem) Umgebungsdruck und M-Wert an und nimmt davon einen Prozentwert. Dieser Prozentwert plus der Umgebungsdruck wird zum neuen M-Wert. Es geht dabei nicht, wie man oft vereinfacht sagt, um einen »Prozentsatz des M-Wertes«: Der M-Wert selbst ist ein Inertgasdruck, der sich aus dem Umgebungsdruck und der Übersättigung im Gewebe zusammensetzt. Modifizieren wollen wir das Maß des Überdrucks.

Schauen wir uns in der schon bekannten Darstellung eines Gewebes an, was das bedeutet (Abb. 4.1). Wir teilen hier die Distanz zwischen Um-

gebungsdruck und M-Linie auf. Wie in den Heatmaps bleibt eine niedrige Übersättigung grün und geht dann über gelb und orange bis hin zu rot, der Farbe der »originalen« M-Linie. Wenn man jetzt einen bestimmten Prozentsatz wählt, kann man eine neue M-Linie schaffen, die unterhalb der ursprünglichen liegt. Man hat damit die Übersättigung limitiert – muss aber auch eine längere Dekompression bzw. kürzere Nullzeiten in Kauf nehmen. Die verschiedenfarbigen Linien in der Grafik zeigen simple, einfach nur verschobene modifizierte M-Linien.

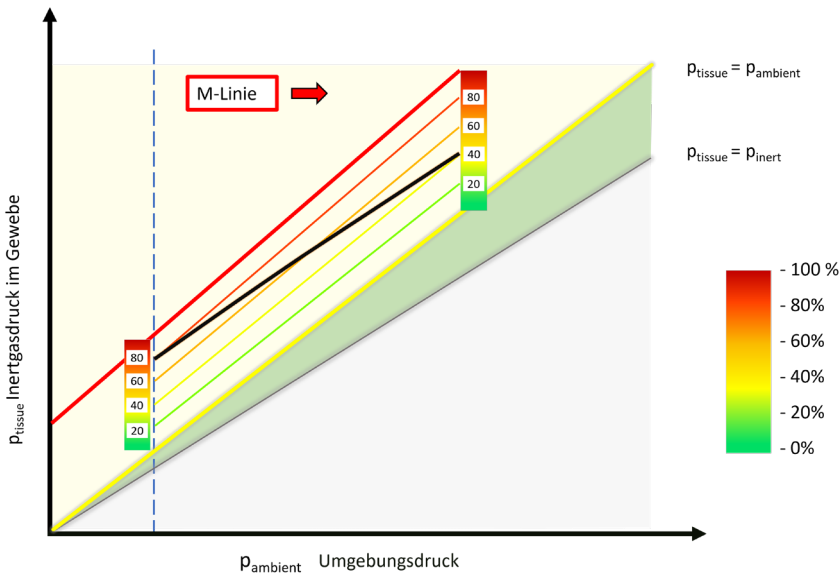


Abb. 4.1: Übersättigung eines Gewebes: Die Gradientenfaktoren limitieren die Übersättigung und erzeugen eine »neue« M-Linie unter der originalen.

Üblicherweise werden die Gradientenfaktoren als ein Paar angegeben, bei denen die erste Zahl kleiner ist als die zweite. »GF60/80« zum Beispiel oder »GF30/70« oder welche Kombination auch immer.

Hier werden während des Aufstiegs zwei unterschiedliche Punkte gesetzt: Wann möchte ich beim Aufstieg zum ersten Mal anhalten, folglich welchen Inertgasüberdruck der (zu diesem Zeitpunkt führenden) Gewebe toleriere ich in der Tiefe? Und mit welchem Sicherheitsabstand möchte ich die Oberfläche erreichen?

Diese Abstände werden durch den Gradient Factor Low (**GF Low**) und den Gradient Factor High (**GF High**) definiert.

Der GF Low bestimmt den maximal akzeptierten Inertgasüberdruck im Gewebe bei Erreichen des ersten Stopps, der GF High den maximal akzeptierten Inertgasüberdruck im Gewebe bei Erreichen der Oberfläche. Wenn man hier unterschiedliche Werte nimmt, ergibt sich nicht einfach eine verschobene Linie, sondern eine Kurve hin zu dem höheren Wert.

Warum ist das keine gerade Linie?

Könnte man nicht einfach eine gerade Linie zwischen den beiden Werten ziehen? Mathematisch wäre das tatsächlich nicht korrekt.³¹

Wenn man als GF Low einen niedrigeren Wert ansetzt als für den GF High, muss man zwangsläufig während des Aufstiegs auch höhere Übersättigungen akzeptieren, als durch den GF Low gesetzt – man muss ja irgendwann den höheren Gradienten erreichen, mit dem man an der Oberfläche ankommen will.

Wenn man jetzt einfach eine direkte Linie zwischen den beiden Punkten zieht, würde das dazu führen, dass zu Beginn des Aufstiegs die Annäherung an den höheren Gradienten nicht gleich schnell verläuft wie am Ende. In dieser übertrieben gezeichneten Grafik kann man das gut erkennen (Abb. 4.2).

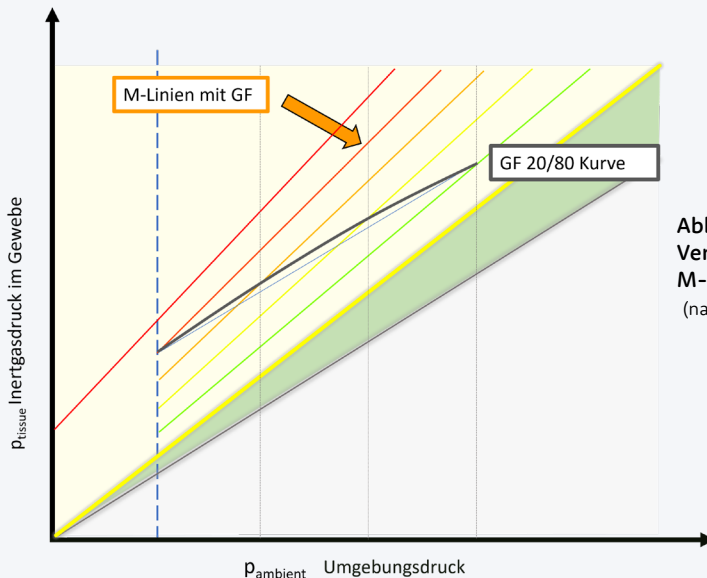


Abb. 4.2: GF-Kurve im Vergleich zur geraden M-Linie
(nach Guichard, 2024)

Will man dagegen die Annäherung an den GF High gleichmäßig über den Aufstieg verteilen, ergibt sich eine Kurve, mathematisch korrekter gesagt: es entsteht eine Parabel. Warum das so ist, kann man sich relativ einfach erschließen: Die ursprünglichen M-Werte sind linear vom Umgebungsdruck (und damit der Tiefe) abhängig. Wenn man nun möchte, dass sich auch der jeweils aktuell verwendete Gradientenfaktor mit dem Umgebungsdruck (und damit der Tiefe) gleichmäßig und damit linear an den GF High annähert, so bekommt man insgesamt eine Funktion zweiter Ordnung, eben eine Parabel. Nur im Fall von GF Low gleich GF High bleibt es eine gerade Strecke, denn da muss sich der GF Low nicht an den GF High annähern, der GF bleibt einfach gleich.

³¹ Aufgefallen ist das Guichard, D. (2024, Juni). Bending Bühlmann with Gradient Factors, Abb. 4.2 erstellt nach Graph 4.

Wir können sicherlich den Herstellern von Planungssoftware und Tauchcomputern vertrauen, dass sie die Aufstiege genau genug berechnen, um einen sicheren Tauchgang zu erhalten. In den geläufigsten Darstellungen wird jedenfalls, selbst von Baker, dem »Erfinder« der Gradientenfaktoren, einfach eine gerade Linie gezeichnet. Auch wir halten das hier im Buch bei den Grafiken so. In der Praxis ist dieser Unterschied in den Darstellungen wahrscheinlich nicht relevant, dennoch ist der Hinweis darauf, den Tauchphysiologe Dennis Guichard liefert, durchaus wertvoll. Was man nicht außer Acht lassen sollte, ist die Tatsache, dass man das Modell durch die Gradientenfaktoren tatsächlich substanziell verändert. Das ursprüngliche Modell geht – zu Recht oder auch nicht – von einem linearen Verlauf der M-Linie aus. Mit zwei unterschiedlichen Gradientenfaktoren gibt man diese Linearität auf. Da wir uns dabei immer im Feld unterhalb der ursprünglichen M-Linie bewegen, dürfen wir annehmen, dass wir auf der sicheren Seite spielen. Man sollte aber wahrnehmen, dass man eine Veränderung vorgenommen hat, die sich vom ursprünglichen Modell ein Stück weit entfernt.

Wertepaar aus GF low und GF high

Wenn man mit Gradientenfaktoren tauchen will, muss man sich für ein Wertepaar entscheiden. Aber wie kommt man auf diese beiden Werte und wie beeinflussen sie unsere Dekompression?

Die erste Entscheidung ist die, wie viel Inertgasüberdruck man den Geweben in der ersten Phase des Aufstiegs zumuten will. Der GF Low legt fest, wie hoch der Überdruck in einem Gewebe beim ersten Stopp sein darf. Die Idee dabei ist, dass der Überdruck durch tiefere erste Stopps gerade in den schnellen Geweben niedriger gehalten wird. Die schnellen Gewebe sind ja die ersten, die einen Zustand kritischer Übersättigung erreichen können. Da Blut ein schnelles Gewebe ist, spielt hier die Hoffnung mit, dass sich durch eine geringere Übersättigung gerade hier die Entstehung von Blasen bremsen lässt. Doch ein Vorteil von tieferen ersten Stopps ließ sich entgegen aller Hoffnung nie nachweisen – das werden wir in Kapitel 12 über Deep Stops noch ausführlich diskutieren.

Man wählt also für einen ersten Stopp vor Erreichen der M-Linie einen GF Low. Dieser ist, wie wir bereits gesehen haben, der Prozentsatz der Übersättigung, die zu diesem Zeitpunkt toleriert wird. Er wird üblicherweise niedriger gewählt als der GF High.

Wir erinnern uns: Die ursprünglichen M-Linien, die wir hier modifizieren, waren so gewählt, dass in der Tiefe ein höherer Inertgasüberdruck »erlaubt« ist als an der Oberfläche. Wählt man den GF Low niedriger als den GF High, dann reduziert man dieses Verhalten des Modells, kann es auch ganz zurücksetzen und auch umkehren (also in der Tiefe geringere Inertgas-Überdrücke erlauben). Was hier extrem wichtig ist: Ein niedrigerer GF Low macht den Tauchgang nicht automatisch konservativer, denn die tie-

feren ersten Stopps, die dadurch verursacht werden, führen zu einem längeren Aufenthalt in nennenswerten Tiefen und damit zu einer weiteren Sättigung mittlerer und langsamerer Gewebe. Immerhin ist es häufig eins der schnellen Gewebe, das dann den tiefsten Stopp erzwungen hat, während die mittleren bis langsamen Gewebe noch gar nicht entsättigen und weiter Inertgas aufnehmen. Die Entscheidung, was man für »konservativer« oder »sicherer« hält, ist also nicht einfach mit dem Grundsatz »alles möglichst niedrig« erledigt. Denn wir sind nie in der Lage, einfach beliebig lange Deko zu machen.

Der zweite Wert, der GF High, bestimmt den Abstand zur M-Linie bei Erreichen der Oberfläche. Hier ist klar: Je niedriger dieser Wert, umso weiter hat man beim Erreichen der Oberfläche schon entsättigt und umso niedriger ist das Risiko. Ein niedrigerer Wert des GF High kann daher grundsätzlich als sicherer gelten. Üblicherweise ist das Führungsgewebe jetzt auch ein anderes als zum Zeitpunkt des ersten Stopps.

Je niedriger der GF High, umso länger wird – wenn alles andere gleich bleibt – die gesamte Deko bei gegebener Grundzeit (und desto kürzer die Nullzeit, wir akzeptieren ja nur einen geringeren maximalen Inertgasdruck bei Erreichen der Oberfläche). Im Fall der Deko warten wir unter Wasser eine gewisse zusätzliche Entsättigung ab, und diese Zeit kommt zum eigentlichen Tauchgang dazu. Die Frage, wie lange wir bleiben wollen, bestimmt den GF High – und damit das Maß an Dekompressions-Risiko, das wir bereit sind, in Kauf zu nehmen.

Genau wie die ursprünglichen M-Linien für jedes Gewebe spezifisch sind, so entsteht durch die Gradientenfaktoren für jedes Gewebe eine eigene neue Linie (bzw. korrekt: Kurve). Da wir aber immer vom ursprünglichen Bühlmann-Modell ausgehen, reicht die einmalige Angabe der beiden Prozentwerte, um neue Grenzen festzulegen.

Welche Gradientenfaktoren sind die besten?

Man setze drei Tech-Taucher zusammen an einen Tisch und lasse sie planen, mit welchen Gradientenfaktoren sie ihren Tauchgang unternehmen wollen und die Wahrscheinlichkeit ist groß, dass sie vor lauter Diskussionen lange nicht zum Tauchen kommen. Was kein Wunder ist, denn letzten Endes handelt es sich hier um eine persönliche Entscheidung, in die nicht nur echte Erkenntnisse, sondern bei manchen auch etwas wie Bauchgefühl und aktuelles Wohlbefinden hineinspielen. Um diese Entscheidung nachvollziehbar zu machen, möchten wir hier einige Hintergrundinformationen vermitteln.

Die Wahl des GF High hat etwas mit der persönlichen Risikobereitschaft zu tun. Da es inzwischen Daten aus tatsächlich durchgeführten Tauchgängen und Hinweise auf die DCS-Inzidenz bei verschiedenen maximal im