

Zeitschrift: Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen = Swiss forestry journal = Journal forestier suisse
Herausgeber: Schweizerischer Forstverein
Band: 125 (1974)
Heft: 4

Artikel: Sturmgefahr und Sturmsicherung
Autor: Mitscherlich, G.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-766220>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 18.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Sturmgefahr und Sturmsicherung¹

Von G. Mitscherlich, Freiburg im Breisgau

Oxf.: 421.1

Jeder von uns, der einmal als Forstamtsleiter oder mit anderen Aufgaben in der forstlichen Praxis tätig war, ist in irgendeiner Form mit dem Problem der Sturmschäden konfrontiert worden. Selbst wenn man nicht an die gewaltigen Sturmkatastrophen denkt, wie sie 1967 die Wälder der Schweiz und von Baden-Württemberg und Bayern oder 1972 diejenigen von Niedersachsen und Schleswig-Holstein verheerten. Überall stösst man im Wald auf den Sturm, sei es, dass er Bäume gebrochen oder entwurzelt hat, sei es, dass in Bestände Löcher und Gassen gebrochen wurden. Immer ist damit eine Störung des planmässigen Betriebsablaufs, sind damit Verluste verbunden. Die Frage ist daher nicht unberechtigt, wie man diese Schäden auf ein Minimum begrenzen kann.

Aus diesem Grunde soll hier einmal versucht werden, eine Analyse der Bedingungen vorzunehmen, unter denen sich diese Schäden ereignen. Daraus mag sich die eine oder andere Folgerung zu ihrer Verhütung ergeben, und zwar soll zunächst ein kurzer Abriss der meteorologischen Voraussetzungen für Sturmschäden gegeben werden. Dann wollen wir uns mit der Sturmfestigkeit und Sturmgefährdung des Einzelbaums, mit den besonderen Verhältnissen der Waldränder auseinandersetzen und schliesslich mit dem Bestandesinneren.

1. Die meteorologischen Voraussetzungen

Es ist bekannt, dass unser Wetter im Herbst und Frühjahr von grossen Tiefdruckwirbeln, den Zyklonen, geprägt wird, die, vom Atlantik kommend, Mitteleuropa überqueren und in der Regel Regen und Sturm mitbringen.

Diese Niederschläge sind für unser Problem sehr wichtig. Denn während des Sommers ist der Boden in der Regel ausgetrocknet. Er erreicht etwa im September/Oktober seinen niedrigsten Wassergehalt. In dieser Zeit ist der Wald so sturmfest wie sonst nie.

¹ Vortrag, gehalten am 21. Januar 1974 im Rahmen der Forst- und Holzwirtschaftlichen Kolloquien an der ETH Zürich.

In der darauffolgenden Zeit der Herbstregen aber füllt sich der Bodenvasservorrat langsam auf. Dadurch lässt der Reibungswiderstand zwischen Wurzeln und Boden und zwischen den Bodenpartikeln selbst nach. Die Labilität der Bestände nimmt daher in kurzer Zeit rapide zu. Die Monate November und Dezember sind daher eine besonders sturmgefährdete Zeit.

In den darauffolgenden Wintermonaten Januar und Februar lässt die Sturmgefahr wieder nach. In diesen Monaten setzen sich häufig auch bei uns osteuropäische Hochdruckgebiete durch. Es kommt zu längeren Frostperioden, in denen der Boden wieder etwas trockener wird, da die Versickerung anhält, aber der Niederschlag als Schnee fällt und auf dem Boden liegenbleibt. Gelegentlich kann auch der Boden selbst gefrieren. Die Bestände sind wieder leidlich stabil.

Mit der Tauperiode im März und April steigt die Sturmgefahr dann aber erneut an, weil mit dem Tauen des Schnees der Boden sich voll mit Wasser sättigt. Die Böden an Hängen quellen als Folge der Hangwasserversickerung — subsurface flow — häufig geradezu auf. Die Bestände sind daher wieder besonders stark gefährdet.

Im Herbst und Frühjahr folgen die Tiefdruckwirbel einander oft in kurzen Abständen. Manchmal überqueren zwei Zyklone an einem Tag unser Gebiet. Das braucht nicht zu Sturmwürfen zu führen, wenn die Windgeschwindigkeit sich in Grenzen hält. Treten aber starke Luftdruckunterschiede zwischen dem Kern der Zyklone und ihren Randzonen auf, so nimmt die Windgeschwindigkeit zu und kann bei extremen Gradienten zum Sturm, ja zum Orkan, anwachsen. Abbildung 1 oben zeigt zum Beispiel ein über ganz Europa hinwegziehendes Tief mit seinem Kern in England. Die weit auseinanderliegenden Isobaren zeigen an, dass die Luftdruckgradienten nicht sehr gross sind und die Sturmgefahr daher gering ist. Im unteren Bild dagegen sehen wir auf kleinem Raum über Norddeutschland ein Tief mit eng aufeinanderfolgenden Isobaren, die auf einen sehr heftigen Sturm hindeuten. Es handelt sich um den Orkan vom 13. November 1972, bei dem in Norddeutschland 73 000 ha Wald vernichtet und über 16 Millionen Festmeter Holz geworfen wurden. Ein Sturm, durch den selbst Kieferndickungen wie Streichhölzer geknickt und übereinandergeworfen wurden!

2. Die Gefährdung des Einzelbaums

Bei der Prüfung der Situation des Einzelbaums wollen wir uns der Einfachheit halber im wesentlichen mit der Fichte beschäftigen, weil sie besonders sturmgefährdet ist. Für die anderen Baumarten gilt, entsprechend abgewandelt, Ähnliches.

Es ist bekannt, dass die Wurzeln aller Bäume atmen. Sie brauchen daher auch in der Bodenluft ausreichenden Sauerstoff. Nur wenige Baumarten können durch eine physiologische Umstellung ihrer Atmungsprozesse einen

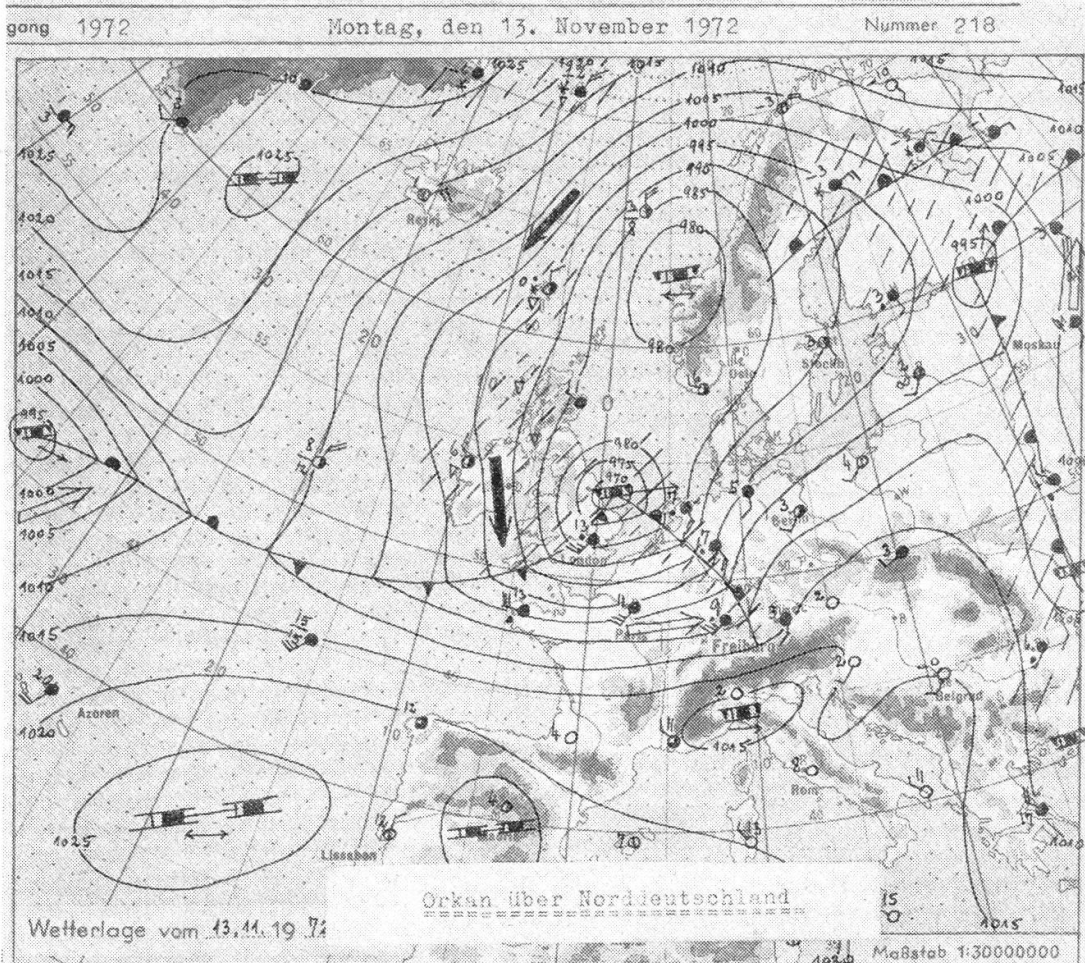
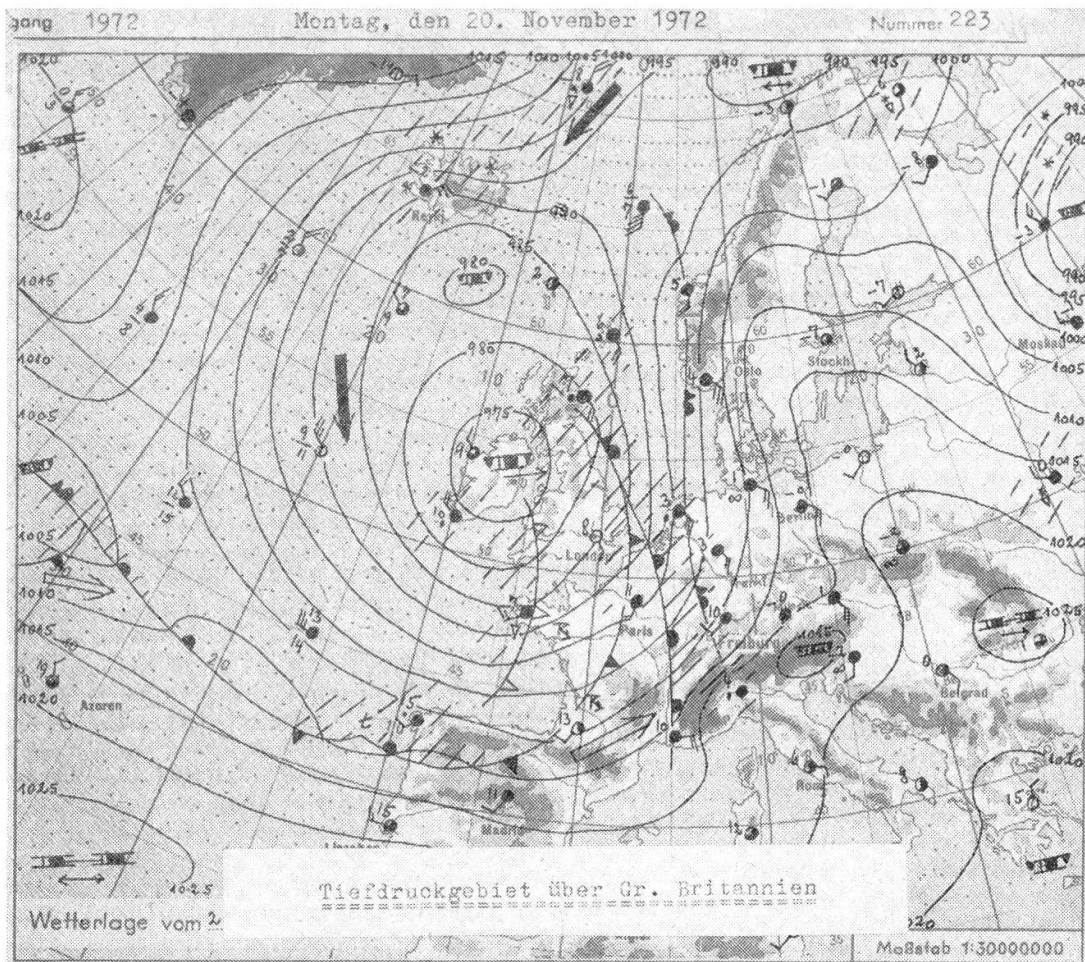


Abbildung 1. Wetterkarte vom 20. 11. 1972 mit Tiefdruckgebiet über Grossbritannien, und vom 13. 11. 1972 mit Orkan über Norddeutschland. Die dichte Folge der Isobaren auf der unteren Wetterkarte deutet auf die besonders hohen Windgeschwindigkeiten hin.

zeitweiligen Sauerstoffabschluss, etwa durch Überschwemmungen, überstehen. Unsere Nadelbäume gehören samt und sonders nicht dazu. Sie sind auf genügend Sauerstoff im Boden angewiesen. Untersuchungen von *Braun* (1974) haben gezeigt, dass Luftabschluss bei der Fichte, von einigen Sonderherkünften abgesehen, Absterben zur Folge hat.

Auf gut durchlüfteten, lockeren, tiefgründigen Gebirgsböden entwickelt die Fichte daher ein 1 bis 2 m tiefes Wurzelsystem, das sich gut im Boden verankert, und zwar um so mehr, je blockreicher der Boden ist. Geht das Porenvolumen des Bodens jedoch infolge Dichtlagerung zurück und wird damit die Durchlüftung schlechter, so unterbleibt die Tiefendurchwurzelung, und es wird bevorzugt ein flachstreichendes Tellerwurzelsystem ausgebildet, von dem nur noch Senker in die Tiefe gehen und den Baum dort quasi festnageln. Finden sich im Boden auch nur temporär wasserstauende Horizonte, wie es bei unseren Gleyen und Pseudogleyen der Fall ist, so kann auch die Senkerwurzelbildung ganz oder fast ganz unterbleiben. Das gleiche gilt für Böden mit ständig hohem Grundwasserstand, wie etwa Moorböden und dergleichen.

Diese Tatsachen sind allgemein bekannt. Sie gewinnen ihre besondere Bedeutung dadurch, dass das Wurzelholz aus verhältnismässig dünnwandigen Zellen aufgebaut ist. Im Wurzelholz gibt es keine Unterschiede zwischen Früh- und Spätholz (*Trendelenburg*, 1939). Das Wurzelholz besitzt daher eine geringere Zug- und Druckfestigkeit als das Holz des Stammes und der Äste. Wurzelholz kann daher relativ leicht brechen, knicken und zerreißen. Der Querschnitt der Wurzeln ist diesem Umstand häufig angepasst. So findet man bei der Fichte zum Beispiel oft Querschnitte die einem doppelten T-Träger ähneln. Die Gefahr, dass auch solche Stützwurzeln knicken, ist natürlich um so grösser, je mehr sich der Winkel zwischen Stamm und Wurzel 90 Grad nähert. Daher sind die Laubbäume mit ihrem schräg in den Boden eindringenden Herzwurzelsystem soviel weniger sturmgefährdet als die Fichte. Bei der Fichte wiederum sind wieder jene Bäume am wenigsten gefährdet, die einen ausgeprägten Wurzelanlauf haben. Je stärker der Wurzelanlauf ausgebildet ist, je grösser also das Verhältnis von Durchmesser zu Höhe ist, desto sturmfester ist die Fichte. Allerdings muss man dabei stets im Auge behalten, dass Fichtenwurzeln nur auf eine Länge von etwa 1 bis 1½ m wirklich nennenswerte Stützfunktionen leisten können.

Doch sollte man den Stützfunktionen der Wurzeln auch nicht allzu grosses Gewicht beilegen. Wer weiss, ob sie beim Sturm gerade in der benötigten Richtung ablaufen? Allein wären sie sicher nicht in der Lage, den Baum zu tragen. Viel wichtiger scheint mir zu sein, dass nicht nur die dicken Wurzeln, sondern alle sich mit dem Boden zu einem festen Ballen verbinden. Das kommt dadurch zustande, dass die Wurzeln bei Hindernissen beliebig auszuweichen vermögen, sich also korkenzieherartig oder im Bogen um die Steine

oder verfestigten Bodenteile legen. Bei ihrem Dickenwachstum pressen sie dann den Boden zwischen sich zusammen. Dabei spielen auch fingerstarke Wurzelstränge eine nicht zu unterschätzende Rolle. Sie werden beim Herausdrehen des Wurzelballens ausser auf ihre Zerreiissfestigkeit vor allem auf ihre Scherfestigkeit hin beansprucht. Jeder, der einmal einen Baum gerodet hat, weiss, dass mehrere solcher Wurzeln eine starke Verankerung im Boden darstellen. Die Bedeutung dieser Wurzelballen geht aus einer einfachen Rechnung hervor:

Eine Altfichte von 35 m Höhe und einem Durchmesser von 40 cm hat etwa einen Wurzelteller von 5 m Durchmesser. Bei 30 cm Tiefe umfasst der Wurzelballen damit 6 m³ Erde und Wurzeln. Bei einem spezifischen Gewicht von 1,5 g/cm³ entspricht das einem Gesamtgewicht von rund 9 t, wozu noch etwa 1 bis 2 t Wasser kommen. Der Schaft aber hat nur rund 2 fm, das heisst bei einem Frischgewicht von 0,6 g/cm³ ein Gewicht von 1,2 t, von denen sich etwa die Hälfte im untersten Viertel des Stammes befindet. Das Gewicht des Wurzelballens ist also in diesem Fall achtmal so gross wie das des oberirdischen Stammes.

Die enge Verflechtung und Verzahnung aller Wurzeln mit dem Boden ist es also, die dazu führt, dass unsere Bäume überhaupt stehenbleiben. Wenn man bedenkt, dass *Kalela* (1957) in finnischen Kiefernwäldern Wurzellängen bis zu 1 km je Quadratmeter festgestellt hat, lässt sich ermessen, wie eng verwoben dieses Geflecht ist.

Um einen derart fest mit dem Boden verwachsenen Baum zu Fall zu bringen, bedarf es erheblicher Kräfte. Versuche darüber haben *Fraser* und *Gardiner* (1967) an Douglasien und Sitkafichten im englischen Küstengebiet durchgeführt, wovon Abbildung 2 ein Beispiel bringt. Dabei wurden die Bäume am Schwerpunkt erfasst und mit einer Seilwinde umgezogen, wobei laufend Drehmoment und Neigungsgrad des Stammes gemessen wurden. Wir sehen, dass auf der Braunerde (obere Kurve) der Kraftaufwand steil und fast geradlinig ansteigt. Bis zu einer Stammneigung von 10 Grad federt der nur gebogene Stamm immer wieder zurück. Erst bei etwa 10 Grad Neigung beginnen die Wurzeln zu reiissen. Der Widerstand lässt nach, und von 14 Grad Neigung ab fiel der Baum durch das Eigengewicht von selbst zu Boden.

Anders auf Moorgley (untere Kurve). Hier führte der Seilzug sehr rasch nicht nur zu einem Durchbiegen des Schaftes, sondern zu einem Ankippen des Baumes. Der Baum dreht sich mit einem Teil des Wurzelballens im Boden. Beim Nachlassen des Zugs federte der Schaft nicht vollständig wieder in seine Ausgangslage zurück, sondern blieb «angeschoben» stehen. Es bedarf hier daher auch nur eines wesentlich geringeren Kraftaufwandes, um den Baum so weit zu kippen, dass das Eigengewicht ihn zu Boden zieht.

Solche und ähnliche Vorgänge vollziehen sich bei jedem Sturm im Walde, nur dass die Sturmböen in den meisten Fällen nicht stark genug sind,

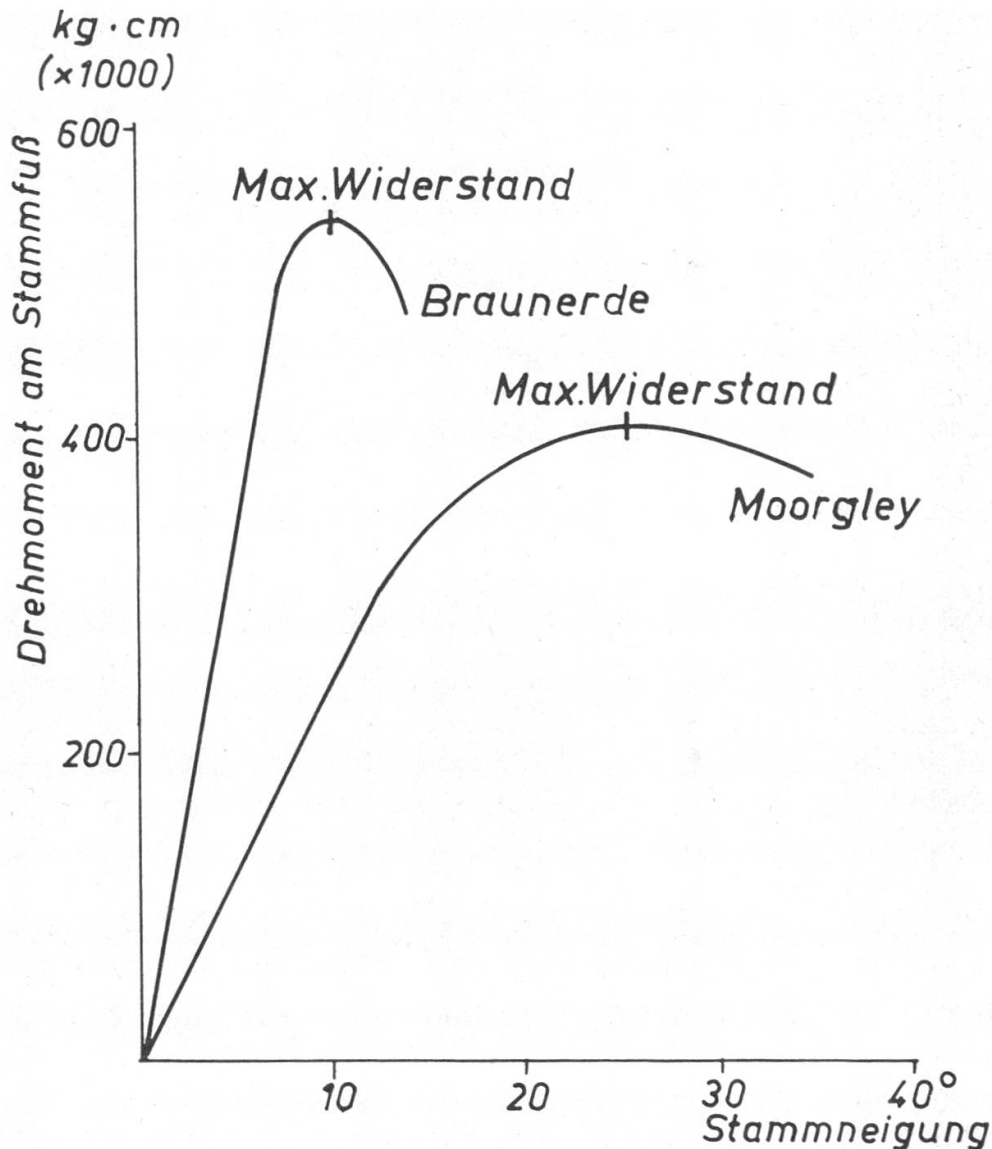


Abbildung 2. Zu- und Abnahme des Drehmoments beim Umziehen von Sitkafichten auf Braunerde und Moorboden über Pseudogley beim Erreichen bestimmter Stammneigungen. Nach Fraser und Gardiner, 1967. Das Drehmoment, das heisst der Druck auf den Stamm, nimmt mit der Stammneigung zu, erreicht ein Maximum und lässt mit der Entwurzelung wieder nach. Vom Ende der Kurven an fällt der Baum durch sein Eigengewicht zu Boden. Es bedarf dann keines weiteren Druckes mehr.

um den Punkt maximalen Widerstands zu erreichen und zu überwinden, so dass die Bäume wieder in ihre alte Lage zurückfedern. Sie neigen sich nur unter den Böen und richten sich beim Nachlassen des Drucks in kreisenden Bewegungen wieder auf. Je grösser jedoch die Amplitude dieser Schwingung wird, je weiter sich die schwere, regennasse Krone aus der Senkrechten nach Lee hinüberneigt, um so stärker werden der Zug auf das luvseitige und der Druck auf das leeseitige Wurzelsystem, um so grösser wird die Gefahr, dass die Wurzeln reissen oder knicken und der Stamm angekippt wird.

Diese Gefahr wird im dichten Bestand etwas dadurch gemildert, dass die Kronen aufeinanderprallen, da sich die Bäume je nach Schaftform und Winddruck verschieden rasch wieder aufrichten. Ein geschlossener Bestand hat also ein inneres Stützsystem, bei dem ein Baum den anderen auffängt. Dieses Stützsystem wird allerdings durch jede Durchforstung mehr oder weniger geschwächt. So fanden wir, dass in einem Douglasienbestand nach sehr starker Durchforstung die Schwingungsamplitude auf das Zwei- bis Dreifache der undurchforsteten Vergleichsfläche angestiegen war (*Mitscherlich*, 1970/71).

Auf das innere Stützsystem ist daher nur wenig Verlass, zumal gerade die vorherrschenden, über die Kronen der Nachbarn herausragenden Bäume, die dem stärksten Winddruck ausgesetzt sind, meistens keine geeigneten Nachbarn haben, die ihre Schwingungen abfangen könnten.

Diese Schwingungen werden dann besonders gefährlich, wenn der Bodenton- und schluffreich ist. Dann ist nämlich häufig zu beobachten, dass das Wasser mit dem Bodenbrei unter den leeseitigen Wurzeln hochgepresst wird und dass sich so bei länger andauerndem Schwingen langsam unter der leeseitigen Wurzelzone eine Vertiefung bildet. Der Baum unterminiert also durch seine Schwingungen in solchen Fällen sein eigenes Wurzelsystem. Die Sturmgefährdung nimmt damit rapide zu.

Ursache dieser gefährlichen Schwingungen ist natürlich der Druck bzw. der Sog der Sturmböen, die mit grosser Turbulenz, das heisst unter wechselnder Stärke und aus wechselnden Richtungen, auf die Kronen einwirken. Die Gefahr wird um so grösser sein, je grösser die Windgeschwindigkeit und je grösser die Kronenfläche ist, die sich dem Sturm entgegenstellt.

Wir sahen bereits, dass die Windgeschwindigkeit primär von dem Luftdruckgradienten zwischen dem Kern der Zyklone und ihrer Randzone abhängt. Die Windgeschwindigkeit ist jedoch nicht in allen Höhen über dem Boden gleich. Sie nimmt vielmehr wegen der Bodenreibung mit der Höhe nach einer logarithmischen Gleichung, dem sogenannten logarithmischen Windgesetz, zu. Dabei spielt die Rauigkeit der Bodenoberfläche eine erhebliche Rolle. Niedrige Bestände sind daher geringeren Windgeschwindigkeiten und damit auch einem geringeren Winddruck ausgesetzt als höhere Bestände.

Als Beispiel dafür zeigt Abbildung 3 das Ergebnis von Untersuchungen von *Simpson* (1967) an Sitkafichtenversuchsflächen aus Irland. Insgesamt handelt es sich um 152 Flächen, die in den letzten Jahren durch schwere Stürme stark dezimiert wurden. In der Abbildung ist über der Höhe als Abszisse der Prozentsatz an Flächen der jeweiligen Höhenstufe aufgetragen, die durch den Sturm zerstört wurden. Wie wir sehen, ergibt sich fast eine lineare Abhängigkeit zwischen Zerstörungsprozent, also der Sturmgefährdung, und der Bestandeshöhe. Bei 10 m Höhe waren alle Flächen noch intakt. Bei 15 m Höhe sind dagegen bereits 40 Prozent, bei 21 m Höhe 71 Prozent und bei mehr als 24 m Höhe alle Flächen vom Sturm geworfen worden.

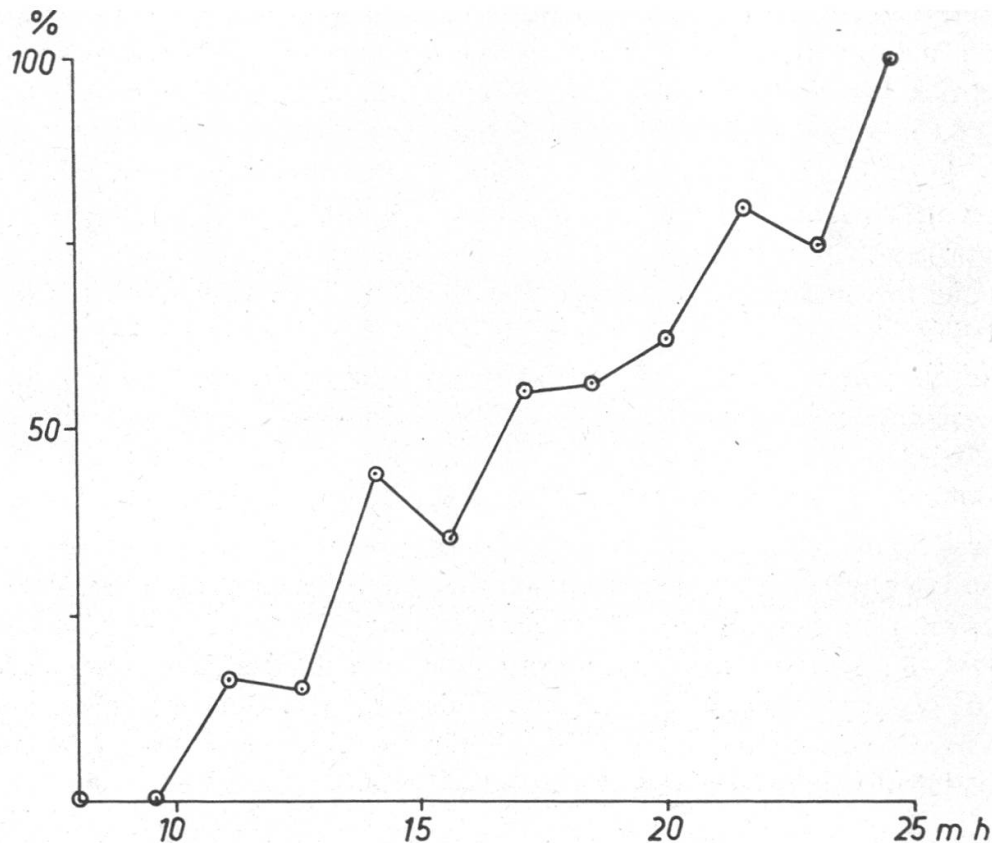


Abbildung 3. Prozentualer Anteil der vom Sturm geworfenen Sitka-Probeflächen in Nordirland. Nach Simpson, 1967.

Was die Grösse der Kronenfläche anbetrifft, die sich dem Sturm entgegenstellt, sind natürlich unsere Nadelschattbaumarten besonders ungünstig dran, denn sie sind in den Hauptsturmperioden Herbst und Frühling dicht und voll benadelt, während die Laubbäume in dieser Zeit kein Laub tragen. Stürme nach Laubausbruch, wie sie etwa am Fronleichnamstag 1968 herrschten, haben daher unter dem Laubholz ebenso starke Verheerungen angerichtet wie unter den Nadelbäumen. Daneben spielt auch die Kronenform eine gewisse Rolle. Spitzkronige Fichten aus höheren Gebirgslagen sind weniger gefährdet als die breitkronigen Herkünfte tieferer Lagen. Abbildung 4 zeigt als Beleg dafür das Ergebnis von Untersuchungen, die von Mlinšek (1973) in jugoslawischen Gebirgsforsten durchgeführt wurden und die deutlich die geringeren Biegemomente schmalkroniger Fichten bei gleicher Windgeschwindigkeit erkennen lassen.

Versucht man aus diesen Befunden die Folgerungen zu ziehen, so wird sich unser Augenmerk vor allem darauf zu richten haben, die Schwingungen der Bäume zu verringern.

Dazu ist zu bedenken, dass die Schwingung um so grösser sein wird, je kleiner der Durchmesser im Verhältnis zur Höhe ist. Dieses Verhältnis von

Durchmesser zu Höhe sei als Stabilitätsquotient bezeichnet. In Stangenhölzern finden wir häufig einen sehr niedrigen Stabilitätsquotienten von etwa 1 an, also Bäume, die bei 10 cm Durchmesser nicht mehr als 10 m Höhe haben. Der Quotient nimmt dann im Laufe des Bestandeslebens zu und erreicht in Altbeständen etwa den Wert 2, also zum Beispiel einen Durchmesser von 60 cm bei einer Höhe von 30 m. Derartige Bäume mit einer durchschnittlichen Durchmesserabnahme von 2 cm je Laufmeter sind bereits sehr viel weniger biegsam als Schäfte mit einer Durchmesserabnahme von nur 1 cm je Laufmeter.

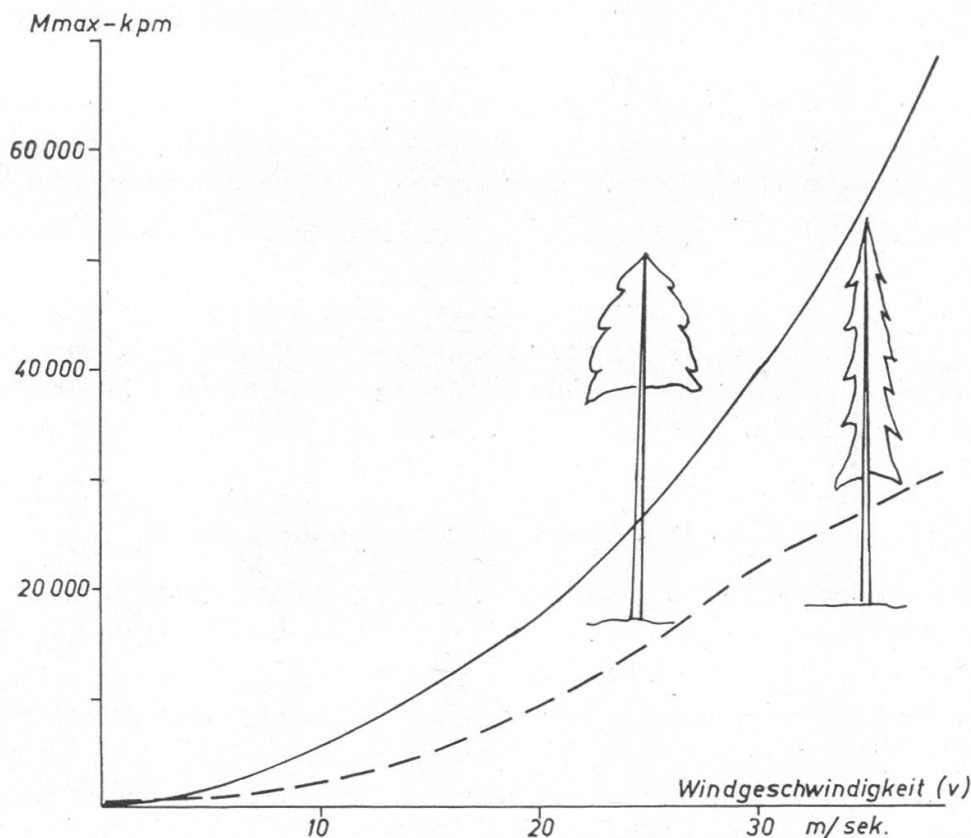


Abbildung 4. Winddruck in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit für breit- und schmalkronige Fichten. Nach Mlinšek, 1973. Schmalkronige Fichten sind bei gleicher Windgeschwindigkeit einem wesentlich geringeren Winddruck ausgesetzt als breitkronige.

Wir wissen jedoch aus Untersuchungen an Beständen der Küste, dass dort Stabilitätsquotienten von 3 bis 4 nicht selten sind. Denn durch die ständig starken Stürme wird das Höhenwachstum dort sehr viel stärker gebremst als das Dickenwachstum. Auch für Weidfeldbuchen und -fichten liegen ähnliche Zahlen vor.

Kürzlich machte *Brüning* (1974) darauf aufmerksam, dass die wunderbaren Sequoia-Bestände aus Kalifornien mit ihren Höhen von 100 m und

mehr sogar Stabilitätsquotienten von 5 haben, was als wesentlicher Faktor für ihre Sturmfestigkeit anzusehen sei. Ausserdem haben stärkere Bäume je Quadratzentimeter Grundfläche eine geringere Kronenmasse, sind also bruchfester, zumal der Biegungswiderstand im unteren Schaftteil mit der dritten Potenz des Brusthöhendurchmessers ansteigt.

Je stärker die Sturmgefährdung ist, desto mehr wird man also von Jugend an ein Anheben des Stabilitätsquotienten anstreben müssen. Begründung der Bestände im Weitverband von 5 bis 7 m und in den ersten Jahrzehnten immer wieder Durchforstungen, sobald sich die Kronen auch nur berühren, sind die geeigneten Hilfsmassnahmen dazu. Nur so wird man in sturmgefährdeten Lagen die Bestände auch von innen heraus sturmsicher machen können.

Damit wird in der Regel von selbst eine Verminderung des Höhenwachstums erreicht, denn Solitäre sind bekanntlich nie so hoch wie im geschlossenen Bestand erwachsene Bäume. Selbst unsere Fichten und Tannen im Plenterwald bleiben in der Höhe hinter solchen des gleichaltrigen Hochwalds merklich zurück.

Freilich haben derart erzogene Bäume meist sehr tief herabreichende Kronen und häufig damit eine grosse dem Sturm exponierte Kronenfläche. Sie kann durch Aufastung verringert werden. Darauf wird im folgenden nochmals zurückzukommen sein.

3. Die Gefährdung des Waldrands

Die besondere Situation von Waldrändern ist nur verständlich, wenn man die aerodynamischen Gegebenheiten kennt. Dazu sei in Abbildung 5 die Windgeschwindigkeit in Bodennähe in einem 600 m breiten Streifen des Affolter Waldes im Kanton Solothurn nach Messungen von *Nägeli* (1954) dargestellt. Wir ersehen daraus, dass bereits vor dem Waldrand, also links von dem Punkt 0 auf unserer Abbildung, die Windgeschwindigkeit auf etwa 60 Prozent der Freilandgeschwindigkeit absinkt. Das liegt daran, dass die Luftmassen sich vor dem Waldrand stauen. Direkt am Waldrand erkennen wir dann eine kleine Zunahme der Windgeschwindigkeit. Das ist der sogenannte Düseneffekt, der dadurch entsteht, dass sich die Luftmassen durch den verengten Querschnitt zwischen den schlecht durchforsteten Randbäumen pressen. Im Bestandesinnern nimmt dann die Windgeschwindigkeit rasch weiter ab, um bei dem Zehnfachen der Bestandeshöhe den niedrigsten Wert von etwa 5 bis 10 Prozent der Freilandwindgeschwindigkeit zu erreichen. Hinter dem Wald nimmt die Windgeschwindigkeit dann wieder sehr rasch zu.

Während die Abnahme der Windgeschwindigkeit vor dem Wald durch die Stauwirkung leicht zu erklären ist, ist die Abnahme im Wald selbst nicht ohne weiteres zu verstehen. Denn wie kann am Waldrand die Luft mit

3 m/sec eindringen, im Waldinneren aber nur mit 1 m/sec weiterziehen? — Das ist nur dann möglich, wenn man annimmt, dass ein Teil der in das Bestandesinnere eingedrungenen Luftmassen im Wald nach oben durch die Kronen abgedrängt wird.

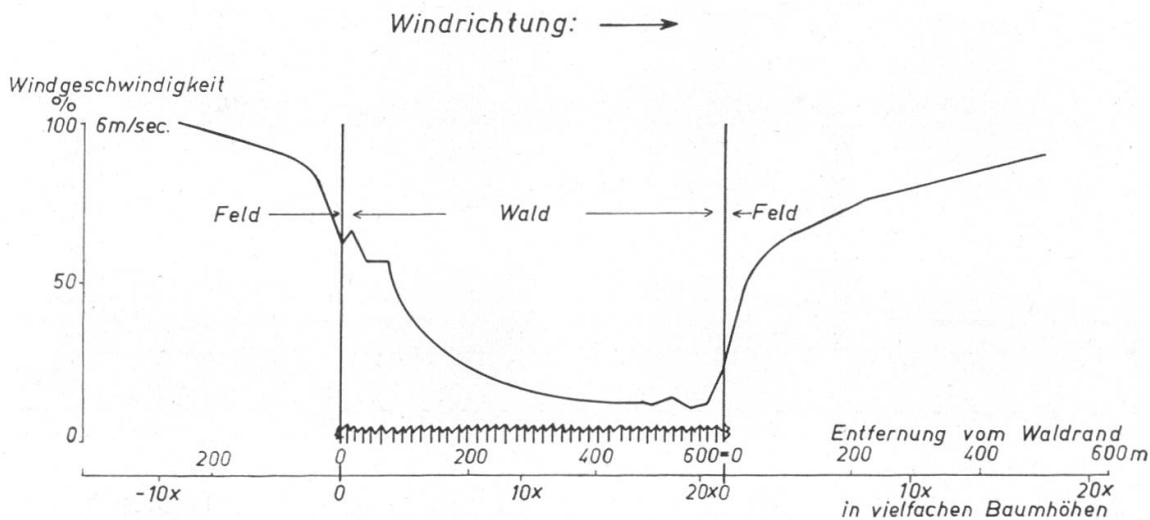


Abbildung 5. Windgeschwindigkeit in Bodennähe im Bereich des Affolterwaldes im Kanton Solothurn. Nach Nägeli, 1954. Der Wind staut sich vor dem Wald. Die Windgeschwindigkeit nimmt also schon vor dem Wald ab und geht im Inneren des Waldes noch weiter zurück. Am Waldrand erkennt man eine kleine Geschwindigkeitszunahme, die Düsenwirkung im Traufbereich.

Diese Darstellung der horizontalen Windgeschwindigkeit sei durch eine weitere Darstellung ergänzt (Abbildung 6), in der die Strömungslinien der Luft an einer Schilfrohrwand mit grosser Durchlässigkeit (oben) und einer dichten Wand (unten) gezeigt werden. Dieser Abbildung liegen Messungen der Windgeschwindigkeit von Nägeli zugrunde, die von Kaiser (1959) weiter verrechnet wurden.

Die Abbildung zeigt bei der lockeren Schilfrohrwand (oben) nur ein leichtes Anheben der Strömungslinien vor und besonders kurz hinter dem Hindernis. Bei der dichten Rohrwand (unten) aber wird die Luftströmung direkt am Hindernis steil nach oben abgelenkt, um dahinter wieder nach unten heruntergedrückt zu werden.

Während beim lockeren Hindernis somit nur ein kleiner Teil der Luftmassen über das Hindernis nach oben gleitet, ist es beim dichten Hindernis der weitaus überwiegende Teil.

Aus diesen Erkenntnissen ergibt sich für die Luftbewegung an einem dichten Waldrand eine Situation, wie sie in Abbildung 7 schematisch dargestellt ist.

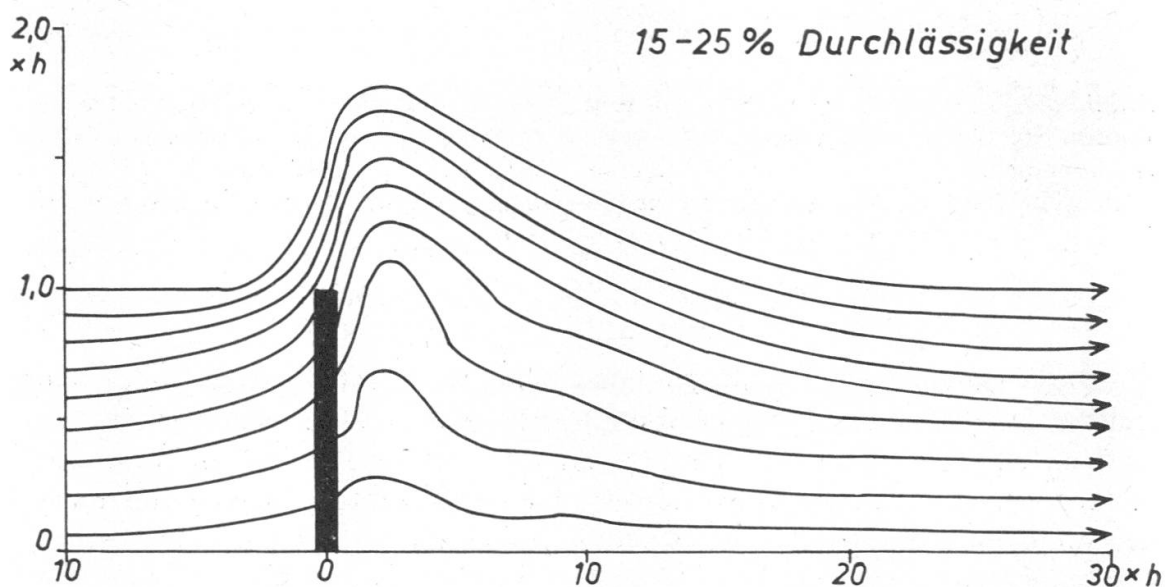
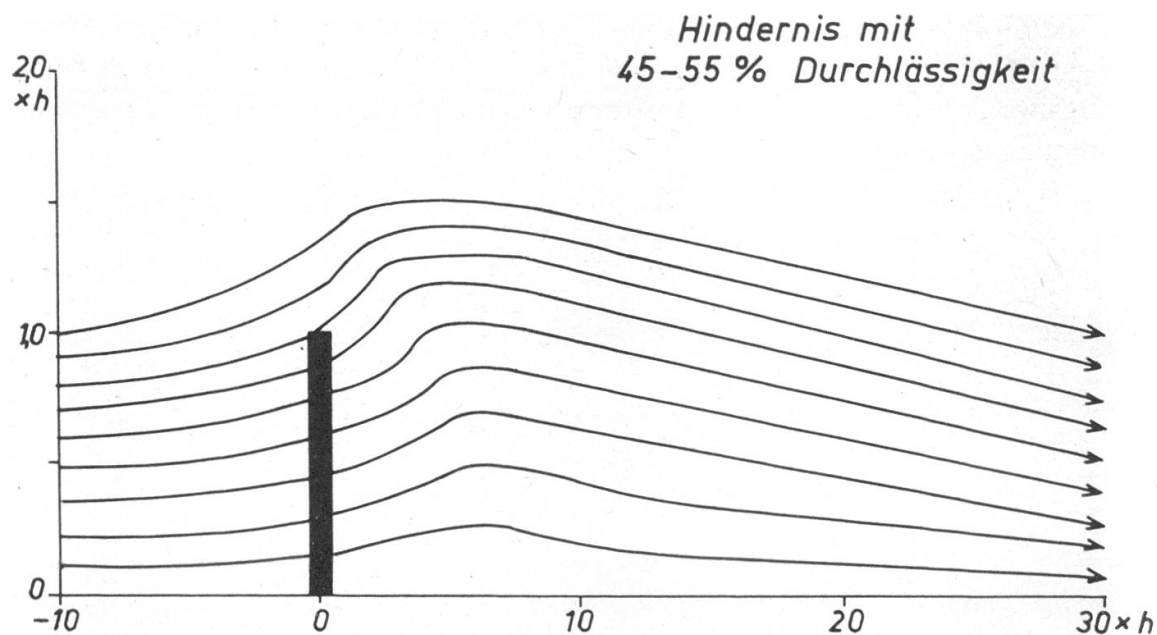


Abbildung 6. Strömungslinien an zwei Schilfrohrwänden verschiedener Dichte. Nach Kaiser, 1959. Bei den Schilfrohrwänden mit grosser Durchlässigkeit wird der Wind nur wenig nach oben abgelenkt. Bei dem dichten Hindernis (unten) werden die Luftmassen jedoch stark nach oben gedrängt und strömen hinter dem Hindernis wieder herab.

Die vom freien Feld her herbeigeführten Luftmassen stauen sich vor dem Waldrand. Nur ein kleiner Teil kann in den Wald eindringen, um dort weiterzuziehen oder im Wald nach oben abgelenkt zu werden. Der grössere Teil der Luftmassen wird vor dem Trauf nach oben gedrängt. Sie treffen im Bereich der Wipfel mit den in dieser Höhe vom Freiland mit grösserer Windgeschwindigkeit herbeigeführten Luftmassen zusammen. Durch diesen ver-

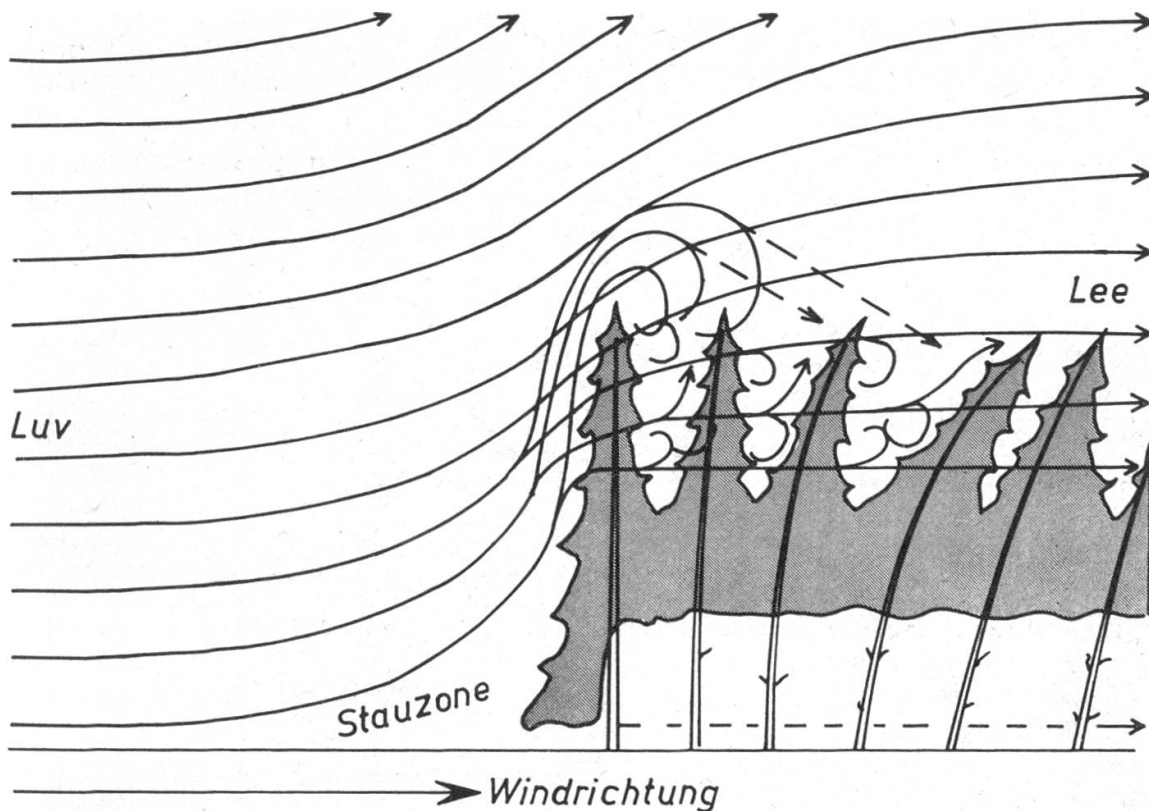


Abbildung 7. Schematische Darstellung der Strömungslinien an einem tiefbemanterten, geschlossenen Fichtentrauf. Nach Mitscherlich, 1973. Am Boden vor dem Trauf besteht eine Stauzone. Darüber gleiten die Luftmassen nach oben. Dicht hinter dem Trauf entstehen starke Wirbel, die zum Windwurf führen.

stärkten Andrang nimmt der Druck des Windes auf die Kronen der Randzone zu, und es kommt zu einer extrem heftigen Wirbelbildung. Dabei werden mit einzelnen Böen Luftmassen hoch nach oben geschoben, um erst weiter dahinter wieder auf die Kronen herabgedrückt zu werden.

Die Traufbäume selbst haben sich nun im Laufe ihres Lebens an diese Verhältnisse gewöhnen können. Sie sind entsprechend abholzig, häufig sogar unter Druckholzbildung auf der Leeseite, aufgewachsen. Ausserdem haben sich ihre Kronen einseitig zum Freiland hin entwickelt und ziehen die Traufbäume immer wieder gegen den Sturm zurück. Demgegenüber stehen die hinter den Traufbäumen stehenden Bäume der Randzone ohne jede Anpassung, nur durch die Randbäume geschützt, in dem Wirbel der Elemente. Sie werden von den aus verschiedenen Richtungen auf sie treffenden Böen heftig hin und her geworfen. Besonders schwer werden sie getroffen, wenn sie sich unter einer Bö nach Lee gebogen haben und dann schräg von oben herabdrängende Luftmassen sie zusätzlich, nun auf ihrer Kronenbreitseite auftreffend, zu Boden drücken.

(Dass wenige Reihen hinter einem dichtgeschlossenen Trauf besonders hohe Staudrucke vorkommen, wurde auch durch Windkanaluntersuchungen von Fraser [1964] festgestellt.) Das sind die Situationen, in denen der Bestand hinter dem Trauf zusammenbricht und nur die Traufbäume selbst erhalten bleiben, wie man es bei unzähligen Sturmkatastrophen beobachten kann (Abbildung 8). Ist der Einbruch des Sturms auf diese Weise erst einmal erfolgt, so ist das weitere Aufrollen des Bestandes oft nicht mehr aufzuhalten.



Abbildung 8. Sturmwurf in Oberschwaben 1967. Der Sturm kam von rechts über die freie Wiese, «übersprang» den Trauf und warf den dahinterliegenden Bestand (links).

Es stellt sich damit die Frage, wie dieser Ablauf zu verhindern ist. Dafür bietet die vorhin gezeigte Abbildung über die Strömungslinien bei verschiedener Hindernisdichte bereits den entscheidenden Anhaltspunkt: Man muss nämlich versuchen, den Waldrand möglichst locker zu gestalten und den Sturm möglichst tief in den Bestand eindringen zu lassen, so wie es in der schematischen Zeichnung (Abbildung 9) dargestellt ist. Dazu gehört eine im Weitverband begründete Waldrandzone, laufend scharfe Durchforstungen, wie sie schon zur Festigung des Einzelstamms beschrieben wurden, und eine möglichst hohe Aufastung in der Randzone. Dadurch wird der Luftstau vor dem Wald verringert. Die vom Freiland herbeigeführten Luftmassen werden dann nur noch zu einem geringen Teil am Trauf nach oben abgedrängt. Damit lassen wiederum die Wirbelbildung und der Druck auf die Kronen der Randzone nach. Die Verhagerung des Bodens kann man dabei leicht durch

den Anbau von Sträuchern verhindern, soweit der Boden nicht von selbst vergrast. Das unumgängliche Anheben der Luftmassen am Waldrand, das bisher nur direkt am Trauf erfolgte, vollzieht sich nunmehr in der ganzen Bestandesrandzone, die etwa 2 bis 3 Altholzlängen betragen sollte.

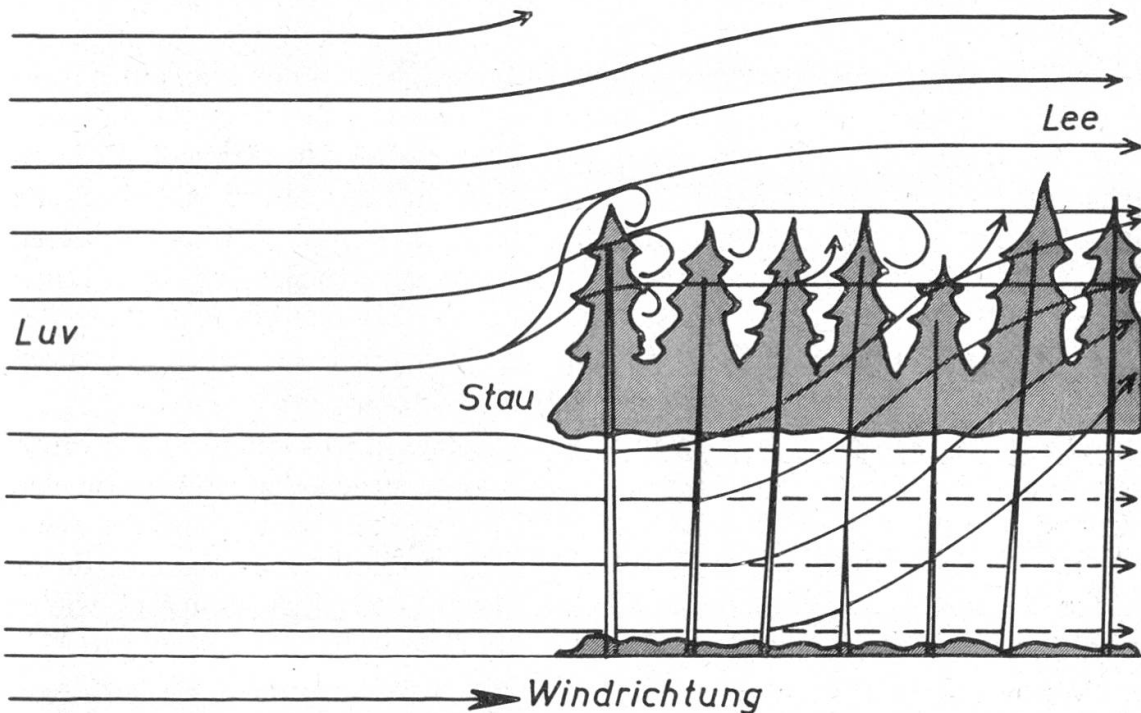


Abbildung 9. Schematische Darstellung der Strömungslinien an einem lockeren und aufgeästeten Fichtentrauf. Der Wind kann von unten in den Bestand eindringen und wird in seinem Inneren nach oben gedrängt und über dem Kronendach mitgerissen. Die Wirbelbildung hinter dem Trauf ist viel geringer und die Windwurfgefahr daher stark herabgesetzt.

Dieses Prinzip ist so einleuchtend und so simpel, dass es eigentlich unverständlich ist, dass es nicht schon längst in die forstliche Praxis Eingang gefunden hat. Freilich setzt es voraus, dass man die Aufgabe der Bestandesrandzone in erster Linie in der Betriebssicherung des Waldes und erst in zweiter Linie in der Holzproduktion sieht. Und es setzt ferner voraus, dass mit der weitständigen Erziehung der Randzonenbäume von der Bestandesbegründung an begonnen wird. Denn wenn der Bestand erst einmal eine Höhe von 5 m überschritten hat, ist die notwendige Freistellung der Einzelbäume meist nicht mehr ohne Risiko durchführbar.

Im übrigen braucht man keine Angst davor zu haben, mit diesen Massnahmen die Attraktivität der Waldränder für die Waldbesucher herabzumindern. Ein locker aufgebauter Waldrand, dessen Boden von Gras überzogen und ab und an durch ein paar Sträucher geschützt wird, bietet für die Besucher viel reizvollere Liege- und Spielplätze, als es ein dichtgeschlossener Fichtentrauf jemals kann!

4. Die Gefährdung des Bestandesinneren

Bisher hat man versucht, die Bestände durch geschlossene Träufe und durch den Deckungsschutz vorgelagerter Bestände vor dem Sturmbruch zu schützen. Die damit gemachten Erfahrungen sprechen nicht für diese Methoden. Die Nachteile dichter Träufe wurden schon bei der Besprechung der Waldränder dargelegt. Der Deckungsschutz ist zwar etwas günstiger zu beurteilen, aber man findet nur selten dafür geeignete Altersklassenlagerungen vor. Sie künstlich herbeizuführen kostet meist erhebliche Hiebsopfer. Ausserdem aber gibt es immer irgendwo in den Beständen Nassgallen, flachgründige Partien oder Blitzlöcher, von denen aus der Sturm die Bestände aufrollen kann, ganz abgesehen von den vielen stammfaulen Bäumen, deren Bruch oder Wurf in gleicher Weise zur Zerstörung der Bestände von innen heraus führt, wie *Bazzigher* und *Schmid* (1969) bei der Untersuchung der Sturmschäden in der Schweiz eindringlich nachgewiesen haben. Dagegen nützt auch ein vorgelagerter, niedrigerer Bestand nichts.

Die Sturmsicherung der Bestände muss vielmehr von innen heraus erfolgen. Wir müssen auch im Waldbau beim Kampf gegen den Sturm von den Methoden geschlossener Landsknechtfähnlein, wie sie im 15. und 16. Jahrhundert üblich waren, das heisst vom Deckungsschutz eines Baumes durch seinen Nachbarn, abkommen und zu dem Prinzip des Einzelkämpfers, wie er in unserem Jahrhundert entwickelt wurde, übergehen.

Wenn unsere Bestände sturmfest werden sollen, müssen sie also von vornherein im Weitverband aufwachsen, so dass jeder Stamm die Möglichkeit hat, sich dem Winddruck anzupassen. Dann müssen rechtzeitig kräftige Durchforstungen folgen, so dass die Anpassung nicht wieder verlorenght. So wird verhältnismässig früh, das heisst bei Höhen von vielleicht 20 bis 23 m, die Endstammzahl von 400 bis 700 Bäumen erreicht werden können. Ist das der Fall, dann sollte man allerdings nur noch in Ausnahmefällen in die Bestände eingreifen. Denn nun kommt es darauf an, dass sich das bis dahin stark gestaffelte und damit besonders rauhe Kronendach glättet und sich nach und nach vorhandene Lücken schliessen. Denn je ebener und glatter das Kronendach ist, um so weniger wird der Sturm darin Angriffspunkte finden, um so geringer wird die Wirbelbildung sein. Ausserdem sollen die in sich gefestigten Stämme nun auch zusätzlich von der gegenseitigen Stützwirkung Gebrauch machen können. Der Bestand, so erzogen, kann dadurch nur an Stabilität gewinnen. Schliesslich ist bekannt, dass gerade die Fichte in der zweiten Hälfte der Umtriebszeit den besten Zuwachs leistet, wenn die Bestände geschlossen sind. Nachdem das erreichbare Höchstmass an Betriebssicherheit gewonnen ist, sollte man daher nun die Zuwachsmöglichkeiten so gut ausnutzen, wie es nur geht.

Résumé

Risques de dégâts d'ouragan et mesures préventives

Les risques de chablis sont particulièrement grands en automne et au printemps, lorsque la teneur en eau du sol est élevée. Ils sont par contre relativement réduits dans les mois plutôt secs de l'été ainsi que durant l'époque du gel hivernal. Le risque auquel est exposé individuellement l'arbre est restreint lorsque l'enracinement est profond. C'est moins par leur fonction d'appui que par le poids de la portion de sol qu'elles enserrant — pouvant atteindre un multiple de celui de la tige — que les racines assurent la stabilité de l'arbre. Le risque augmente proportionnellement à la hauteur de l'arbre; il est le plus grand chez les tiges à larges houppiers et dont le rapport du diamètre à la hauteur est réduit, qui ploient fortement sous le vent. Les lisières imperméables dévient les masses d'air vers le haut, donnant naissance à des turbulences extrêmement violentes, qui sont fréquemment à l'origine de chablis dans les zones attenantes. Pour diminuer ce risque, il faut d'une part délester les houppiers en permettant aux masses d'air de pénétrer dans une large mesure à l'intérieur des boisés, augmenter d'autre part la stabilité des tiges du peuplement en élevant leur coefficient de décroissance: des mesures appropriées sont de grands espacements à la plantation, des éclaircies soutenues et fortes et l'ébranchage systématique dans les zones de lisières. Le nombre des tiges ne devrait pas dépasser 400 à 700 lorsque le peuplement atteint une hauteur de 20 à 23 mètres; les éclaircies devraient alors être interrompus afin que la couverture des houppiers puisse à nouveau se fermer et s'égaliser. Ces mesures permettent à la fois d'atteindre une grande stabilité du peuplement et une productivité élevée.

Traduction: J.-F. Matter

Literatur

- Bazzigher, G. und Schmid, P., 1969: Sturmschäden an Fichte. Schweiz. Zeitschr. f. Forstwesen 120: 1—15
- Braun, H. J., 1974: Zur Sauerstoffabhängigkeit des Wachstums von Fichten im Bodenraum. AFJZ. Im Druck
- Brüning, E. F., 1974: Das Risiko in der forstlichen Funktionenplanung, dargestellt am Beispiel der Sturmgefährdung — Möglichkeiten der gleichzeitigen Optimierung von Rohstoff-, Einkommens- und Sozialfunktionen. AFJZ. Im Druck
- Fraser, A. I., 1964: The soil and roots as factors in tree stability. Forestry 35: 117—127
- Fraser, A. I., 1964: Wind tunnel and other related studies on coniferous trees and tree crops. Scott. Forestry 18: 84—92

- Fraser, A. I., und Gardiner, J. B. H., 1967: Rooting and stability in Sitka spruce For. Comm. Bull. No. 40*
- Kalela, E., 1957: Über die Veränderungen in den Wurzelverhältnissen der Kiefernbestände im Laufe der Vegetationsperiode. Acta Forestalia Fennica 65: 1—42*
- Kaiser, H., 1959: Die Strömung an Windschutzstreifen. Ber. Dt. Wetterdienst 53: 1—36*
- Leibundgut, H., 1969: Erhöht eine starke Durchforstung die Windwurfgefahr? Schweiz. Zeitschr. f. Forstwesen 120: 110—112*
- Mitscherlich, G., 1970/71: Wald, Wachstum und Umwelt. J. D. Sauerländer's Verlag Frankfurt*
- Mitscherlich, G., 1973: Wald und Wind. AFJZ 144: 74—81*
- Mlinšek, D., 1973: Möglichkeiten der Ertragssteigerung im subalpinen Fichtenwald. 100-Jahr-Feier Hochschule f. Bodenkultur, Wien, IV: 51—70*
- Nägeli, W., 1954: Windbremsung durch einen grossen Waldkomplex. IUFRO 1953: 240—246*
- Simpson, A., 1967: Relation between windthrow at top height at Baronscourt forest. The Forester 8: 31—33*
- Trendelenburg, R., 1939: Das Holz als Rohstoff. Verlag Lehmann, München*

Abbildung 1. Nur 13 Kilometer liegt dieses einzigartige und recht urtümliche Hochtal von der Stadt Luzern entfernt. Die Regionalplanung hat deshalb das Eigenthal, das bereits durch die kantonale Verordnung vom 12. Oktober 1967 geschützt ist, als regionalen Erholungsraum vorgeschlagen. (Photo: Fritz Kehrer, Kriens)

