



Projekt Sturmstabilität

Verfahren zur Bestimmung der Sturmstabilität von Waldbeständen
als Basis für die Schadenprävention

Forschungsprojekt
Schlussbericht

Michael Götz und Hubertus Schmidtke

Oktober 2006
SILVA CONSULT AG
Neustadtgasse 9
8402 Winterthur

Unterstützt durch die Kantone Luzern, Thurgau und Zürich sowie durch
den Fonds zur Förderung der Wald- und Holzwirtschaft

Finanzierung: Waldabteilungen der Kantone Zürich, Luzern und Thurgau
SILVACONSULT AG CH-8402 Winterthur
Fonds zur Förderung der Wald- und Holzwirtschaft

Titelbild: Schaden nach Sturm Lothar (Dez. 1999). Lehrrevier ETH Zürich,
südlich der Uetlibergbahnhaltestelle Waldegg. Flug vom 8.1.
2000. © SILVACONSULT AG.

Die Autoren

Michael Götz
Dr. Hubertus Schmidtke

SILVACONSULT AG
Neustadtgasse 9
Postfach 184
CH-8402 Winterthur
www.silvaconsult.ch
Tel. ++41(0)52 214 0265

VORWORT

Nach den verheerenden Sturmschäden in Folge der Winterstürme „Vivian“ und „Lothar“, wurde in der Schweiz und im benachbarten Ausland vertieft nach den Ursachen geforscht. Auf der Grundlage von eigenen Forschungsergebnissen¹ und Literaturlauswertungen entstand die Idee, die gewonnen Erkenntnisse aufzubereiten und für die forstliche Praxis nutzbar zu machen. In der Folge entwickelte die SILVACONSULT AG in Winterthur ein Verfahren zur Beurteilung der Sturmstabilität von Waldbeständen, als Grundlage für die Schadenprävention.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde dieses Verfahren technisch umgesetzt. Für das Verfahren war kennzeichnend, dass nur bereits vorhandene digitale Daten in einem geografischen Informationssystem (GIS) ausgewertet wurden.

Als Projektpartner konnten die für den Wald zuständigen Stellen der Kantone Luzern, Thurgau und Zürich gewonnen werden. Finanziell wurde das Projekt zudem massgeblich durch den Fonds zur Förderung der Wald- und Holzwirtschaft unterstützt.

Die Entwicklung und technische Umsetzung des Verfahrens wurde von projekt-externen Experten begleitet. Für die fachliche Unterstützung und Beratung möchten wir uns besonders bei Prof. Dr. Jean Philippe SCHÜTZ (ETH), Dr. Matthias DOBBERTIN (WSL), Tilo USBECK (WSL), Dr. Eberhard ALDINGER (FVA Baden-Württemberg) und Dr. Dieter SEEMANN (FVA Baden-Württemberg) bedanken. Von Seiten des Fonds war Prof. Dr. Hans Rudolf HEINIMANN (ETH) für die Betreuung des Projektes zuständig.

Die LIDAR- und Luftbilddaten wurden in sehr guter Zusammenarbeit mit Dr. Prof. Mathias SCHARDT und Ing. Roland WACK am JOANNEUM RESEARCH in Graz (A), analysiert und ausgewertet.

Für die Beratungen im GIS Bereich bedanken wir uns bei Andreas LIENHARDT, GIS Verantwortlicher, Fachstelle Naturschutz, Amt für Landschaft und Natur, der Baudirektion des Kantons Zürich.

¹ SCHÜTZ , GÖTZ et. al. (2006); SCHÜTZ & GÖTZ (2003); SCHMIDTKE & SCHERRER (1997);

INHALT

VORWORT.....	II
INHALT	III
TABELLEN UND ABBILDUNGEN	V
ZUSAMMENFASSUNG	VI
ABKÜRZUNGEN UND FACHBEGRIFFE.....	VII
1 EINLEITUNG	1
1.1 EINFÜHRUNG INS THEMA	1
1.2 FORSCHUNGSANSATZ	2
1.3 ZIELSETZUNG DER ARBEIT.....	4
2 MATERIAL UND METHODEN	5
2.1 AUSGANGSLAGE	5
2.2 RAHMENBEDINGUNGEN	5
2.3 VERSUCHSFLÄCHEN.....	6
2.4 DATENERHEBUNG UND -AUFBEREITUNG.....	7
2.5 HERLEITUNG DER MODELLVARIABLEN (STABILITÄTSFAKTOREN).....	8
2.5.1 <i>Oberhöhe</i>	9
2.5.2 <i>Mischungsgrad (Nadelholzanteil)</i>	9
2.5.3 <i>Bestandesstruktur</i>	9
2.5.4 <i>Deckungsgrad</i>	9
2.5.5 <i>Äussere Ränder</i>	9
2.5.6 <i>Innere Ränder</i>	9
2.5.7 <i>Kronenlänge</i>	12
2.5.8 <i>Bodensäure</i>	12
2.5.9 <i>Geländewasserhaushalt</i>	12
2.5.10 <i>Geländeexponiertheit</i>	13
2.5.11 <i>Exposition</i>	13
2.5.12 <i>Geländeneigung</i>	13
2.6 MODELLIERUNG DER STURMSTABILITÄT IM GIS.....	13
2.6.1 <i>Übersicht</i>	13
2.6.2 <i>Verrechnung, Gewichtung und Klassierung</i>	15
2.7 ÜBERPRÜFUNG DER MODELLIERTEN RESULTATE	16
2.7.1 <i>Bestandesdaten</i>	16
2.7.2 <i>Standortsdaten</i>	17
2.7.3 <i>Bestandes-, Standort- und Sturmstabilität</i>	17
2.8 STATISTISCHE AUSWERTUNGEN.....	17
2.9 DURCHFÜHRUNG DER ARBEITEN	17
2.9.1 <i>Beteiligte Personen</i>	18
3 ERGEBNISSE.....	19
3.1 STURMSTABILITÄTSFAKTOREN	19
3.1.1 <i>Innere Ränder (Variantenvergleich LIDAR – DOM)</i>	19
3.1.2 <i>Geländeexponiertheit (Topex)</i>	22
3.1.3 <i>Andere Stabilitätsfaktoren</i>	24

3.2	STABILITÄT BESTANDESFAKTOREN (BESTANDESSTABILITÄT)	26
3.3	STABILITÄT STANDORTSFAKTOREN (STANDORTSTABILITÄT)	30
3.4	STURMSTABILITÄT (GESAMTSTABILITÄT)	34
3.5	VALIDIERUNG DER STABILITÄTSKARTEN	37
3.6	ZEITAUFWAND	39
4	DISKUSSION.....	41
4.1	STURMSTABILITÄTSMODELL	41
4.2	GRENZEN DES MODELLS	42
4.3	TECHNISCHE UMSETZUNG	43
4.3.1	<i>Stabilitätsfaktoren</i>	43
4.3.2	<i>Schwierigkeiten der technischen Umsetzung</i>	45
4.4	VALIDIERUNG	45
4.5	ZIELERREICHUNG	45
4.6	KOSTEN DES VERFAHRENS.....	46
4.6.1	<i>Kosten der Grundlagendaten</i>	46
4.6.2	<i>Kosten der technischen Umsetzung</i>	46
4.7	KOSTEN – NUTZEN BETRACHTUNGEN.....	47
4.8	HEMMNISSE FÜR DIE UMSETZUNG	47
5	AUSBLICK.....	49
5.1	ANWENDUNG DES VERFAHRENS AUF GROSSEN FLÄCHEN.....	49
5.2	PRÄVENTION	50
5.3	WEITERENTWICKLUNG VERFAHREN.....	50
5.4	WEITERENTWICKLUNG DATENERHEBUNG	51
5.5	ABSCHLIESSENDE BETRACHTUNGEN	52
6	LITERATUR- UND QUELLENVERZEICHNIS.....	53

TABELLEN UND ABBILDUNGEN

Tabellen

Tab. 1: Sturmstabilitätsfaktoren.....	5
Tab. 2: Verwendete Datensätze und Quellenangaben	8
Tab. 3: Merkmale, Datenquellen und Nutzung der Daten.....	8
Tab. 4: Stabilitätsklassierung Bestand und Standort	15
Tab. 5: Variantenvergleich „Innerer Ränder“, Perimeter Embrach	21
Tab. 6: Eignung verschiedener Ausgangsdaten zur Detektion von Rändern	21
Tab. 7: Bestandesstabilität. Flächenanteile nach Stabilitätsklassen.....	26
Tab. 8: Standortstabilität. Flächenanteil nach Stabilitätsklassen	30
Tab. 9: Sturmstabilität. Flächenanteil nach Stabilitätsklassen	34
Tab. 10: Stabilitätswert einer Zelle für Standort und Bestand.....	34
Tab. 11: Sturmstabilität: Flächenanteile nach Klassen für die detaillierte (Raster) und generalisierte (Bestände) Ebene, Ausschnitt Embrach.....	37
Tab. 12: Kosten und Gültigkeit der verwendeten Grundlagendaten	46

Abbildungen

Abb. 1: Übersicht über das Sturmstabilitätsverfahren.....	3
Abb. 2: Perimeter Embrach. PK25	6
Abb. 3: Perimeter Knonaueramt. PK50	7
Abb. 4: LIDAR-Daten und Orthophoto	10
Abb. 5: Schematischer Ablauf der Modellierungen im GIS	14
Abb. 6: Matrix zur Bestimmung der Gesamtstabilität	16
Abb. 7: Ränder Variante A (LIDAR/Orthophotos)	20
Abb. 8: Ränder Variante B (Bestandeshöhe/LIDAR)	20
Abb. 9: Regressionsfunktion Topex2000 und Lotharsturmschäden. Embrach.....	22
Abb. 10: Regressionsfunktion Topex2000 und Lotharsturmschäden. Knonaueramt	22
Abb. 11: Häufigkeitsverteilung Topex2000 hergeleitet aus DHM25. Embrach.....	23
Abb. 12: Häufigkeitsverteilung Topex2000 Perimeter Knonaueramt	23
Abb. 13: Sturmstabilitätsfaktoren auf Rasterebene (Ausschnitt Embrach)	25
Abb. 14: Häufigkeitsverteilung der Stabilitätswerte für Bestände mit $h_{dom} > 15m$, Embrach	26
Abb. 15: Häufigkeitsverteilung der Stabilitätswerte für Bestände mit $h_{dom} > 15m$, Knonaueramt....	27
Abb. 16: Karte Bestandesstabilität Embrach.....	28
Abb. 17: Karte Bestandesstabilität Knonaueramt	29
Abb. 18: Häufigkeitsverteilung der Stabilitätswerte für den Standort, Embrach	30
Abb. 19: Karte Standortstabilität Embrach	31
Abb. 20: Häufigkeitsverteilung der Stabilitätswerte für den Standort, Knonaueramt	32
Abb. 21: Karte Standortstabilität Knonaueramt.....	33
Abb. 22: Karte Sturmstabilität Embrach	35
Abb. 23: Karte Sturmstabilität Knonaueramt	36
Abb. 24: Sturmstabilität auf Bestandesebene (generalisiert)	38
Abb. 25: Sturmstabilität auf Bestandesebene (detailliert)	38
Abb. 26: Projektablauf	40

ZUSAMMENFASSUNG

Das von der SILVACONSULT AG entwickelte Verfahren zur Bestimmung der Sturmstabilität von Waldbeständen wurde im Rahmen eines Pilotprojektes technisch umgesetzt. Das Verfahren basiert auf einem Widerstandsmodell, das vorgängig zum vorliegenden Projekt entwickelt worden war. Bestandes- und Standortsfaktoren wurden jeweils bezüglich ihrer Bedeutung für die Sturmstabilität in Klassen eingeteilt und untereinander gewichtet. Neben den Daten der digitalen Bestandes- und Standortskarten wurden Gelände- und Oberflächenmodelle verwendet. Insbesondere die Ableitung von Steilrändern und Bestandeslücken mit Hilfe von LIDAR Daten für diesen Zweck war neu und brachte sehr gute Ergebnisse. Auf zwei Testgebieten im Kanton Zürich mit zusammen 1'720 ha Wald wurde das Verfahren angewandt. Das Modell hat sich als tauglich und robust erwiesen. Die Operationalität des Verfahrens wurde unter Beweis gestellt. Als Resultat liegen digitale Sturmstabilitätskarten als Basis für die Schadenprävention vor. Wesentliche Kennzeichen des Verfahrens waren, dass nur mit existierenden Daten gearbeitet wurde, und dass das Verfahren über grosse Flächen weitgehend automatisiert angewandt wurde.

ABKÜRZUNGEN UND FACHBEGRIFFE

A	Österreich
Abb.	Abbildung
Abt.	Abteilung
AHP	Analytic Hierarchy Process
BABS	Bundesamt für Bevölkerungsschutz
BAFU	Bundesamt für Umwelt
Beaufort	Einteilung der 1805 von dem irischen Hydrographen Francis Beaufort entwickelten Skala zur Abschätzung der Windgeschwindigkeit
BUWAL	Bundesamtes für Umwelt, Wald und Landschaft (heute BAFU)
©	Copyright
CMD-Modus	Command-Modus (DOS-ähnlich)
CPU	Central Processing Unit (Hauptprozessor)
D	Deutschland
DHM	Digitales Höhenmodell (Terrainmodell)
Diss.	Dissertation
DOM	Digitales Oberflächenmodell
nDOM	normalisiertes digitales Oberflächenmodell
DTM	Digitales Terrainmodell (Geländemodell)
ETH	Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Em.	Emeritiert
FVA	Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg (D)
Forsting.	Forstingenieur
GIS	Geografisches Informationssystem
h_{dom}	Oberhöhe
Kap.	Kapitel
Ing.	Ingenieur
k.o. Kriterium	Knockout Kriterium, das direkt zu einer bestimmten Klassierung führt.
LIDAR	Laserscanning (Light Detection and Ranging)
®	Eingetragene Marke
RAM	Random Access Memory (Arbeitsspeicher)
Red.	Redaktion
RR	Restrisiko
Swisstopo	Bundesamt für Landestopografie
Tab.	Tabelle
Var.	Variante
WEP	Waldentwicklungsplanung
WaG	Waldgesetz (SR 921.0)
WSL	Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft

1 EINLEITUNG

1.1 Einführung ins Thema

Wälder sind unterschiedlich stabil gegenüber Stürmen. Sturmschäden können erhebliche ökonomische Konsequenzen für Forstbetriebe haben. Das Schadholz selbst ist oftmals von minderer Qualität (z. B. bei Bruch). Grössere Schadenereignisse führen zu einem Überangebot an Holz auf dem Markt und zu einem drastischen Preiszerfall.

In der Schweiz ist die Sturmschadensforschung mit dem Abschluss des Lothar Grundlagenprogramms des Bundes (INDERMÜHLE et. al. 2005), von wenigen Ausnahmen² abgesehen, zum Stillstand gekommen. Eine Aufbereitung der Grundlagenforschung für die forstliche Praxis im Sinne einer Sturmrisiko- oder Stabilitätsmodellierung auf der Ebene von Waldbeständen fehlt oder ist nur in Ansätzen verwirklicht³.

Die wichtigsten Faktoren, die die Widerstandsfähigkeit der Wälder gegen Stürme beeinflussen, sind heute aus der Forschung bekannt⁴. In der Schweiz fehlt jedoch ein standardisiertes Verfahren zur automatisierten Beurteilung der Sturmstabilität von Wäldern. Wenn die Förster die Sturmstabilität respektive die Gefährdung von Waldbeständen und deren Ursachen kennen, so sind sie in der Lage, mit waldbaulichen Massnahmen auf eine Erhöhung der Stabilität hinzuarbeiten oder Prioritäten in der Nutzung zu setzen.

Unter Sturmstabilität wird dabei die mechanische Widerstandsfähigkeit hinsichtlich der Einwirkung von Stürmen verstanden. Stürme sind hier winterliche Frontensysteme mit vorherrschender Windrichtung aus Westen und Windgeschwindigkeiten zwischen 75 und 117 km/h (Windstärken 9 bis 11 Beauforts). Insbesondere in diesem Bereich ist das Schadenausmass abhängig von den Standorts- und Bestandeseigenschaften.

In Grossbritannien (DUNHAM et al. 2000) und Skandinavien (PELTOLA et al. 1998) setzt man seit einigen Jahren computergestützte Risikoanalysemodelle ein. Diese eignen sich jedoch nicht für die viel differenzierteren Bestandes- und Topografieverhältnisse in Mitteleuropa.

² Z.B. die aktuelle Dissertation von Tilo USBECK (WSL), die Dissertation von Pierre VANOMSEN (2006) und die Arbeit von Paula CASALS (2005).

³ Z.B. im Rahmen des Schweizerischen Landesforstinventars, LFI (KELLER M. 2005; HEROLD & ULMER 2001) oder dem Projekt „Nachhaltigkeit und Erfolgskontrolle im Schutzwald“, NaiS (FREHNER et al. 2005).

⁴ Z. B.: SCHÜTZ, GÖTZ et. al. (2006); SCHÜTZ & GÖTZ (2003); SCHMIDTKE & SCHERRER (1997); HOLENSTEIN (2002); MAYER (1985); DVORAK & BACHMANN (2001); REDDE (2002); DOBBERTIN (2002); HAAS & BACHOFEN (1991); BOCK et al. (2002); LOHMANDER & HELLES (1987); HÜTTE (1967); MAYER et al (2004).

Die Schwierigkeit bei der Entwicklung solcher Expertensysteme liegt vor allem in der Einschätzung der meteorologischen Variablen, die sich in Abhängigkeit des Reliefs stark verändern können. Auch in den Nachbarländern der Schweiz wurden verschiedene Stabilitäts- und Risikomodelle entwickelt⁵, die jedoch nur regionale Gültigkeit haben.

Nach einer Analyse der Bedürfnisse von Kantonen und forstlichen Praktikern hat die SILVACONSULT AG ein **Verfahren** zur Beurteilung der Sturmstabilität von Waldbeständen in der Schweiz entwickelt.

Von Bedeutung für das Verfahren und von grossem Vorteil ist, dass keine neuen Daten erhoben werden müssen, sondern dass nur bereits vorhandene Daten verwendet und unter einem neuen Aspekt ausgewertet werden. Digitale Bestandeskarten, Standortkarten, Oberflächen- und Geländemodelle existieren in den meisten Kantonen bereits. Damit können diese Daten einem weiteren Nutzen zugeführt werden.

1.2 Forschungsansatz

Das entwickelte Verfahren basiert auf einem (Widerstands-) **Modell**, das die sturmrelevanten Stabilitätsfaktoren benennt, klassiert und entsprechend ihrer Bedeutung gewichtet (Abb. 1). Bestandes- und Standortmerkmale werden zunächst separat angesprochen, dann zu einer Gesamtstabilität zusammengeführt. Das Verfahren ist transparent. Es lässt sich nachvollziehen, ob die Zuordnung zu einer Stabilitätsklasse mehr auf den Standort oder den Bestand (Bestockung) zurückzuführen ist und welche Faktoren ausschlaggebend sind. Daraus lassen sich dann Ansatzpunkte für die Präventionsstrategie und Massnahmenplanung ableiten.

Die **Gewichtungen** der sturmrelevanten Faktoren basieren auf Auswertungen der aktuellen Literatur⁶ ergänzt um Expertenmeinungen⁷. Die Gewichtungen wurden hergeleitet durch den paarweisen Vergleich mit der Methode „Analytic Hierarchy Process“ (AHP) nach Thomas Saaty (SAATY 1980). Diese Methode erlaubt auch einen Test auf Konsistenz der Gewichtungen. Die Gewichtungen können je nach Situation den regionalen und örtlichen Gegebenheiten angepasst werden. Damit ist gewährleistet, dass man das Modell über weite Gebiete anwenden kann.

⁵ Z. B.: ROTTMANN (1986), KÖNIG (1995), VITÉ (1951), MAYER (1988), MARSCH (1989), NOPP (1999), MÜLLER (2002), BOCK & DUPLAT (2004), SCHMIDT et al. (2005).

⁶ Insbesondere der Winterstürme von 1967, 1990 (Vivian/Wiebke) und 1999 (Lothar/Martin) aus der Schweiz, Süddeutschland und Nordfrankreich (ähnliche Standorts- und Bestandeseigenschaften).

⁷ Prof. em. Dr. Jean Philippe Schütz (ETH-Zürich), Dr. Eberhard Aldinger (FVA, Baden Württemberg), Dr. Dieter Seemann (FVA, Baden Württemberg), Dr. Matthias Dobbertin (WSL), Tilo Usbeck (WSL).

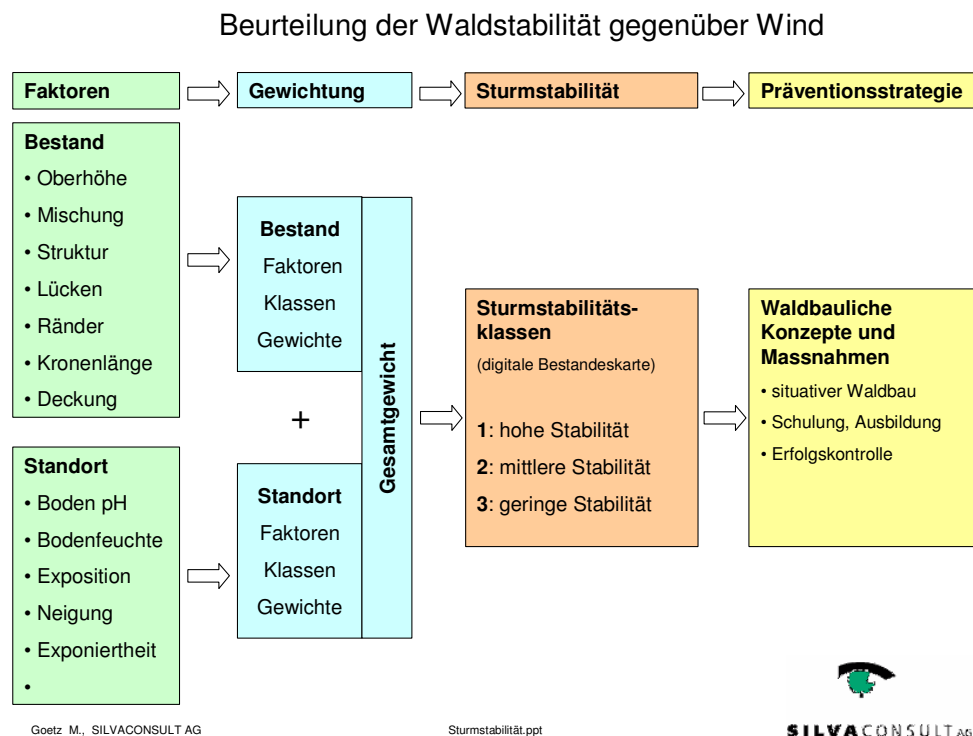


Abb. 1: Übersicht über das Sturmstabilitätsverfahren

Schwerpunkt des vorliegenden **Projektes** war die technische Umsetzung des von der SILVACONSULT entwickelten Modells in einem operationellen Verfahren. Das Verfahren zur Beurteilung der Sturmstabilität sollte in zwei räumlich getrennten Testgebieten des Kantons Zürich angewendet und getestet werden (Pilotprojekt).

Im Modell nicht berücksichtigt wurde das Windfeld, die eigentliche die Schäden verursachende Komponente. Der Hauptgrund dafür war, dass man in der Schweiz mit ihrem stark gegliederten Relief Sturmereignisse derzeit nur mit unzureichender Genauigkeit modellieren kann. Mit dem Modell wurde deshalb das Risiko eines Sturmschadens nicht vollständig bestimmt⁸. Bestimmt wurden jedoch diejenigen Risikofaktoren (Sturmstabilitätsfaktoren), die beeinflussbar sind oder die bei der Prävention berücksichtigt werden können.

Das als Expertensystem entwickelte Widerstandsmodell deckte auf, wo potentiell gefährdete, beziehungsweise instabile Bestände lagen und was die Ursache für die Instabilität war. Es wurde im Hinblick auf die Schadensprävention entwickelt.

Das Modell wurde für den Kanton Zürich kalibriert und anschliessend technisch umgesetzt. Die vorhandenen Daten wurden hinsichtlich ihrer Eignung für die Verwendung im Modell evaluiert. Das Modell wurde in einem geografischen Informationssystem (GIS) implementiert, was die grossflächige und weitgehend automatisierte Anwendung gewährleistete.

⁸ Eine vollständige Risikoanalyse würde zusätzlich zur Stabilität der Wälder auch die lokalen Windverhältnisse und die Eintretenswahrscheinlichkeiten von Stürmen mit berücksichtigen. Der potentielle Sturmschaden müsste qualitativ und quantitativ definiert und monetarisiert werden.

Das Verfahren wurde durch die SILVACONSULT AG in Zusammenarbeit mit der Abteilung Wald des Kantons Zürichs umgesetzt. Für die Kantone Luzern und Thurgau, die ebenfalls am Projekt beteiligt waren, wurde die Datenlage im Hinblick auf ein Sturmstabilitätsprojekt evaluiert. Dies trug dazu bei, dass die flexible Anwendung des Verfahrens gewährleistet wurde.

1.3 Zielsetzung der Arbeit

Das Ziel des Forschungsprojektes war es, das von der SILVACONSULT entwickelte Verfahren zur Beurteilung der Sturmstabilität von Waldbeständen auf zwei Pilotflächen anzuwenden. Die technische Umsetzung des Verfahrens war zu entwickeln. Die Operationalität des Verfahrens war zu belegen.

Das Pilotprojekt sollte Aufschluss über die Sensibilität und Tauglichkeit des Verfahrens für die forstliche Praxis, insbesondere für die Sturmschadenprävention, liefern. Mit dem Projekt wurden folgende operationellen Ziele verfolgt:

- Herleitung der Modellvariablen (Faktoren) aus bestehenden Daten
- Grossflächige Modellierung der Sturmstabilität auf Bestandesebene und Einordnung der Bestände in Stabilitätsklassen
- Erzeugung von digitalen Stabilitätskarten
- Variantenvergleich (Verfahren mit flugzeuggestütztem LIDAR⁹ Daten bzw. mit DOM aus digitaler Photogrammetrie), Kosten-Nutzen-Betrachtung
- Validierung, Verifizierung und Diskussion der modellierten Sturmstabilität im Untersuchungsgebiet, vor Ort

⁹ LIDAR: Laserscanning ist eine Methode, zur Erfassung der Gelände- und Vegetationsoberfläche, bei der von einem Flugzeug aus die Oberfläche mit einem Laser-Entfernungsmessgerät abgetastet wird und so hochdichte und hochpräzise Oberflächen- und Geländemodelle liefert.

2 MATERIAL UND METHODEN

2.1 Ausgangslage

Ausgangslage für das Projekt war das von der SILVACONSULT AG entwickelte Sturmstabilitätsmodell. In das Modell flossen insgesamt 12 sturmrelevante Faktoren ein. Fünf Standorts- und sieben Bestandesfaktoren (Tab. 1).

Bestandesfaktoren	Standortsfaktoren
Oberhöhe	Bodensäure
Mischungsgrad	Geländewasserhaushalt
Bestandesstruktur	Geländeexponiertheit
Innerer Ränder (Steilrand, Löcher)	Geländeneigung
Äussere Ränder (Waldrand, Trauf)	Exposition
Deckungsgrad	
Kronenlänge	

Tab. 1: Sturmstabilitätsfaktoren

Die Bestandes- und Standortsfaktoren wurden hinsichtlich ihrer Bedeutung für die Sturmstabilität ausgewählt und untereinander gewichtet (F). Zusätzlich wurde der Wertebereich jedes Faktors klassiert und die Klassen (Faktorausprägungen) wiederum in Abhängigkeit ihrer Bedeutung für die Sturmstabilität mit Gewichten (K) versehen. Die beiden Gewichte miteinander multipliziert ergaben das Gesamtgewicht für den Faktor in Abhängigkeit seiner Ausprägung. Durch das Aufsummieren der Gesamtgewichte der einzelnen Faktoren erhielt man schliesslich zwei Stabilitätswerte (SW), einen für den aufstockenden Bestand und einen für den Standort.

$$SW = \sum_{i=1}^n Fi \times Ki$$

SW = Stabilitätswert (Standort/ Bestand)
 F = Gewicht Faktor
 K = Gewicht Faktorausprägung (Klasse)

Die Bewertungsskala reichte dabei von 1 – 10, wobei der Wert 1 der höchsten und der Wert 10 der geringsten Bestandesstabilität entsprach. Für die Gesamtbewertung (Sturmstabilität) wurden die Bewertungsskalen klassiert und über eine Matrix zusammengeführt. Als Resultat lagen somit für jede Einheit drei Bewertungen vor: Eine für den Bestand (Bestockung), eine für den Standort und eine für die Kombination von beiden (Gesamtbewertung).

Im vorliegenden Projekt wurden die benötigten Daten aus bestehenden Datensätzen hergeleitet und das Modell in ein räumliches Informationssystem (GIS) implementiert (vgl. Kap. 1.3).

2.2 Rahmenbedingungen

Die Voraussetzungen und Annahmen unter denen modelliert wurde, sind die folgenden:

- Winterstürme (laubloser Zustand)
- Frontensystem aus westlicher Richtung
- Keine allgemeine aktuelle Wassersättigung der Böden
- Kollektive Stabilität (nicht Einzelbaum)

2.3 Versuchsflächen

Die Wahl der Versuchsflächen erfolgte aufgrund von verschiedenen Kriterien. Einerseits sollten die Datensätze möglichst aktuellen Datums sein, andererseits sollten die Versuchsflächen den unterschiedlichen Standortsgegebenheiten im Kanton Zürich Rechnung tragen.

Die erste Versuchsfläche liegt im Norden des Kantons Zürich in der Gemeinde **Embrach** und umfasste 560 ha Wald (Abb. 2). Sie ist durch zwei grössere, zusammenhängende Waldkomplexe charakterisiert, die durch einen Talkessel quer zur Hauptwindrichtung von einander getrennt werden. Die Wälder liegen zwischen 430 und 600 Metern Höhe über dem Meer.

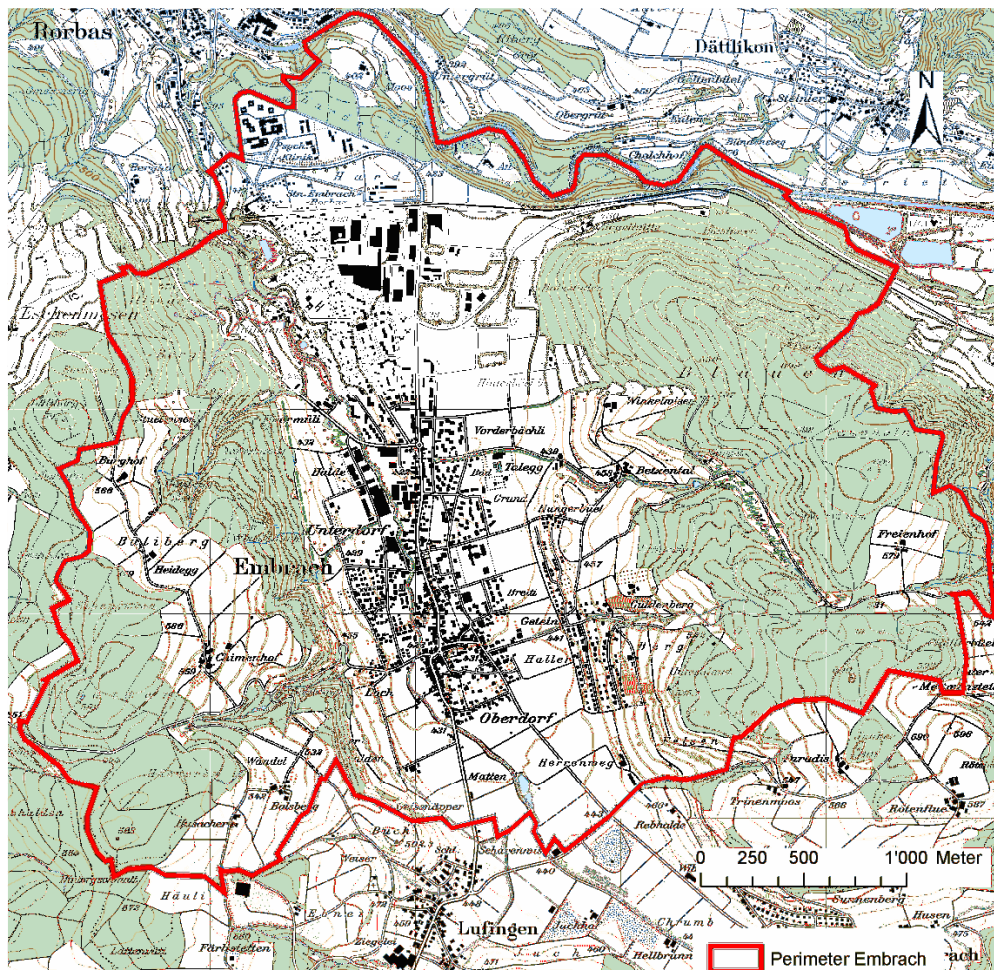


Abb. 2: Perimeter Embrach. PK25¹⁰

¹⁰ PK50 © 2006 Bundesamt für Landestopographie (DV590.3)

Die zweite Versuchsfläche befindet sich in der Region **Knonauseramt**, im südwestlichen Teil des Kantons Zürich (Abb. 3). Im Unterschied zur Versuchsfläche Embrach ist sie topografisch stärker gegliedert und setzt sich aus kleineren Waldkomplexen zusammen. Die Waldflächen zeichnen sich durch viele Luv- und Lee-lagen aus, umfassen insgesamt 1'163 ha und liegen zwischen 400 und 820 Metern Höhe über dem Meer.

Für die Modellierungen im GIS wurden die Perimeter um 2 km erweitert (Buffer). Dadurch wurden Randeffekte, die durch das Fehlen von Nachbarschaftsinformationen entstehen können, ausgeschlossen.

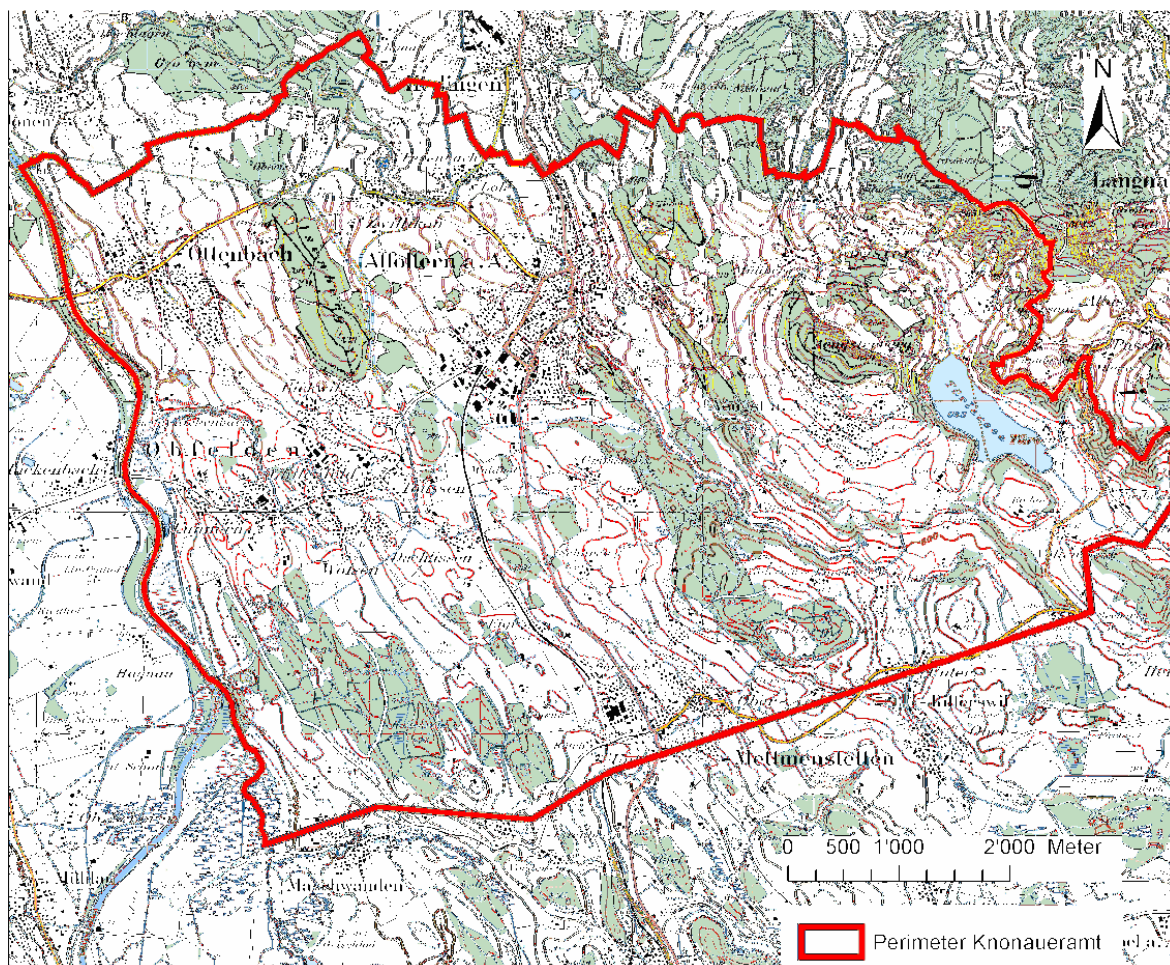


Abb. 3: Perimeter Knonauseramt. PK50¹¹

2.4 Datenerhebung und -aufbereitung

Für das Projekt wurden keine neuen Daten erhoben. Es wurde ausschliesslich mit bereits vorhandenen Daten gearbeitet. Die zur Herleitung der Modellvariablen benötigten Datensätze und -quellen wurden in der Tab. 2 zusammengefasst. Die LIDAR Daten stammten aus dem Projekt „Landwirtschaftliche Nutzflächen, LWN“

¹¹ PK50 © 2006 Bundesamt für Landestopographie (DV590.3)

des Bundes¹². Eine Befliegung des Untersuchungsgebietes war deshalb nicht notwendig.

Daten	Quelle	Erhebungsjahr	
		Embrach	Knonaeramt
Digitale Bestandskarte (generiert aus Luftbildern)	Abt. Wald	2001	2001/ 2003
Dig. Vegetationskundliche Kartierung (Standortskarte)	Abt. Wald	1993	1993
Digitale Waldarealkarte	Abt. Wald	2003	2003
Kronenlängen (Stichprobenerhebungen)	Abt. Wald	2003	2003
Digitale Infrarot-Orthophotos (Luftbilder)	Abt. Wald	2001	2001/ 2003
Digitales Terrainmodell, Auflösung 25 m (DHM 25)	Swisstopo	unbekannt	unbekannt
Digitales Terrainmodell, Auflösung 2 m (DTM-Av)	Swisstopo	2002/ 2003	2002
LIDAR- Rohdaten (DOM roh)	Swisstopo	2002/ 2003	2002
Digitales Oberflächenmodell, Auflösung 10 m	Abt. Wald	2001	2001/ 2003
Digitale Karte der Sturmschäden Lothar Kt. Zürich	Abt. Wald	1999	1999

Tab. 2: Verwendete Datensätze und Quellenangaben

2.5 Herleitung der Modellvariablen (Stabilitätsfaktoren)

Für die Modellierung im GIS, mussten die bestehenden digitalen Datensätze zuerst aufbereitet werden. Im einfachsten Fall geschah dies durch einfaches Klassieren der Variablenwerte oder durch Umwandlung der Daten in ein gewünschtes GIS Format. Andere Variablen mussten aus den bestehenden Datenquellen hergeleitet werden. Da die aufbereiteten Datensätze, je nach Herkunft und Verwendungszwecken, in unterschiedlichen Formen vorlagen, wurden sie in ein einheitliches Format überführt (ESRI GRID, 2 m Raster).

Aus der Tab. 3 kann man entnehmen, welche Datengrundlagen für welchen Stabilitätsfaktor verwendet wurden, ob sie übernommen werden konnten, oder ob brauchbare Informationen erst durch Auswertung gewonnen werden mussten.

Bestandesfaktoren	Grundlagendaten	Nutzung
Oberhöhe	Digitale Bestandskarte	Übernahme
Mischungsgrad	Digitale Bestandskarte	Übernahme
Bestandesstruktur	Digitale Bestandskarte	Übernahme
Innerer Ränder	LIDAR Daten, Orthophotos, Bestandskarte	Auswertung
Aussere Ränder	Digitale Waldarealkarte, Bestandskarte	Auswertung
Deckungsgrad	Digitale Bestandskarte	Übernahme
Kronenlänge	LIDAR Daten Stichprobenerhebungen	Auswertung Übernahme

Standortsfaktoren	Grundlagendaten	Nutzung
Bodenacidität	Digitale Standortskarte	Übernahme
Geländewasserhaushalt	Digitale Standortskarte	Übernahme
Geländeexponiertheit	Terrainmodell (DHM25)	Auswertung
Geländeneigung	Terrainmodell (DTMAV)	Auswertung
Exposition	Terrainmodell (DTMAV)	Auswertung

Tab. 3: Merkmale, Datenquellen und Nutzung der Daten

¹² Bundesamt für Landestopografie (Swisstopo)

2.5.1 Oberhöhe

Die Bestandeskarten im Kanton Zürich werden standardmässig aus Luftbildern interpretiert und photogrammetrisch ausgewertet. Dabei werden für jeden Bestand auch Baumhöhen gemessen, entweder durch Direktmessungen im Luftbild oder durch Wipfelmessung und Differenzenbildung zum Terrainmodell (DTM). Pro Bestand werden zwei bis drei Höhen an Oberhöhenbäumen gemessen. Die gemittelten Baumhöhen werden im Bestandeskartencover als Attributdaten eingetragen. Diese standen somit für die Bildung von Stabilitätsklassen direkt zur Verfügung. Es wurden vier Klassen (Faktorausprägungen) unterschieden.

2.5.2 Mischungsgrad (Nadelholzanteil)

Der Nadel-Laubholzanteil in Prozenten (10%-Stufen) wurde direkt aus den Attributdaten der digitalen Bestandeskarte übernommen. Für größere Bestände, standen zusätzlich verfeinerte Ansprachen nach Baumarten (Fichte, Tanne, Föhre, Lärche, Buche, Eiche, Esche/Ahorn) zur Verfügung. Wo immer möglich, wurde bei den Nadelbäumen zwischen Fichten/Tannen und den übrigen Nadelholzbäumen unterschieden. Es wurden drei Mischungsklassen unterschieden.

2.5.3 Bestandesstruktur

Auch die Bestandesstruktur (Schichtung) konnte direkt aus der digitalen Bestandeskarte übernommen werden. Zur Klassierung standen die Strukturen einschichtig, zweischichtig mit Unterschicht, zweischichtig mit Mittelschicht, mehrschichtig mit Unter- und Mittelschicht, stufig und kleinflächig gemischt zur Verfügung. Es wurden drei Strukturklassen gebildet.

2.5.4 Deckungsgrad

Auch der Deckungsgrad (in 10%-Stufen) konnte direkt aus der Bestandeskarte übernommen werden. Bei einem Deckungsgrad von unter 25% wurden die Altbäume als Überhälter klassiert. Massgebend war in diesem Fall der Jungwald. Es wurden drei Deckungsgradklassen unterschieden.

2.5.5 Äussere Ränder

Als äussere Ränder wurden windexponierte Waldaussenränder (Trauf) bezeichnet, die an eine andere Landnutzungsart grenzten. Diese wurden aus der digitalen Waldkarte des Kantons abgeleitet. Dazu wurden in einem ersten Schritt alle Ränder in Hauptwindrichtung (SW – NW) selektiert und ihre Längen bestimmt. Berücksichtigt wurden nur Ränder (Linien) mit einer Mindestlänge von 15 m. In einem zweiten Schritt wurden dann hinter diesen Rändern Sektoren (NO – SO) gebildet die nach ihrer Sturmgefährdung klassiert wurden. In Abhängigkeit der Distanz zum Waldrand wurden drei Zonen (Klassen) unterschieden.

2.5.6 Innere Ränder

Unter inneren Rändern werden Steilränder zwischen Beständen und durch Lücken im Bestand bedingte Ränder in Windrichtung verstanden, die nicht einen Wald-

aussenrand (Trauf) bilden. Als Angriffsflächen für Stürme gelten jedoch erst Ränder ab einer Höhendifferenz von mehr als 10 m und ab einer Länge von mindestens 15 m quer zur Windrichtung. Als Ränder wurden auch Linien entlang von Beständen betrachtet, bei denen der Deckungsgrad des vorgelagerten Bestandes kleiner als 0.3 war. Die Depressionen der vorgelagerten Bestände in Windrichtung mussten ausserdem eine Ausdehnung von mehr als 25 m betragen, damit sie als sturmrelevant galten. Als Windrichtung wurde auch hier ein Sektor von 90° von Südwesten nach Nordwesten definiert.

Die Gefährdung, die für einen Bestand von einem Rand ausgeht, hängt von seiner Höhe ab. Deshalb wurden die Ränder nach ihrer Höhe in drei Klassen eingeteilt. Auf Bestandesebene (Polygon) gilt dann die instabilste Randklasse für den gesamten Bestand. Bestände mit Deckungsschutz (>10 m) wurden als 4. Klasse ausgeschieden. Für die Herleitung von Steilrändern und Lücken aus den bestehenden Daten wurden 2 verschiedene Verfahren geprüft.

Ableitung der Ränder aus digitalen Höhenmodellen (Raster)

Variante A: Die sturmrelevanten inneren Ränder wurden auf der Basis der Bestandskarten, ergänzt um Waldlücken, abgeleitet. Dazu wurden LIDAR Rohdaten, die mit Laserscanning-Technologie erfasst worden waren, verwendet. Bei der Analyse der LIDAR Rohdaten stellte sich jedoch heraus, dass die Daten im laublosen Zustand aufgenommen worden waren (Abb. 4). Das heisst, dass im Bereich von Laubwaldbeständen die Punktedichten der Vegetationsoberfläche sehr gering waren, und dass sich die Daten nur bedingt für die Ableitung von Rändern eigneten. Für die Nadelholzbestände waren die Punktedichten jedoch ausreichend.

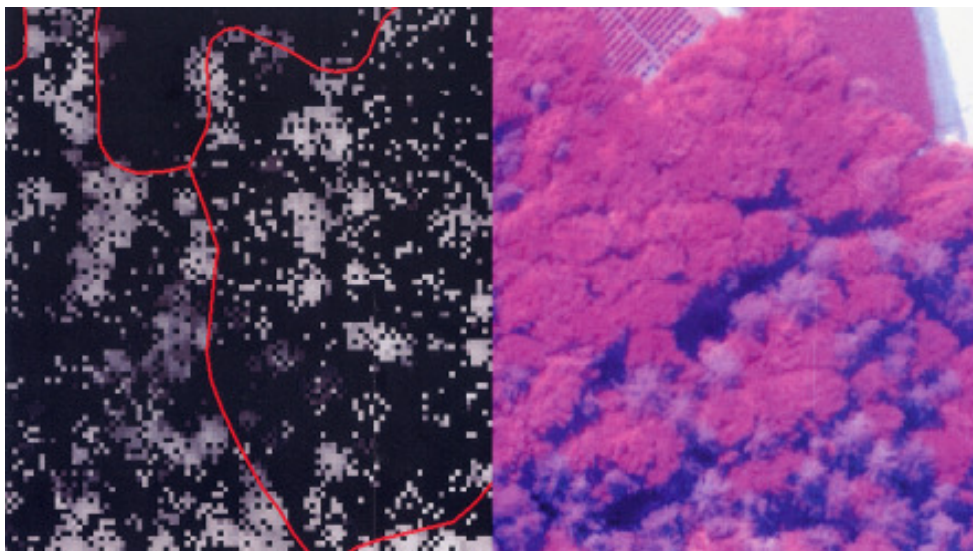


Abb. 4: LIDAR-Daten und Orthophoto¹³

Die Abb. 4 zeigt das aus LIDAR Rohdaten abgeleitete und normalisierte Oberflächenmodell in einem vom Laubholz dominierten Bestand (linke Bildhälfte). In der rechten Bildhälfte ist die Fortsetzung des Bestandes auf dem Orthophoto zu sehen. Die Linien in roter Farbe kennzeichnen die Bestandesgrenzen. Je heller die

¹³ Orthophoto: © 2006 Amt für Raumordnung und Vermessung ARV, Kanton Zürich

Farben in der linken Bildhälfte sind, desto höher über dem Boden liegen die Punkte. Deutlich sind im Bereich von Laubholzkronen grössere Lücken (schwarz) zu erkennen. In Bereich von Nadelholzkronen ist dies nicht der Fall (grau-weiße Aggregate).

Um die Ränder in den Laubholzbeständen trotzdem ableiten zu können, wurden die Laserscanndaten mit optischen Daten (Orthophotos) ergänzt. Die Erweiterung des Oberflächenmodells mit Farbinformationen erlaubte die Ableitung von Bestandeslücken und Steilrändern. Diese Auswertungen wurden im Auftrag der SILVACONSULT AG am JOANNEUM RESEARCH, Institut für digitale Bildbearbeitung, in Graz (A) durchgeführt. Die Auswertungen umfassten folgende Arbeitsschritte:

Aufbereitung der Daten:

- Importieren und Konvertieren der Laserrohdaten (LS) in das IMPACT Format
- Ableitung eines digitalen Oberflächenmodells (DOM) aus LS Daten mit 0.5 und 1 m Auflösung und Analyse der Punktedichten
- Ableitung eines normalisierten DOM (nDOM) mit Hilfe des aufgenommenen DOM's und dem bereits existierenden Geländemodell (DTMAV) der Swisstopo (Ableitung der Vegetationshöhe)
- Mosaikierung der Luftbilder (Orthophotos) bezüglich Nadel- und Laubholz

Ableitung der sturmrelevanten Ränder:

- Erstellen einer Laubwaldmaske und Detektion von Waldlücken durch die Klassifikation der Farbinfrarot-Luftbildmosaiken
- Erstellung eines groben Laubbaumhöhenmodells unter Zuweisung der Oberhöhen aus der Bestandeskarte
- Ergänzung des normalisierten DOM's (nDOM) aus den Laserscanndaten durch das Laubbaumhöhenmodell und Ausmaskierung der Bestände mit einem Deckungsgrad kleiner als 0.3 (Vegetationsmodell)
- Algorithmus zur Detektion der definierten Ränder aus dem Vegetationsmodell
- Erzeugung von geschlossenen Linien (Ränder) durch eine „blow an shrink“ Operation
- Konvertierung der Randlinien von Rastern zu Vektoren (Polylines) und Anhängen von Attributen zur Klassierung und Bestandeszuweisung
- Zuweisung der Ränder zu Beständen über Bufferfunktionen

Variante C: Geprüft wurde ausserdem die Herleitung der Ränder aus einem aus der Photogrammetrie abgeleiteten Oberflächenmodell (DOM) mit einer Auflösung von 10 x 10 m (Raster). Zur Herleitung des normalisierten DOM's wurde das auf 10 m Raster umgerechnete Terrainmodell der Swisstopo (DTMAV, 2 m Auflösung) verwendet. Die Herleitung der Ränder erfolgte dann nach derselben Methode wie für das, aus den Laserscanndaten abgeleitete DOM (Variante A).

Ableitung der Steilränder aus den Oberhöhen der Bestandeskarte (Polygone)

Variante B: Die Steilränder, nicht aber die Lücken, liessen sich auch direkt aus den Oberhöhen der Bestandeskarte ableiten. In einem ersten Schritt wurden alle Ränder in Windrichtung (NW – SW) mit einem Höhenunterschied von mindestens 10 m abgeleitet. Danach wurde geprüft, ob die geforderten Kriterien Randlänge, Depressionstiefe und Deckungsgrad erfüllt waren. Zur automatisierten Herleitung

aus den Bestandesattributen der Bestandeskarte im GIS wurde ein Visual-Basis-Skript geschrieben. Am Schluss erfolgte die Klassierung der Ränder aufgrund ihrer Höhendifferenz. Die Lücken wurde nach demselben Verfahren wie in der Variante A (LIDAR) hergeleitet.

2.5.7 Kronenlänge

Die Kronenlänge wurde als mittlere Kronenlänge der Oberhöhenbäume definiert. Da diese Daten nicht direkt vorhanden waren, mussten sie aus den vorhandenen Daten abgeleitet werden. Am besten eigneten sich dazu LIDAR Rohdaten. Allerdings erhält man aus diesen Daten nicht die eigentliche Kronenlänge, sondern nur die Länge der Lichtkrone (Kronenspitze bis zum Ort der maximalen Kronenausdehnung). Die Kronenlänge kann aber über das Verhältnis der Licht- zur Gesamtkronenlänge, angenähert hergeleitet werden (PRETSCH 1992). Zur Prüfung der Kronenlängen standen Stichprobendaten aus der Inventur zur Verfügung. Wegen der im Kapitel 2.5.6 geschilderten Probleme mit den LIDAR Daten, konnten die Kronenlängen nur für reine Nadelholzbestände ermittelt werden. Die Auswertungen wurden im Auftrag der SILVACONSULT AG am JOANNEUM RESEARCH in Graz (A) durchgeführt.

Ableitung der Kronenlängen:

- Herleitung eines nDOM aus den LIDAR Rohdaten (vgl. Kap. 2.5.6)
- Ableitung der Einzelbäume mit hierarchischem multiscalem curvature Ansatz, gefolgt von der Segmentierung der Kronen
- Ableitung der Kronenlänge für die Einzelbäume
- Bildung der Kronenmittelwerte je Bestand
- Berechnung der Bestandeskronenlänge

Da die Daten nur für Nadelholzbestände hergeleitet werden konnten, wurden sie für die Modellierung der Sturmstabilität nicht verwendet. Im Modell wurden alle Bestände in die Kronenlängenklasse „hohe Stabilität“ eingeteilt. Das heisst, dass alle Bestände dasselbe Gewicht für den Faktor „Kronenlänge“ erhielten.

2.5.8 Bodensäure

Die Acidität des Oberbodens wurde aus dem Ökogramm der Waldgesellschaften im Kanton Zürich abgeleitet (SCHMIDER et al. 1993). Der so ermittelte pH-Wert wurde aufgrund seiner Bedeutung für die Entstehung von Sturmschäden klassiert und über die pflanzensoziologischen Einheiten mit der digitalen Waldstandortskarte verknüpft. Es wurden 3 Klassen unterschieden.

2.5.9 Geländewasserhaushalt

Beim Geländewasserhaushalt ist die Tendenz eines Standortes zur Vernässung für die Sturmstabilität massgebend. Diese Tendenz zur Vernässung wurde aus dem Ökogramm der Waldgesellschaften im Kanton Zürich abgeleitet (SCHMIDER et al. 1993). Dort wird synonym der Begriff „Feuchtigkeitsgrad des Bodens“ verwendet. Die Waldgesellschaften wurden in 5 Stabilitätsklassen eingeteilt.

2.5.10 Geländeexponiertheit

Zur Erfassung der Geländeexponiertheit wurde ein Parameter verwendet, der auf der Grundlage von digitalen Geländemodellen ermittelt wird (SCOTT & MITCHELL 2005). Für die Berechnung dieses so genannten „Topex to distance“-Wertes wurde ein in Kanada¹⁴ entwickeltes Skript im CMD Modus verwendet. Dieses ermittelt in einer vorzugebenden Distanz (Grenzdistanz), die Summen der Winkel zwischen dem Bezugspunkt und dem Horizont in 8 Himmelsrichtungen (Kardinalrichtungen). Im Topex-Wert widerspiegelt sich die Geländeexponiertheit des Bezugspunktes. Je kleiner der Wert, desto exponierter ist der Punkt. In der vorliegenden Arbeit wurde der TOPEX aus dem Terrainmodell (DHM25) der Swisstopo mit einer Rasterauflösung von 25 m abgeleitet. Der TOPEX wurde für die Grenzdistanzen von 1000, 1500 und 2000 m berechnet und anhand der Lotharschäden (digitale Lotharschadenskarte ZH) mittels Regressionsrechnung analysiert. Als Mass für die Anpassung der Kurven diente das Bestimmtheitsmass (R^2). Zum Schluss wurde der Wertebereich des gewählten Modells in 5 Stabilitätsklassen eingeteilt.

2.5.11 Exposition

Die Exposition wurde aus dem digitalen Terrainmodell der Swisstopo (DTMAV; 2 x 2 m Raster) und der Funktion „Aspect“ des „Spatial Analyst“ (ArcGIS 9.1) berechnet. Die Werte wurden in 3 Klassen eingeteilt.

2.5.12 Geländeneigung

Die Hangneigung wurde aus dem digitalen Terrainmodell der Swisstopo (DTMAV; 2 x 2 m Raster) mit der Funktion „Slope“ des „Spatial Analyst“ (ArcGIS 9.1) abgeleitet. Es wurden 4 Klassen unterschieden.

2.6 Modellierung der Sturmstabilität im GIS

2.6.1 Übersicht

Die Modellierungen und räumlichen Analysen wurden mit der GIS Software ArcGIS 9.1 von ESRI® unter Verwendung des „Spatial Analyst“ und des „Modell Builder“ durchgeführt. Es wurde auf der Ebene von Rastern (ESRI GRID) modelliert. Die folgende Abb. 5 präsentiert den schematischen Ablauf der Modellierungen in der GIS Umgebung.

¹⁴ The Windthrow Research Group. University of British Columbia, Vancouver, Canada. Unter der Leitung von Dr. J. S. MITCHELL

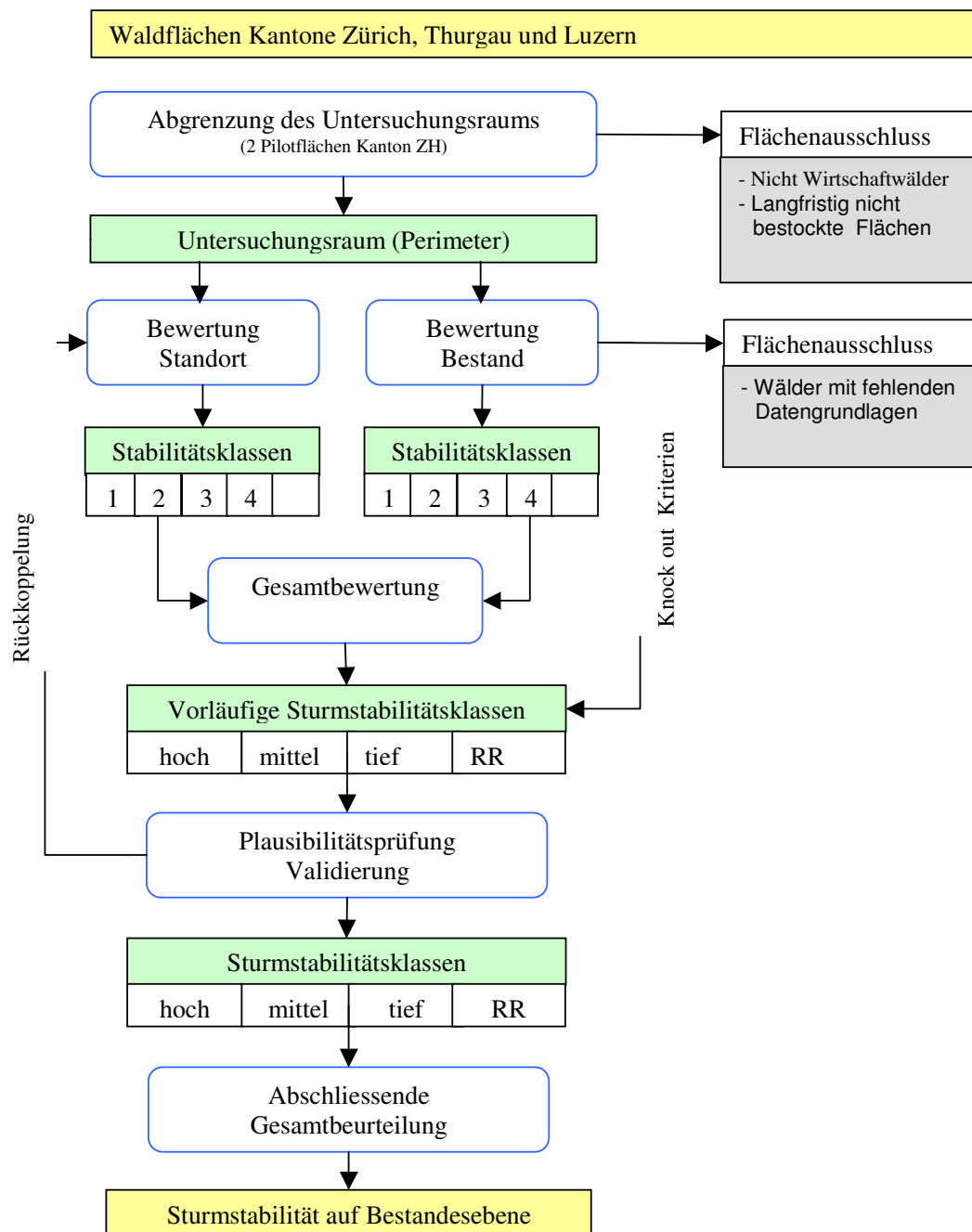


Abb. 5: Schematischer Ablauf der Modellierungen im GIS

Kennzeichnend für das Verfahren war, dass die Stabilitätsbewertung des Standorts und der Bestockung (Bestand) unabhängig von einander durchgeführt und erst am Schluss zu einer Gesamtstabilität verbunden wurden.

2.6.2 Verrechnung, Gewichtung und Klassierung

Stabilität des Standorts und des Bestandes (Bestockung)

Die Bewertung der Bestandesstabilität erfolgt für Bestände ab einer Oberhöhe von 10 m. Bestände unterhalb von 10 m Oberhöhe wurden direkt klassiert (k.o. Kriterium).

Die Gewichtungen und Verrechnungen erfolgten auf der Ebene von Rastern (2 x 2 m ESRI-GRID). Jede einzelne Rasterzelle wurde in Abhängigkeit seiner Klassenzugehörigkeit (Faktorausprägung) mit einem eindeutigen Code versehen. Es wurde eine Tabelle erstellt, die für jede Codekombination das Gesamtgewicht (Stabilitätswert) und die Gewichte der einzelnen Ebenen enthielt. Diese Tabelle wurde anschliessend über den eindeutigen Bestandescode mit den räumlichen Daten (GRID) verknüpft. Damit war gewährleistet, dass für jeden Rasterpunkt nachvollzogen werden konnte, wie die Gewichtung bzw. die Bewertung der Stabilität zustande kam. Das Gesamtgewicht für den Standort und den Bestand (Bestockung) liegt jeweils in einem Wertebereich zwischen 1 und 10. Im Hinblick auf die Schadensprävention wurden die Stabilitätswerte für beide Ebenen wie folgt klassiert (Tab. 4):

Stabilitätswert	Klassenbreite	Klasse	Farbsymbol
1 - 4	3	hohe Stabilität	rot
> 4 - 7	3	mittlere Stabilität	gelb
> 7 - 10	3	geringe Stabilität	blau

Tab. 4: Stabilitätsklassierung Bestand und Standort

Für die Karte der Bestandesstabilität (nur Bestandesfaktoren) wurden zusätzlich alle Bestände mit einer Oberhöhe von 10 – 15 m, unabhängig von ihrer sonstigen Stabilitätsbewertung, der Klasse „hohe Stabilität“ (blau) zugewiesen (k.o. Kriterium). Die nicht bewerteten Bestände mit Oberhöhen unterhalb von 10 m wurden in eine vierte Stabilitätsklasse (grün) eingeteilt.

Als Endprodukt stehen somit zwei Grundlagenkarten auf der Basis von Rastern mit einer Auflösung von 2 x 2 m zur Verfügung: Eine Stabilitätskarte für den Standort, hergeleitet aus Standortsfaktoren und eine für den Bestand, hergeleitet aus Bestandesfaktoren.

Sturmstabilität (Gesamtstabilität)

Die Gesamt- bzw. Sturmstabilität wurde schliesslich durch die Kombination der beiden Stabilitätskarten (Standort- und Bestandesfaktoren) ermittelt. Für jede Rasterzelle (2 x 2 m) wurde über eine fixe Zuordnungsmatrix die Stufe der Gesamtstabilität bestimmt (Abb. 6).

		Bestockung		
		G	M	H
Standort	G	1	1	3
	M	1	2	3
	H	1	2	3

Legenden:

Standort und Bestockung

H = hohe Stabilität

M = mittlere Stabilität

G = geringe Stabilität

Gesamtstabilität:

1 (rot) = geringe Stabilität

2 (gelb) = mittlere Stabilität

3 (blau) = hohe Stabilität

Abb. 6: Matrix zur Bestimmung der Gesamtstabilität

Bestände mit einer Oberhöhe von weniger als 10 m wurden, unabhängig von der Standortstabilität, direkt in die Klasse 4 (grün) „sehr hohe Stabilität“ eingeordnet. Mit grauer Farbe wurden alle Bereiche dargestellt, für die keine Aussagen möglich waren (fehlende Daten).

Das Resultat der Zuordnung über die Matrix (Abb. 6) war eine Sturmstabilitätskarte auf der Ebene von Rastern mit einer Auflösung von 2 x 2 m. Über die beiden Grundlagenkarten (Standort, Bestand) kann nachvollzogen werden, wie die Gesamtstabilität zustande gekommen ist.

Bezug auf Bestandesebene (Generalisierung)

Die Grundeinheiten, mit denen der Förster im Walde arbeitet, sind in der Regel die Bestände¹⁵. Deshalb wurden die Resultate von der Raster- auf die Bestandesebene (Polygone) umgerechnet. Dies geschah über Flächenkriterien. Massgebend für die Zuordnung war die Klasse mit der geringsten Stabilität eines Bestandes, die mindestens 20% der Bestandesfläche ausmachte. Innerhalb der massgebenden Klasse wurden dann für den Bestand die Gewichte jener Rasterzelle(n) übernommen, die flächenmässig am häufigsten vorkamen. So kann man auch auf Bestandesebene zurückverfolgen, wie die Gewichtung zustande kam.

2.7 Überprüfung der modellierten Resultate

2.7.1 Bestandesdaten

Die Daten, die direkt aus der Bestandskarte übernommen werden konnten (vgl. Tab. 3), wurden bei den Begehungen im Perimeter, stichprobenweise, auf ihre Richtigkeit geprüft.

Die Ränder (Waldränder, Steilränder Lücken) waren erst im Rahmen des Projektes detektiert und modelliert worden (vgl. Tab. 3). Sie wurden zuerst mit den digitalen Orthophotos am Computer und danach auch im Gelände überprüft.

¹⁵ Unter einem Waldbestand wird hier vereinfacht eine waldbauliche, operationelle Einheit verstanden. Ein Waldbestand ist überwiegend homogen bezüglich Entwicklungsstufe, Baumartenmischung und Deckungsgrad.

Die Kronenlänge konnte nur für die reinen Fichtenbestände aus den LIDAR Daten hergeleitet werden. Aus diesem Grund wurde auf eine Implementierung ins Modell verzichtet. Eine Prüfung der Resultate fand deshalb nicht statt.

2.7.2 Standortdaten

Das Modell der Geländeexponiertheit (TOPEX) wurde anhand der „Lotharschäden“ von 1999 überprüft (vgl. Kap. 2.5.10). Geländeneigung und Exposition wurden vor Ort geprüft. Nicht überprüft wurden hingegen die pflanzensoziologischen Standortseinheiten. Sie entsprechen dem schweizerischen Standard und wurden als „korrekt“ angenommen.

2.7.3 Bestandes-, Standort- und Sturmstabilität

Die Schlussergebnisse der Modellierungen wurden vor Ort geprüft. Zudem liess das Sturmereignis vom 3. Oktober 2006 gewisse Rückschlüsse zu.

Expertisen: Die Ergebnisse wurden durch je einen Vertreter der beteiligten Kantone, von SILVACONSULT, sowie Revierförstern vor Ort geprüft und diskutiert.

Sturmereignis: Am Abend des 3. Oktober 2006 zog ein erster Herbsturm von Westen her kommend über die Nordschweiz. In den Niederungen wurden 70 – 90 km/h, in leicht erhöhten Lagen 90 – 100 km/h gemessen (HOSTETTLER & STOLL 2006). Im Versuchsgebiet der Gemeinde Embrach hinterliess der Sturm vereinzelte Streuschäden. Diese Schäden wurden grob kartiert und mit den modellierten Ergebnissen verglichen.

2.8 Statistische Auswertungen

Bei dem vorgängig entwickelten Verfahren handelt es sich um ein Expertensystem. Die durch Expertenbefragung hergeleitete Gewichtung der Merkmale erfolgte mit der Methode „AHP“ nach Thomas Saaty (SAATY 1980). Es zeigte sich eine hohe Konsistenz der Gewichtungen.

Regressionsanalysen zur Gewichtung des TOPEX wurden mit dem Programm „Excel“ von Microsoft® durchgeführt.

2.9 Durchführung der Arbeiten

Das Projekt wurde durch die SILVACONSULT AG in Zusammenarbeit mit der Abteilung Wald des Kantons Zürichs umgesetzt. Der Kanton Zürich stellte dafür seine Daten, einen GIS Arbeitsplatz und technisches Know-how zur Verfügung. Die SILVACONSULT AG brachte das von ihr entwickelte Modell für die Anwendung mit ein. Sie leitete das Projekt, insbesondere kalibrierte und implementierte sie das Modell. Das Projekt wurde von einer Steuerungsgruppe, die sich aus Vertretern der beteiligten Kantone zusammensetzte begleitet. Die Validierungen im Gelände

fanden unter Beisein von Sachverständigen der Forstdienste der beteiligten Kantone sowie den zuständigen Revierförstern statt.

Mit Ausnahme der LIDAR Daten war der Kanton Zürich im Besitz aller für das Projekt notwendiger Daten. Die LIDAR Daten konnten bei der Swisstopo eingekauft werden. Eine Neubefliegung war nicht erforderlich. Die LIDAR Auswertungen wurden im Auftrag der SILVACONSULT AG am JOANNEUM RESEARCH in Graz, Österreich, durchgeführt.

2.9.1 Beteiligte Personen

Kanton Zürich	Abteilung Wald ▪ Alain Morier, Kantonsforstingenieur ▪ Hermann Hess, Planungsverantwortlicher ▪ Charles Henry, GIS Verantwortlicher ▪ Georg Hollinger, GIS und EDV Verantwortlicher ▪ Urs Greutmann, Förster Embrach ▪ Robi Püntener, Förster, Forstkreis Oberamt
Kanton Luzern	Dienststelle Landwirtschaft und Wald ▪ Dr. Albin Schmidhauser, Abteilungsleiter ▪ Silvio Covi, Kreisförster
Kanton Thurgau	Forstamt ▪ Paul Gruber, Kantonsforstingenieur ▪ Gerold Schwager, Planungsverantwortlicher
SILVACONSULT AG	Neustadtgasse 9, CH-8402 Winterthur ▪ Dr. Hubertus Schmidtke, Geschäftsleiter ▪ Michael Götz, Projektleiter
JOAN. RESEARCH	Institut für digitale Bildbearbeitung, Graz (A) ▪ Dr. Prof. Mathias Schardt, Institutsleiter ▪ Roland Wack, Projektmitarbeiter

3 ERGEBNISSE

In diesem Kapitel werden die modellierten Ergebnisse vorgestellt. Die eigentlichen Schlussergebnisse, die Karten der Bestandes-, der Standort- und der Sturmstabilität, werden für beide Versuchsflächen (Embrach, Knonaueramt) vollständig präsentiert (1720 ha Wald). Demgegenüber werden Zwischenergebnisse der Übersicht wegen, nur noch für Ausschnitte des Perimeters gezeigt. Sofern nicht anders erwähnt, befindet sich der gewählte Kartenausschnitt immer im südwestlichen Teil des Perimeters „Embrach“ und umfasst 93 ha Wald.

3.1 Sturmstabilitätsfaktoren

In der Folge werden die aus den bestehenden Datensätzen abgeleiteten, klassierten und räumlich dargestellten Datensätze, für jeden Sturmstabilitätsfaktor präsentiert.

3.1.1 Innere Ränder (Variantenvergleich LIDAR – DOM)

Die Abb. 7 und Tab. 8 auf der folgenden Seite zeigen die Ergebnisse der beiden Herleitungsverfahren für die inneren Ränder auf Bestandesebene. Die Ränder der Lücken sind mit hellblauer, die der Steilränder an den Bestandesgrenzen mit hellgrüner Farbe in die Bestandeskarte eingezeichnet. Darüber stehen in vertikaler Richtung die Randhöhen in Metern.

Die Klassierung der Bestände geschah über das Prinzip der instabilsten Randklasse (Kap. 2.5.6). Bestände mit Rändern von mehr als 20 Meter Höhe sind rot, solche von 11 – 20 Metern gelb eingefärbt. Grün sind Bestände mit Deckungsschutz. Dort ist der in Luv vorgelagerte Bestand mindestens 10 Meter höher. Blau eingefärbte Bestände besitzen weder Deckungsschutz noch Ränder (0 - 10 m). Zur Identifikation sind die Bestände mit eindeutigen Nummern versehen.

Während in der Abb. 7 (Variante A) die Lücken und Steilränder aus der Kombination von LIDAR Daten und Orthophotos abgeleitet wurden, gilt das in der Abb. 8 (Variante B) nur für die Lücken. Hier wurden die Steilränder aus Bestandeshöhen der Bestandeskarte abgeleitet. Das heisst, dass sich die beiden Verfahren in der Herleitung der Steilränder, nicht aber der Lücken, unterscheiden. Wie aus den beiden Abbildungen ersichtlich ist, werden deutlich mehr Steilränder mit der LIDAR Methode detektiert. Dies hängt vor allem damit zusammen, dass die Ränder mit der LIDAR Methode auf der Ebene von Einzelbäumen abgeleitet werden. Die extrahierten Linien geben deshalb den exakten Verlauf der Ränder wieder. Im Gegensatz dazu ist dies bei der Methode mit den Bestandeshöhen aus der digitalen Bestandeskarte nicht der Fall. Die abgeleiteten Ränder entsprechen in diesem Fall den generalisierten Linien der Bestandesgrenzen. Dies führt dazu, dass manche der windexponierten Ränder nicht als solche detektiert werden, obwohl sie es aufgrund des tatsächlichen Randverlaufs müssten. Tab. 5 auf der übernächsten Seite fasst die Unterschiede der beiden Varianten auf Bestandesebene zusammen.

Innere Ränder

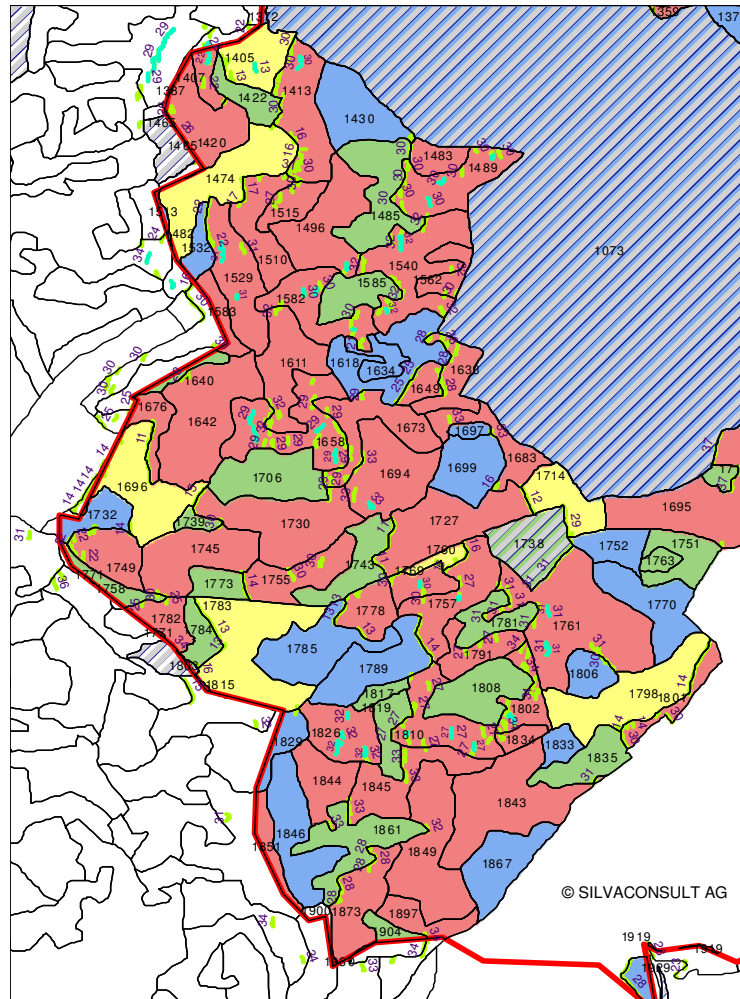


Abb. 7: Ränder Variante A (LIDAR/Orthophotos)

Bestände mit:

- Rändern > 20m
- Rändern 11 - 20r
- kein Rand
- Deckungsschutz
- ▨ Nicht Forst
- Steilränder
- Lücken-Rand

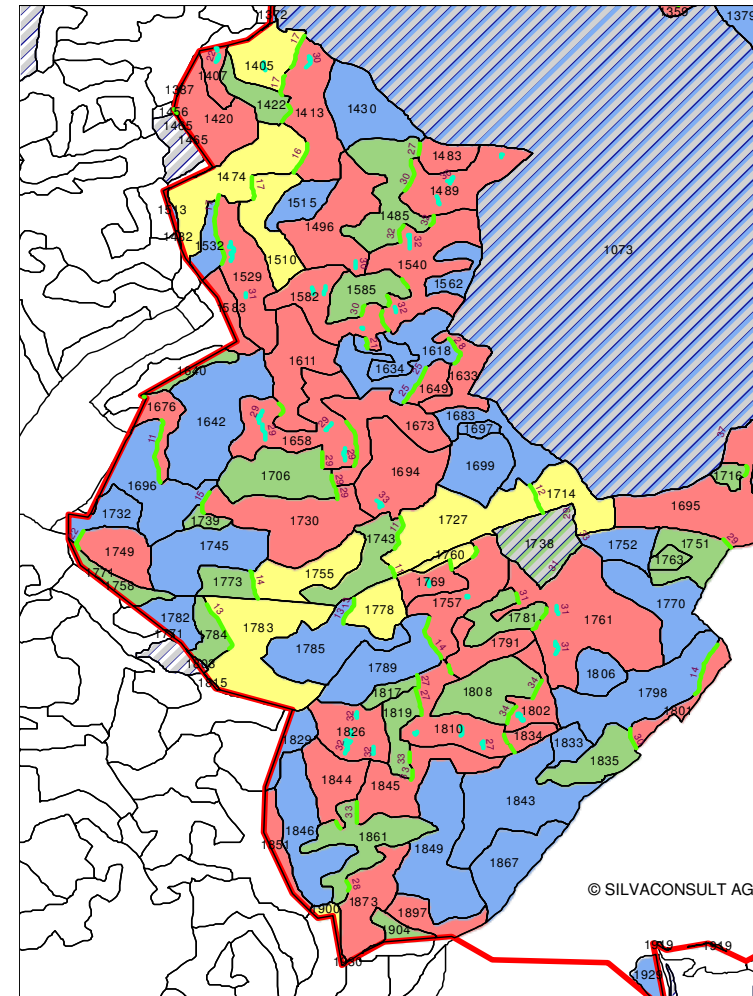


Abb. 8: Ränder Variante B (Bestandeshöhe/LIDAR)

		Bestände		Flächen			
		[Anz.]		[ha]		[%]	
		Var. A	Var. B	Var. A	Var. B	Var. A	Var. B
Klasse	Ränder > 20 m	52	36	54.4	38.7	58.4	41.6
	Ränder 11 –20 m	8	11	10.0	11.1	10.7	11.9
	Keine Ränder	19	32	14.5	29.1	15.6	31.2
	Deckungsschutz	23	23	14.2	14.2	15.3	15.3
	Total	102	102	93.1	93.1	100	100

Tab. 5: Variantenvergleich „Innerer Ränder“, Perimeter Embrach

Aus Tab. 5 ist ersichtlich, dass mit der Variante A (LIDAR kombiniert mit Orthophoto) sowohl anzahl- wie auch flächenmässig deutlich mehr Bestände in die instabilste Klasse „Ränder > 20 m“ eingeteilt werden, als mit der Variante B (Bestandeshöhe aus Karte kombiniert mit LIDAR). Die Resultate wurden im Gelände überprüft und bestätigt. Die Genauigkeit der mittels LIDAR Daten detektierten Ränder war überzeugend und im Gelände problemlos nachvollziehbar. Es hat sich gezeigt, dass das Verfahren zur Herleitung der Steilränder aus der Kombination von LIDAR Daten und Orthophotos (Var. A) genauere Resultate liefert, als das Verfahren mittels Bestandeshöhen (Var. B). Die Lücken können ausserdem nur mit LIDAR Daten und Orthophotos hergeleitet werden. Aus diesen Gründen wurde für das Sturmstabilitätsmodell mit der Variante A (LIDAR) gearbeitet.

Alternativ zu dem Verfahren mit LIDAR Daten und Orthophotos wurde versucht, die Ränder aus einem digitalen Oberflächemodell (DOM) mit einer Rasterauflösung von 10 x 10 m herzuleiten (Variante C). Dieses DOM war ein Beiprodukt aus der Herstellung der Orthophotos und stand kostenlos zur Verfügung. Es liessen sich auch aus diesem Oberflächenmodell Ränder ableiten. Die Genauigkeit genügte jedoch den Anforderungen bei weitem nicht, sodass dieser Ansatz nicht weiterverfolgt wurde. Die Tab. 6 zeigt einen Überblick über die Eignung der drei Datenarten (Varianten) zur Detektion der Steilränder.

Eignung verschiedener Ausgangsdaten zur Detektion von Steilrändern im Wald			
Datenart ►	DOM 1x1 m (LIDAR/Orthophoto) Variante A	Polygon Bestandeskarte Variante B	DOM 10x10 m Aus Orthobildherstellung Variante C
Zielgrösse ▼			
Steilränder	+	+(-)	- (+)
Ränder in Lücken	+	-	-

Tab. 6: Eignung verschiedener Ausgangsdaten zur Detektion von Rändern

3.1.2 Geländeexponiertheit (Topex)

Der TOPEX als Mass für die Geländeexponiertheit wurde für Grenzdistanzen von 1'000, 1'500 und 2'000 Meter berechnet. Die Resultate wurden mit den Lotharschäden überlagert und mittels Regressionsrechnung analysiert. Die besten Ergebnisse konnten für beide Versuchsflächen mit einer Distanz von 2'000 m (Topex2000) erzielt werden. Während für den Perimeter Embrach das Bestimmtheitsmass klar zu Gunsten von 2'000 Metern ausfiel, war es im Perimeter „Knonaueramt“ für 1'500 und 2'000 Meter beinahe gleich, jedoch klar besser als für 1'000 Meter. In den Abb. 9 und Abb. 10 sind die zugehörigen Regressionsfunktionen für den Topex2000 und die Lotharschäden von 1999 dargestellt.

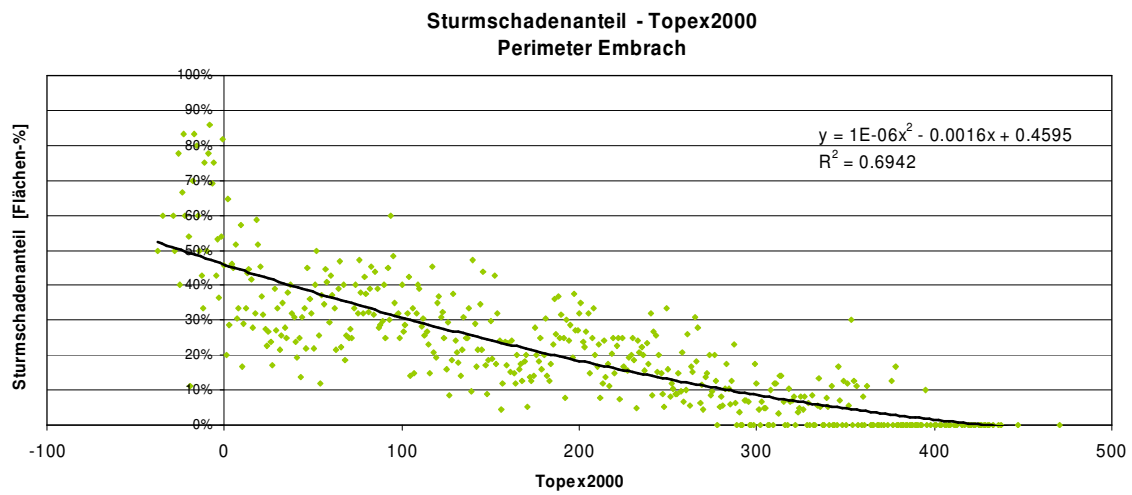


Abb. 9: Regressionsfunktion Topex2000 und Lotharsturmschäden. Embrach

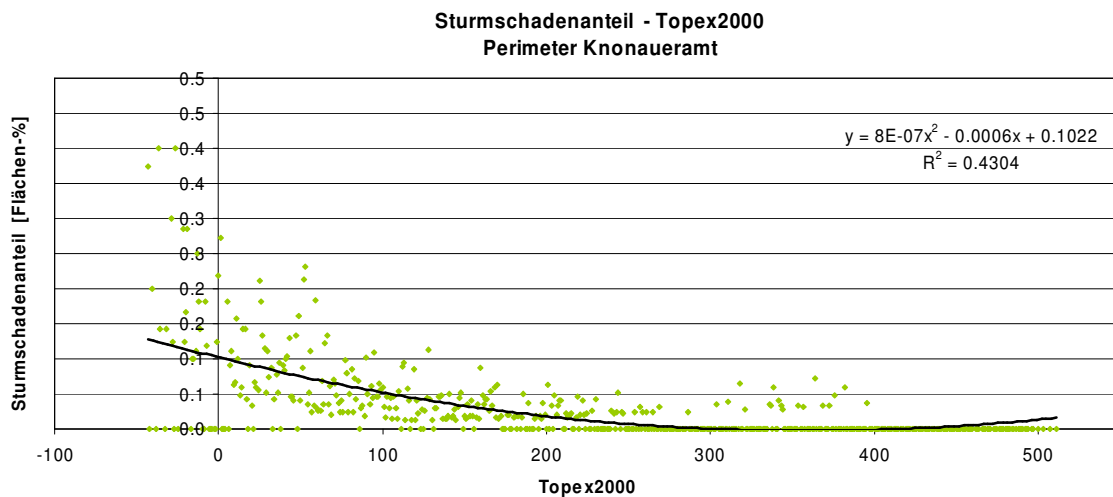


Abb. 10: Regressionsfunktion Topex2000 und Lotharsturmschäden. Knonaueramt

Die Abb. 11 (Embrach) und Abb. 12 (Knonaueramt) zeigen die Häufigkeitsverteilungen der berechneten Topex2000 Werte für die beiden Perimeter. Es ist deutlich erkennbar, dass im Perimeter „Knonaueramt“ im Vergleich zum Perimeter „Embrach“ höhere Werte gemessen wurden. Ausserdem ist die Verteilung im Perimeter „Knonaueramt“ deutlich zugespitzt, während sie in Embrach gleichförmiger verläuft. Die unterschiedlichen Verteilungen widerspiegeln die unterschiedlichen Relieftypen der beiden Testgebiete.

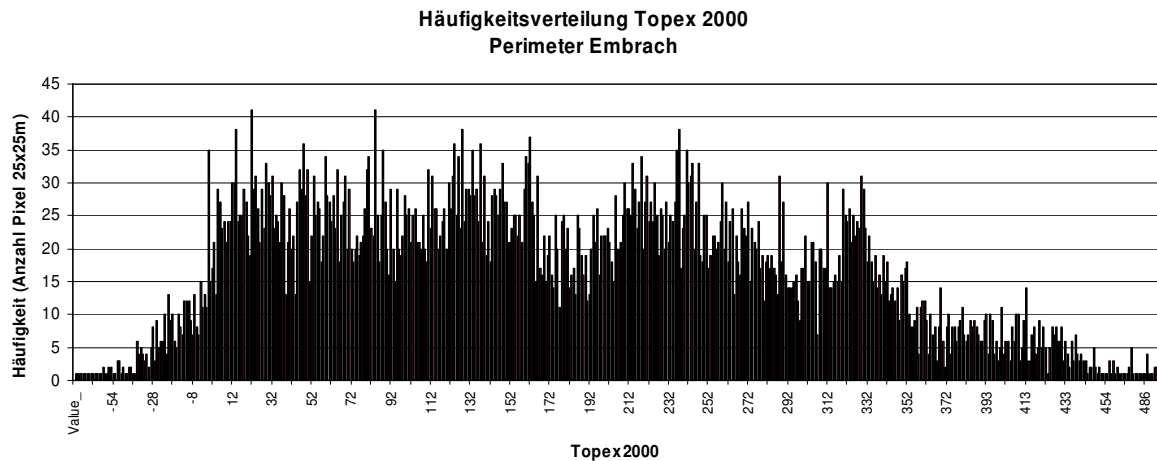


Abb. 11: Häufigkeitsverteilung Topex2000 hergeleitet aus DHM25. Embrach

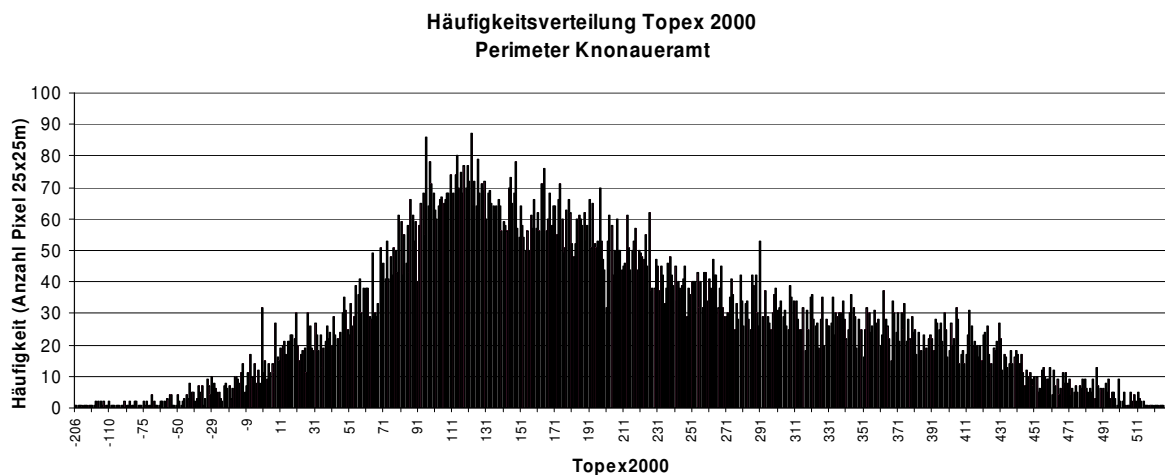


Abb. 12: Häufigkeitsverteilung Topex2000 Perimeter Knonaueramt

Aufgrund der Häufigkeitsverteilung und der Regressionsfunktion wurden die Wertebereiche in fünf Stabilitätsklassen eingeteilt (vgl. Abb. 13 Kartenausschnitt Embrach: „Standort: Exponiertheit“).

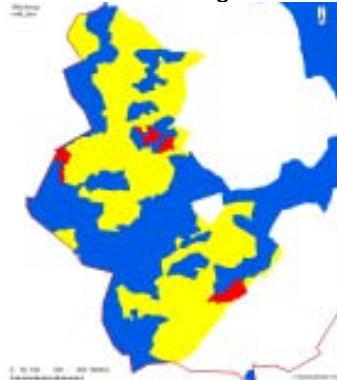
3.1.3 Andere Stabilitätsfaktoren

Mit Ausnahme der Hangneigung und der Exposition lassen sich alle weiteren Sturmstabilitätsfaktoren beziehungsweise ihre Klassen direkt aus der Bestandes- oder Standortskarte (vegetationskundliche Kartierung) herleiten. Sie werden deshalb nur räumlich im Kartenausschnitt „Embrach“ präsentiert (Abb. 13). Dasselbe gilt für die Hangneigung und die Exposition, da deren Herleitungen im GIS fest implementierte Funktionen sind.

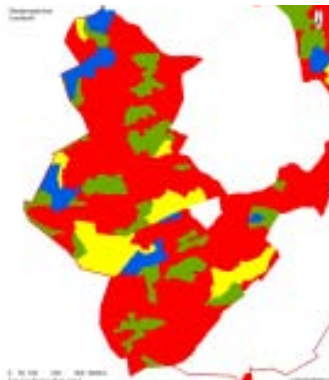
Die Klassen eines jeden Faktors sind mit unterschiedlichen Farben hervorgehoben. Dabei nimmt die Stabilität im Bezug auf Sturmeinfluss von grün über blau und gelb zu rot immer mehr ab. Grau hervorgehoben sind Bereiche wo Informationen zum Standort oder Bestand fehlen. Die folgende Abb. 13 zeigt die im Modell verwendeten Kartenebenen (Faktoren) für den Ausschnitt im Perimeter Embrach. Der Übersicht wegen wird auch das Orthophoto präsentiert.

Abb. 13: Sturmstabilitätsfaktoren auf Rasterebene (Ausschnitt Embrach)¹⁶

Bestand: Mischung



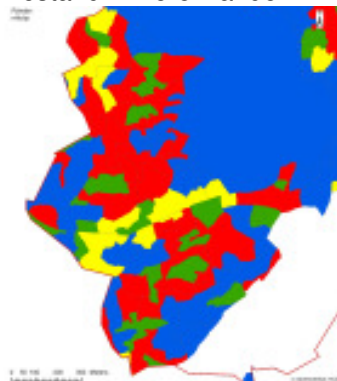
Bestand: Höhe



Bestand: Struktur



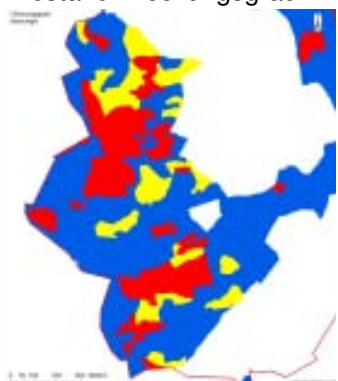
Bestand: Innere Ränder



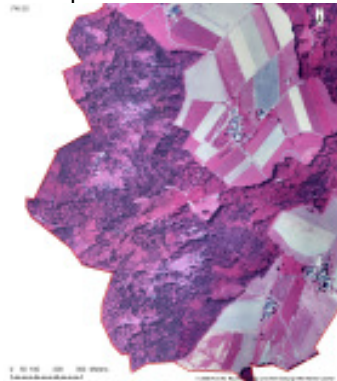
Bestand: Waldrand



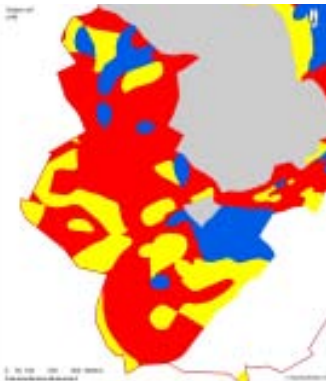
Bestand: Deckungsgrad



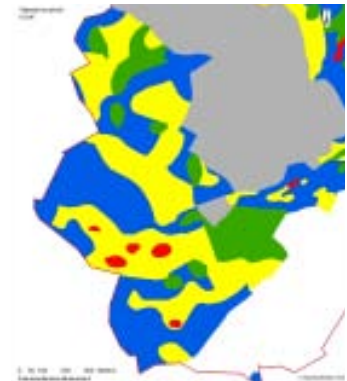
Orthophoto 2001



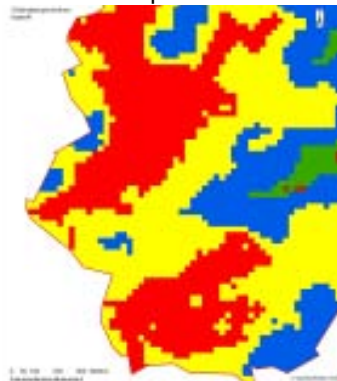
Standort: Bodensäure



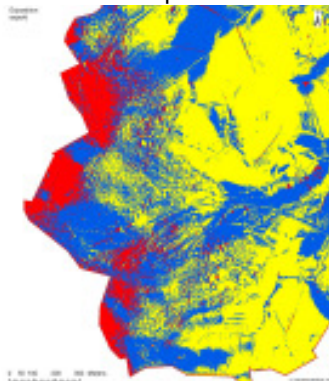
Standort: Wasserhaushalt



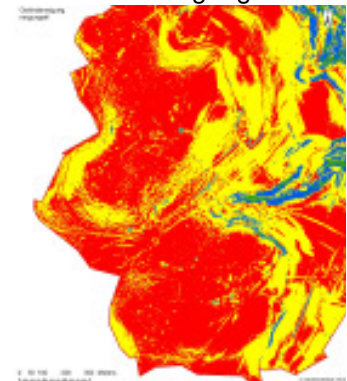
Standort: Exponiertheit



Standort: Exposition



Standort: Neigung



¹⁶Orthophoto: © 2006 Amt für Raumordnung und Vermessung ARV, Kanton Zürich, Faktoren: © 2006 SILVACONSULT AG

3.2 Stabilität Bestandesfaktoren (Bestandesstabilität)

Die Karte der Bestandesstabilität zeigt die Widerstandsfähigkeit (Stabilität) der Bestockung im Bezug auf den Einfluss von Stürmen auf. Es werden vier Stabilitätsklassen unterschieden. Die Bestandesstabilitätskarten für den Perimeter „Embrach“ und „Knonauseramt“ werden auf den folgenden Seiten präsentiert (Abb. 16 und Abb. 17). Die untenstehende Tab. 7 fasst den Flächenanteil nach Stabilitätsklassen zusammen.

Klasse	Embrach		Knonauseramt	
	[ha]	%	[ha]	%
Geringe Stabilität	84.5	15.1	120.1	10.3
Mittlere Stabilität	293.9	52.5	753.9	64.8
Hohe Stabilität	51.7	9.3	92.3	8.0
Sehr hohe Stabilität	126.1	22.5	195.5	16.8
Keine Aussage	3.4	0.6	1.2	0.1
Total	559.6	100.0	1163.0	100.0

Tab. 7: Bestandesstabilität. Flächenanteile nach Stabilitätsklassen

Der Aufbau der Karte basiert auf Rasterzellen von 2 x 2 m Grösse. Die Stabilitätswerte der Rasterzelle für die Bestände mit $h_{dom} > 15$ m bewegen sich zwischen 3.08 und 9.51. Für die direkt klassierten Bestände mit Oberhöhen von 10 – 15 m (k.o. Kriterium), bewegen sich Werten zwischen 2.3 und 6.5. Die Häufigkeitsverteilung der Stabilitätswerte für Bestände mit $h_{dom} > 15$ m, werden in der Abb. 14 (Embrach) und Abb. 15 (Knonauseramt) präsentiert.

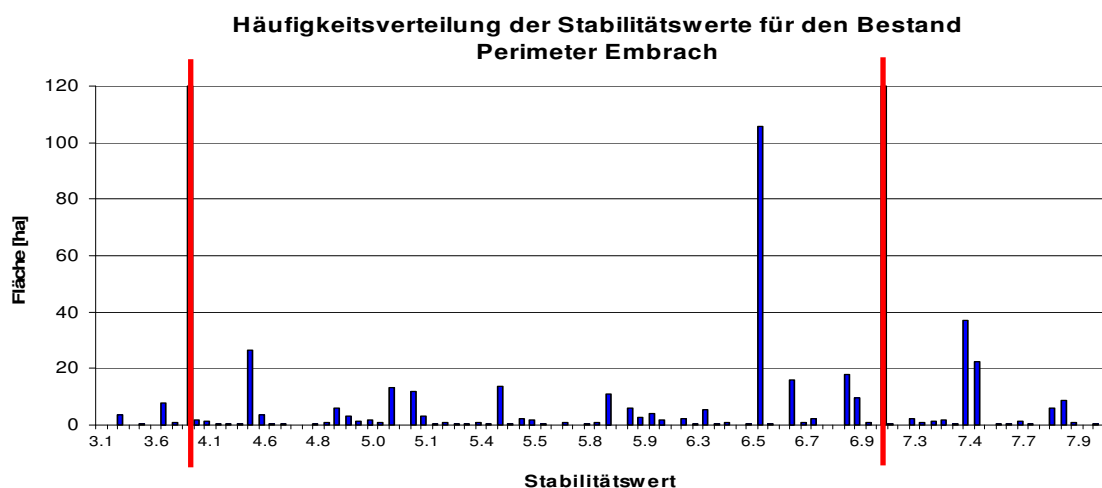


Abb. 14: Häufigkeitsverteilung der Stabilitätswerte für Bestände mit $h_{dom} > 15$ m, Embrach

Die Abb. 14 zeigt die Häufigkeitsverteilung der Stabilitätswerte für Bestände in Embrach, die höher als 15 Meter (h_{dom}) sind. Der Wertebereich reicht von 3.08 bis 8.27, mit 91 verschiedenen Werten. Die Klassengrenzen bei 4.0 und 7.0 sind mit roter Farbe eingezeichnet.

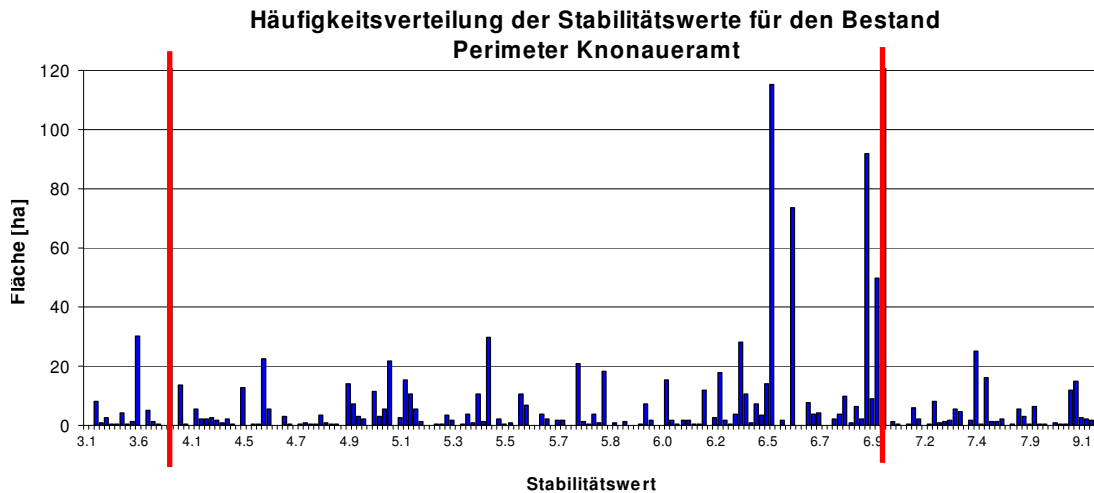


Abb. 15: Häufigkeitsverteilung der Stabilitätswerte für Bestände mit $h_{\text{dom}} > 15\text{m}$, Knonauseramt

Der Wertebereich im Perimeter „Knonauseramt“ (Abb. 15) ist im Vergleich zum Perimeter „Embrach“ nur geringfügig grösser. Während der minimale Wert mit 3.08 für beide gleich ist, ist der maximal erreichte Wert für den Perimeter „Knonauseramt“ 9.51 und für „Embrach“ 8.27. Der Wertebereich im Perimeter „Knonauseramt“ ist jedoch mit 192 verschiedenen Werten, im Vergleich zum Perimeter „Embrach“ mit 91 Werten, viel stärker differenziert.

Die Bestandesstabilitätskarte zeigt auf der Ebene von Rastern auf, wo sich aufgrund der Bestockung instabile bzw. stabile Bereiche befinden. Soll nun ein repräsentativer Wert für den Bestand (Polygon) errechnet werden, geschieht dies, wie im Kapitel 2.6.2 beschrieben über Flächenprozentage. Da sich aber mit Ausnahme des Faktors „Waldrand“ alle anderen Bestandesfaktoren auf den ganzen Bestand beziehen, fallen die Klassengrenzen der Stabilitätswerte weitgehend mit den Bestandesgrenzen zusammen.

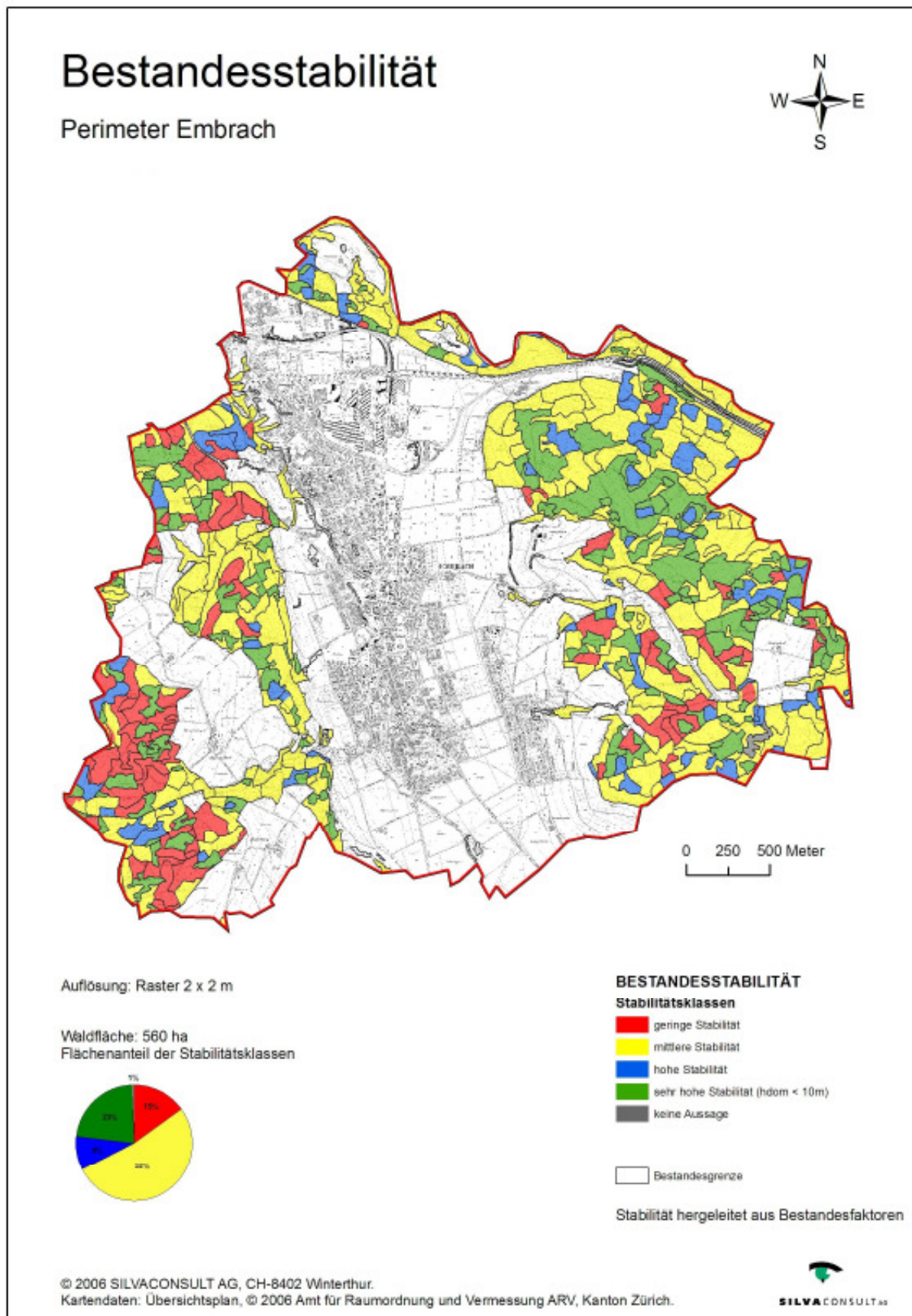


Abb. 16: Karte Bestandesstabilität Embrach

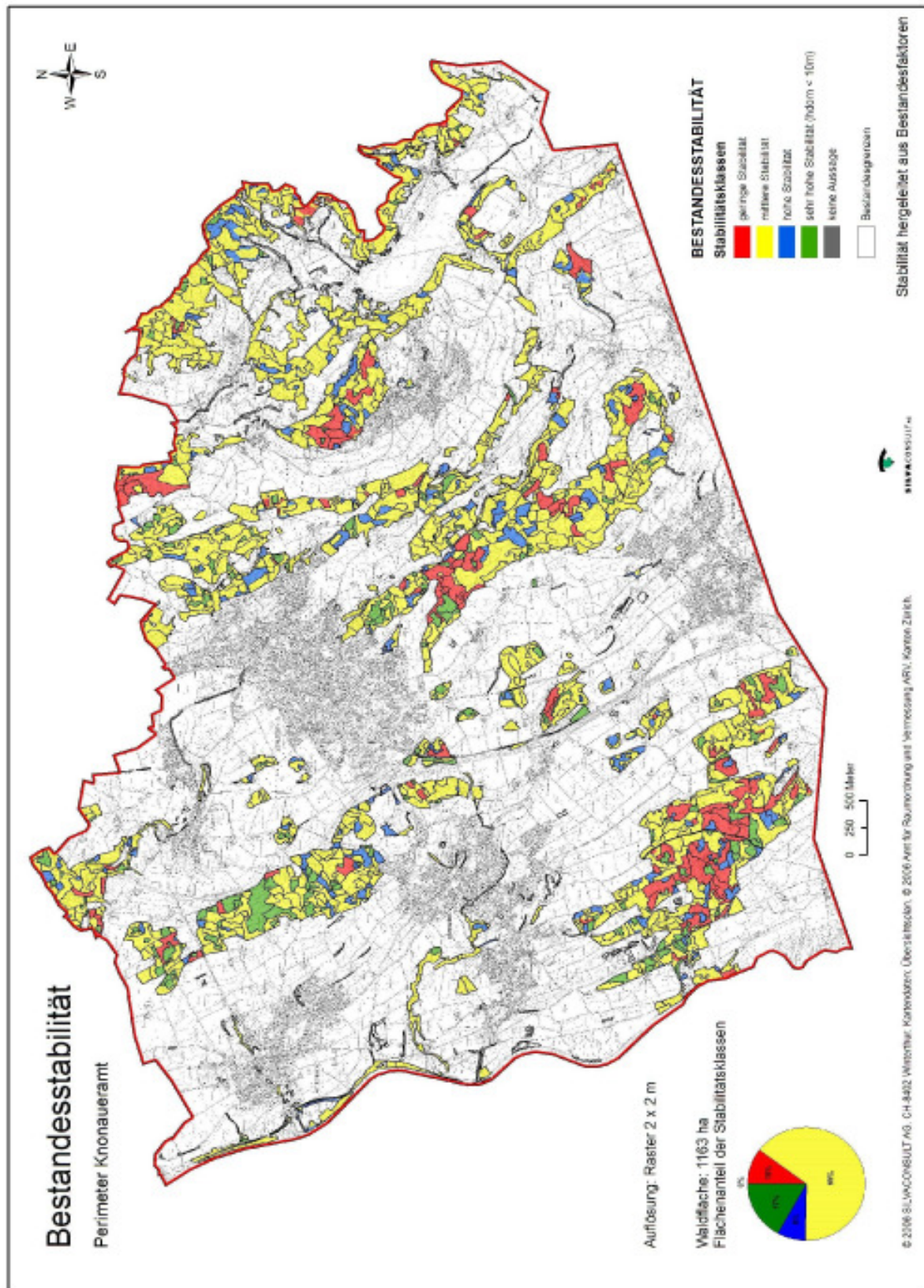


Abb. 17: Karte Bestandesstabilität Knonauseramt

3.3 Stabilität Standortsfaktoren (Standortstabilität)

Die Karte der Standortstabilität zeigt die Widerstandsfähigkeit (Stabilität) des Standorts im Bezug auf den Einfluss von Stürmen auf. Es werden 3 Stabilitätsklassen unterschieden. Die Karten der Standortstabilität werden für beide Perimeter auf den folgenden Seiten präsentiert (Abb. 19 und Abb. 21). Die untenstehende Tab. 8 fasst den Flächenanteil nach Stabilitätsklassen zusammen.

Klasse	Embrach		Knonaueramt	
	[ha]	%	[ha]	%
Geringe Stabilität	141.6	25.3	165.1	14.2
Mittlere Stabilität	340.9	60.9	831.6	71.5
Hohe Stabilität	72.5	13.0	144.5	12.4
Keine Aussage	4.6	0.8	21.8	1.9
Total	559.6	100	1163.0	100

Tab. 8: Standortstabilität. Flächenanteil nach Stabilitätsklassen

Die Häufigkeitsverteilungen der modellierten Standorts-Stabilitätswerte werden in Abb. 18 (Embrach) und Abb. 20 (Knonaueramt) dargestellt. Wiederum mit rot sind die Grenzen der gebildeten Stabilitätsklassen bei 4.0 und 7.0 eingezeichnet. Der Wertebereich ist für beide Perimeter der Selbe und reicht von 1 bis 9.75. Im selben Wertebereich hat aber der Perimeter „Knonaueramt“ mehr unterschiedliche Werte (561) als der Perimeter „Embrach“ (492).

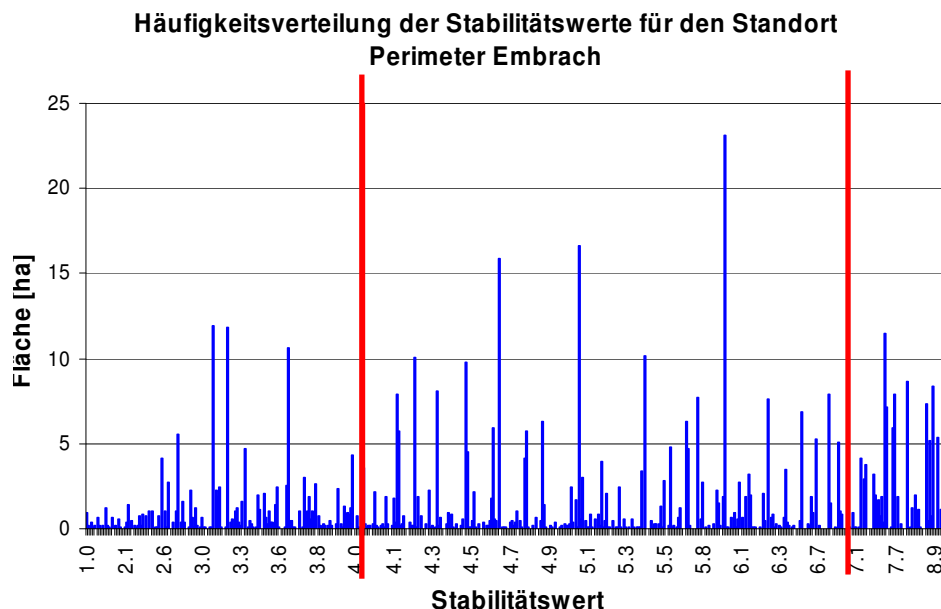


Abb. 18: Häufigkeitsverteilung der Stabilitätswerte für den Standort, Embrach

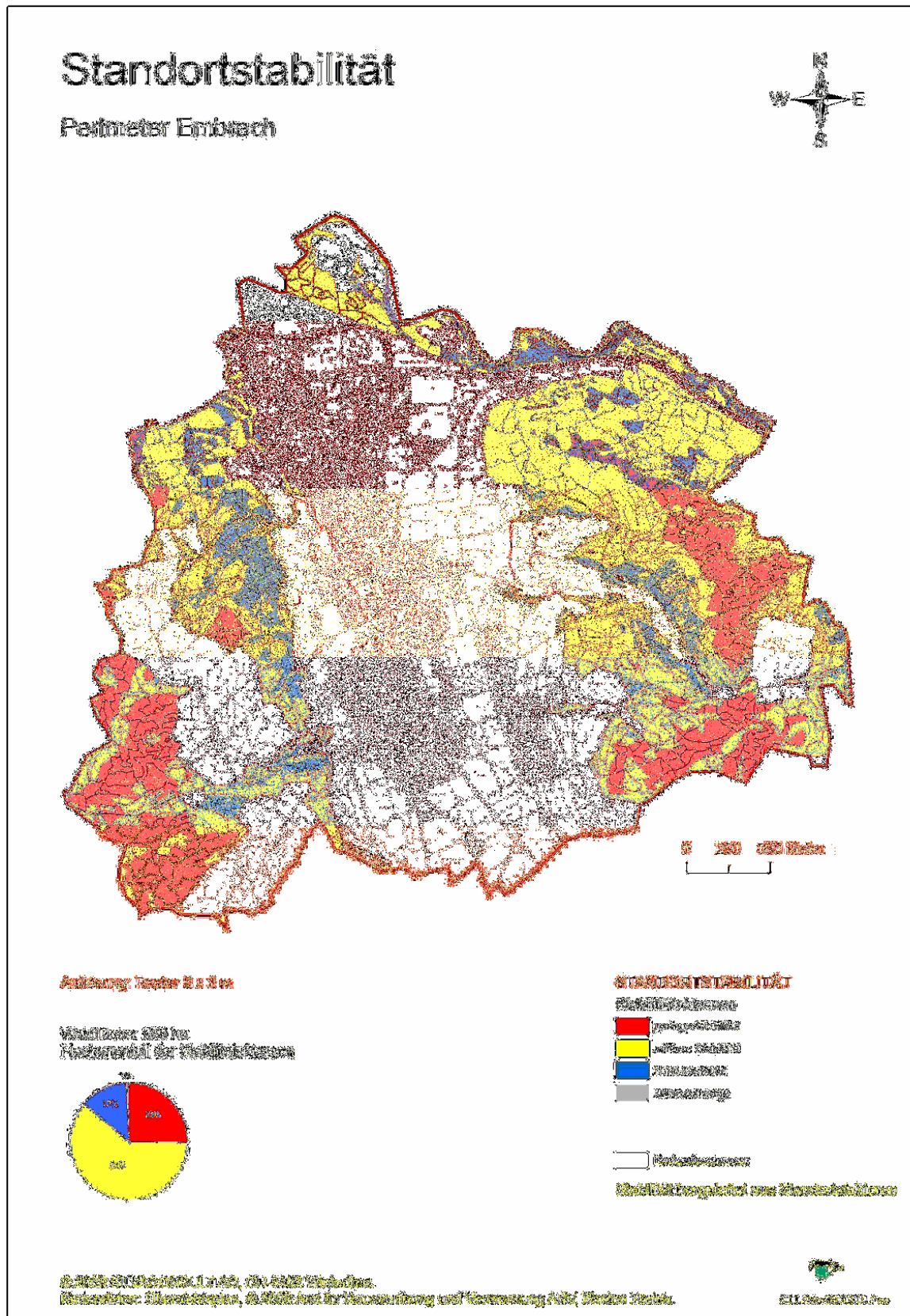


Abb. 19: Karte Standortstabilität Embrach

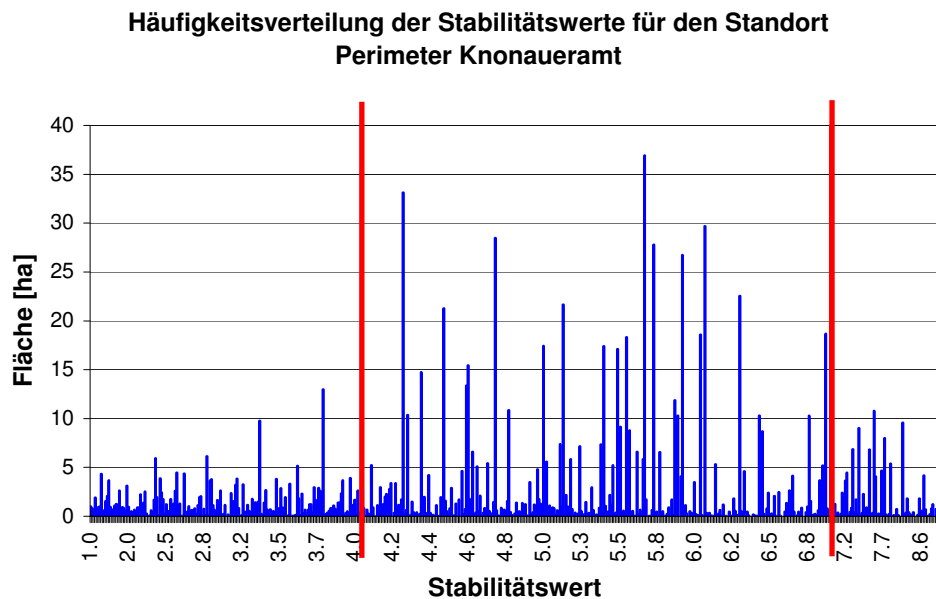


Abb. 20: Häufigkeitsverteilung der Stabilitätswerte für den Standort, Knonauseramt

Auch bei der Karte der Standortstabilität bezieht sich die Bewertung auf Rasterzellen (2 x 2 m). Im Unterschied zur Bestandesstabilität beziehen sich die hergeleiteten Daten nicht auf die ganzen Bestände (Polygone). Das heisst, dass unterschiedliche Zellwerte innerhalb eines Bestandespolygon die Regel sind. Um einen repräsentativen Wert auf Bestandesebene herzuleiten, muss der bestimmende Zellwert innerhalb des Bestandespolygons, wie im Kapitel 2.6.2 beschrieben, über Flächenkriterien bestimmt werden. Damit ist der Stabilitätswert des Standorts für den Bestand (Polygon) eindeutig festgelegt.

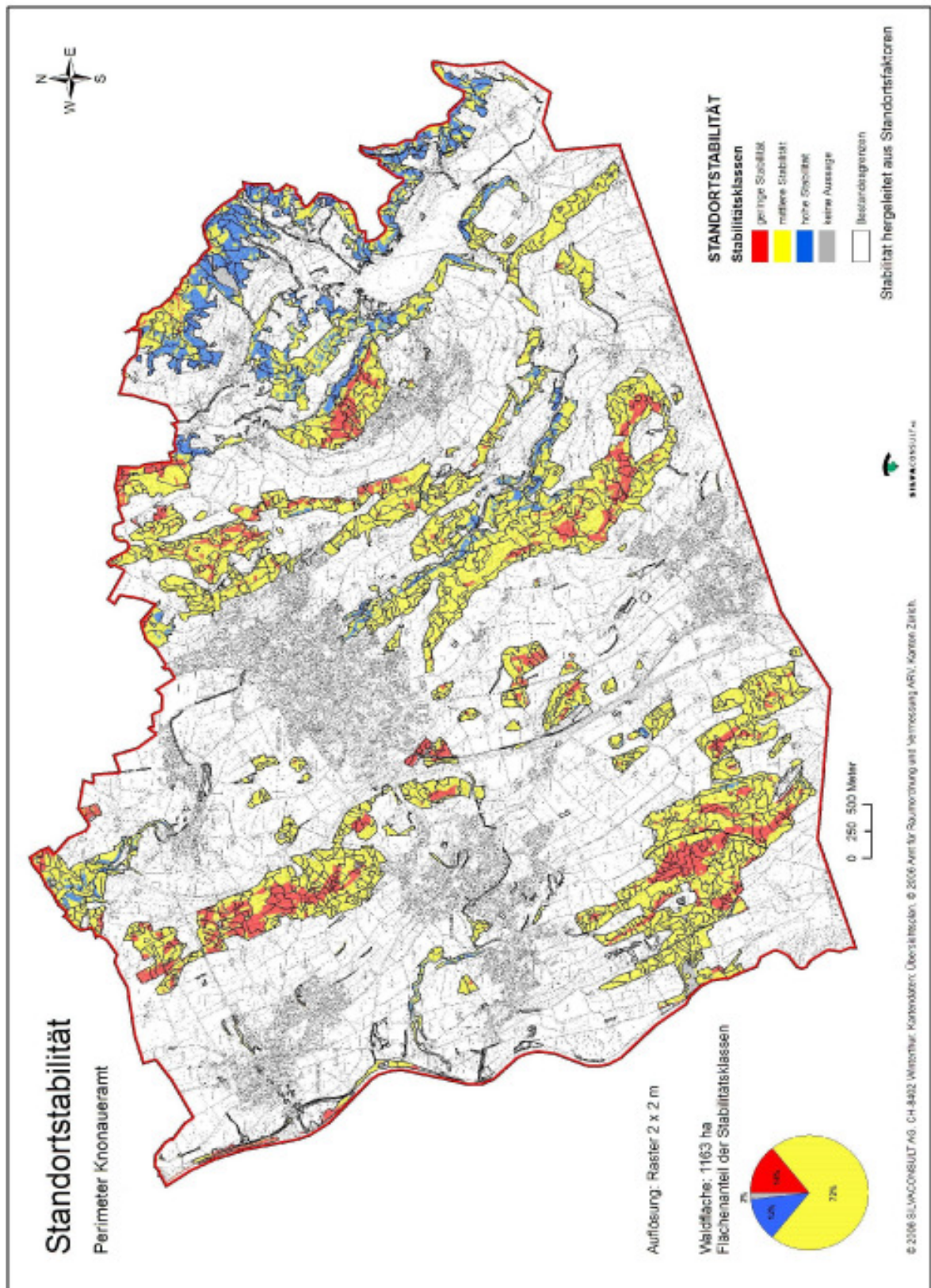


Abb. 21: Karte Standortstabilität Knonaueramt

3.4 Sturmstabilität (Gesamtstabilität)

In der Sturmstabilitätskarte verbinden sich Informationen der Standorts- und Bestandesstabilität zur Gesamtstabilität bezüglich Sturmeinwirkungen gemäss der Vorgehensweise in Kap. 2.5.2. Die Farben und Klasseneinteilungen entsprechen jenen der Karte der Standort- und Bestandesstabilität.

Die Karten der Sturmstabilität für die Perimeter „Embrach“ (Abb. 22) und „Knonaueramt“ (Abb. 23) werden auf den folgenden Seiten präsentiert. In der Tab. 9 werden die Flächenanteile nach Stabilitätsklassen zusammengefasst.

	Embrach		Knonaueramt	
Klasse	[ha]	%	[ha]	%
Geringe Stabilität	126.8	22.7	183.3	15.8
Mittlere Stabilität	248.9	44.4	673.7	57.9
Hohe Stabilität	51.7	9.2	92.3	7.9
Sehr hohe Stabilität	126.2	22.6	195.5	16.8
Keine Aussage	6.0	1.1	18.2	1.6
Total	559.6	100.0	1163.0	100.0

Tab. 9: Sturmstabilität. Flächenanteil nach Stabilitätsklassen

22.7% der Waldfläche im Perimeter „Embrach“ und 15.8% im Perimeter „Knonaueramt“ weisen eine geringe Stabilität auf (Tab. 9). Im Vergleich zur **Bestandesstabilität** alleine Tab. 7, entspricht dies einer durch den **Standort** verursachten Zunahme von 7.6 (Embrach) und 5.5 Flächenprozenten (Knonaueramt). Gleichzeitig nehmen die Waldflächen mit „mittlerer Stabilität“ ab, während sie für die anderen Klassen gleich bleiben (Tab. 7 und Tab. 8). Die Waldflächen von „mittlerer Stabilität“ machen für beide Perimeter mit 44.4% (Embrach) und 57.9% (Knonaueramt) den Hauptteil aus (Tab. 9).

Durch die Verrechnung der Standort- und Bestandesstabilität auf der Ebene von Rastern, liegt auch die Karte der Sturmstabilität im Rasterformat mit einer Auflösung von 2 x 2 m vor. Für jede Rasterzelle kann der Stabilitätswert für den Standort und den Bestand (Bestockung) angegeben werden. Darüber hinaus kann zurückverfolgt werden, wie der Stabilitätswert hergeleitet wurde, indem die Gewichte bzw. Werte der einzelnen Faktoren tabellarisch angehängt werden. Damit ist klar nachvollziehbar, wie die Gesamtbewertung einer Zelle zustande kommt. Exemplarisch wird das in der untenstehenden Tab. 10 dargestellt.

	Standort						Bestand							
ObjectID	EX	NE	TO	WH	PH	GST	KL	DG	AR	IR	BS	BH	NH	GBS
1387	0.6	0.8	4.5	1.3	0.5	7.7	0.2	0.2	0.2	2	0.6	2	1.9	7.36

Tab. 10: Stabilitätswert einer Zelle für Standort und Bestand¹⁷

¹⁷ Legende: EX = Exposition, NE = Neigung, TO = Geländeexponiertheit, WH = Wasserhaushalt, PH = Boden-pH, GST = Stabilitätswert Standort, KL = Kronenlänge, DG = Deckungsgrad, AR = Waldrand, IR = innere Ränder, BS = Struktur, BH = Bestandeshöhe, NH = Mischung, GBS = Stabilitätswert Bestand (Bestockung).

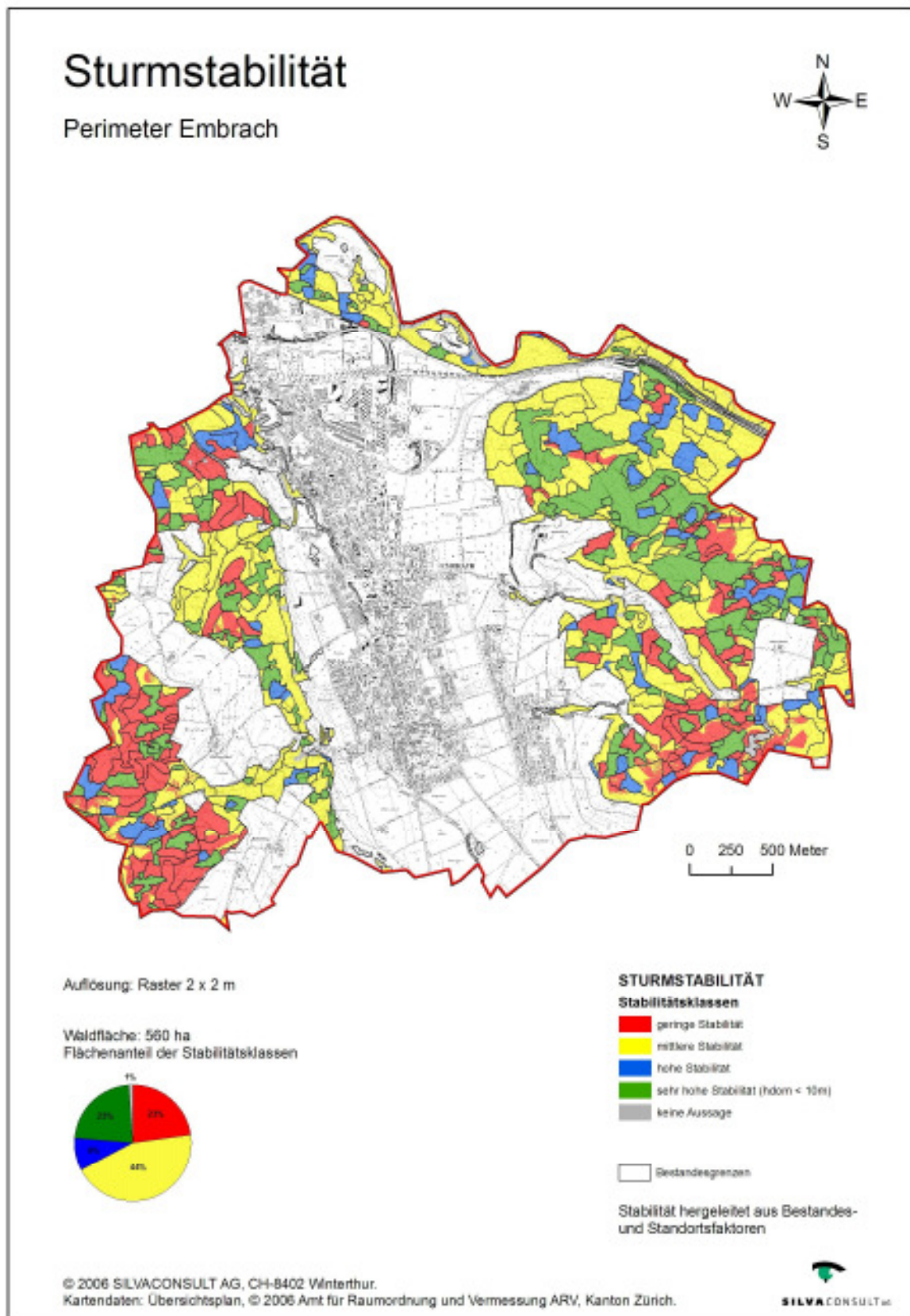


Abb. 22: Karte Sturmstabilität Embrach

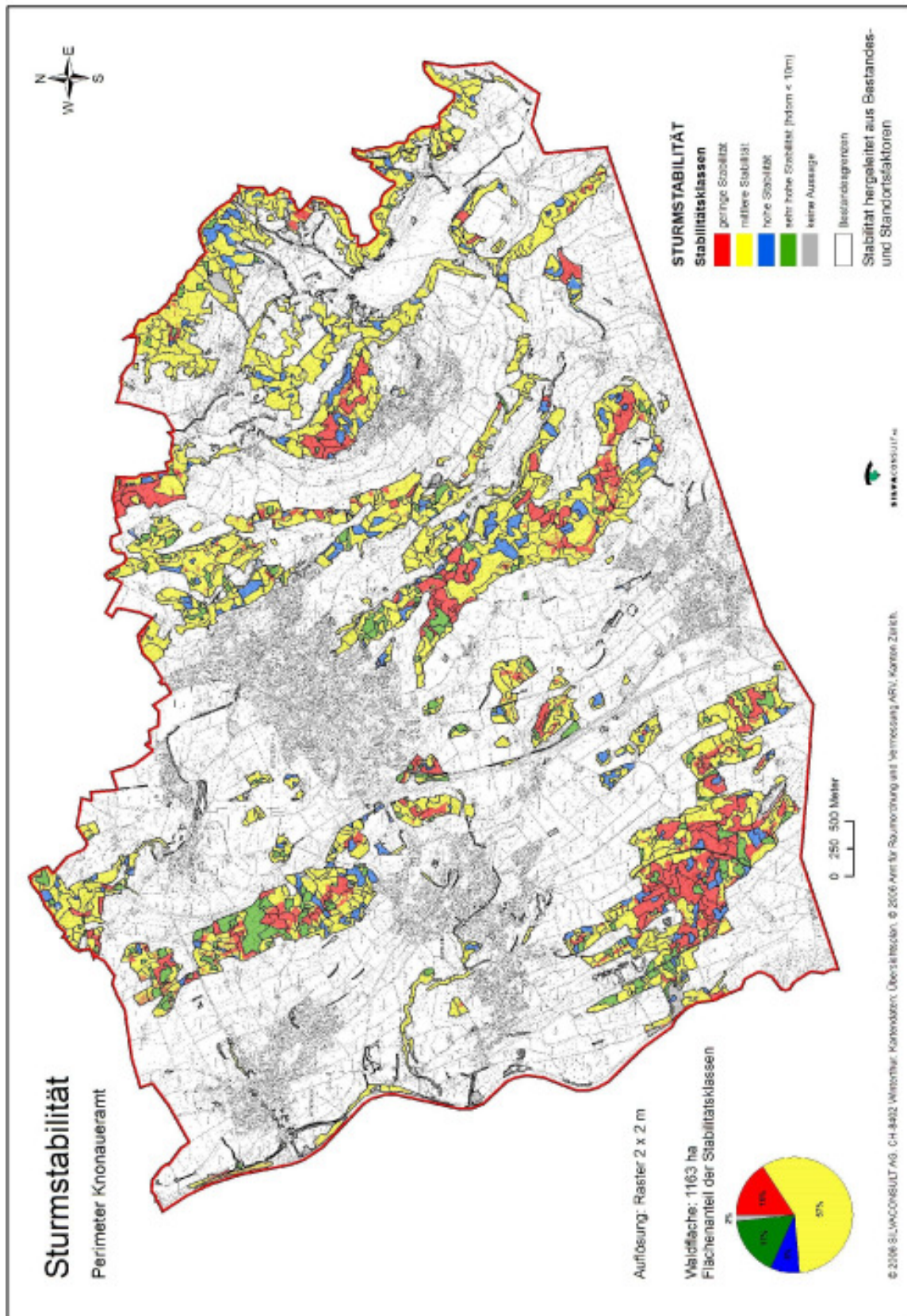


Abb. 23: Karte Sturmstabilität Knonauseramt

Im Beispiel in der Tab. 10 haben beide Stabilitätskomponenten Werte über sieben und gehören damit, sowohl alleine wie auch in der Kombination (Sturmstabilität), in die Klasse „geringe Stabilität“ (rot).

Die Modellierung der Sturmstabilität auf der Ebene von Rastern erlaubt eine detaillierte Betrachtungsweise unabhängig von den Bestandesgrenzen. Interessiert jedoch der Bestand, so kann aus den auf den Bestand hergeleiteten Standort- und Bestandesstabilitätskarten eine generalisierte Sturmstabilitätskarte abgeleitet werden (vgl. Kap. 2.6.2). Dazu müssen nur die berechneten Bestandeswerte des Standorts und des Bestandes klassiert und über die Matrix miteinander verbunden werden. Das Verfahren ist das Selbe wie auf der Ebene von Rasterzellen (vgl. Kap. 2.6.2). Die Abbildungen auf den folgenden Seiten zeigen für den Ausschnitt im Perimeter Embrach die detaillierte Sturmstabilitätskarte auf der Ebene von Rastern (Abb. 25) und die generalisierte Karte auf der Ebene von Beständen (Abb. 24). Die Tab. 11 fasst die damit verbundenen flächigen Veränderungen innerhalb der Stabilitätsklassen für den Ausschnitt im Perimeter Embrach zusammen.

	detailliert		generalisiert	
Klasse	[ha]	%	[ha]	%
Geringe Stabilität	49.8	53.5	56.2	60.4
Mittlere Stabilität	18.4	19.8	11.8	12.7
Hohe Stabilität	8.3	8.9	8.5	9.1
Sehr hohe Stabilität	16.6	17.8	16.6	17.8
Keine Aussage	0	0	0	0
Total	93.1	100.0	93.1	100.0

Tab. 11: Sturmstabilität: Flächenanteile nach Klassen für die detaillierte (Raster) und generalisierte (Bestände) Ebene, Ausschnitt Embrach

Durch die Generalisierung auf Bestandesebene nimmt der Flächenanteil der geringsten Stabilitätsklasse (rot) auf Kosten der mittleren Stabilitätsklasse (gelb) um 3.9% zu (Tab. 11). Die Flächenanteile der anderen Klassen bleiben beinahe konstant.

3.5 Validierung der Stabilitätskarten

Die Karten der Bestandes-, Standort- und Sturmstabilität wurden durch Sachverständige im Gelände überprüft und bewertet. Diese Expertengruppe setzte sich aus je einem Vertreter der am Projekt beteiligten Kantone, der SILVACONSULT AG sowie den zuständigen Revierförstern zusammen.

Einig war man sich dabei, dass die modellierten Stabilitätswerte und daraus abgeleiteten Klassen mit den persönlichen Einschätzungen vor Ort übereinstimmten und Sinn machten.

Sturmstabilität auf Bestandes- (generalisiert) und Rasterebene (detailliert) für den Ausschnitt im Perimeter Embrach

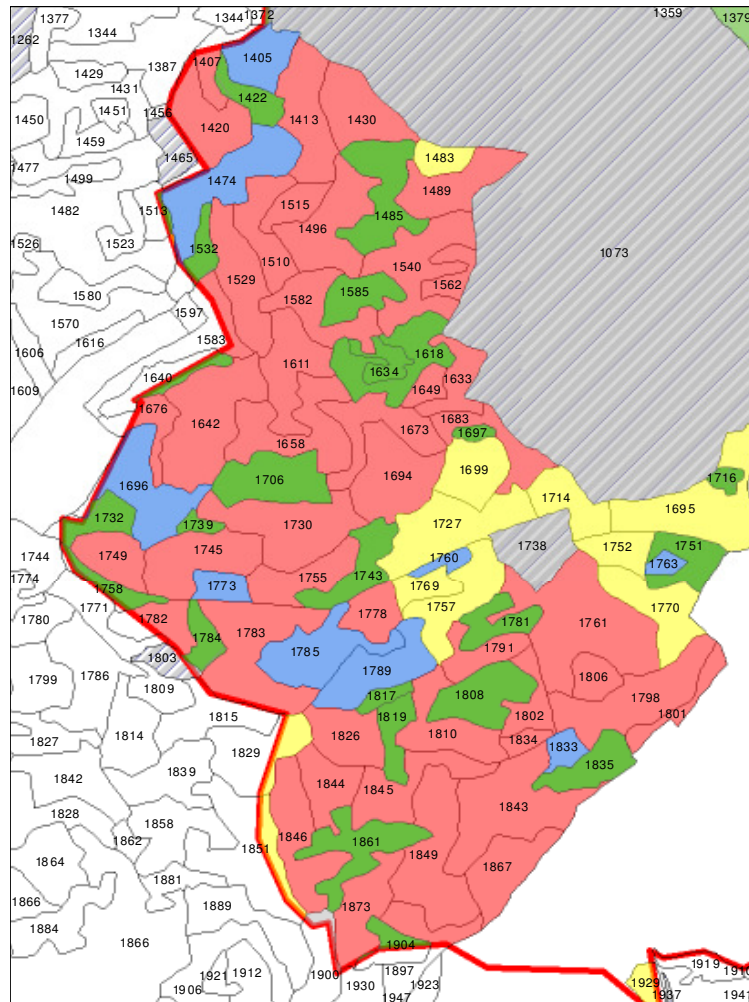


Abb. 24: Sturmstabilität auf Bestandesebene (generalisiert)

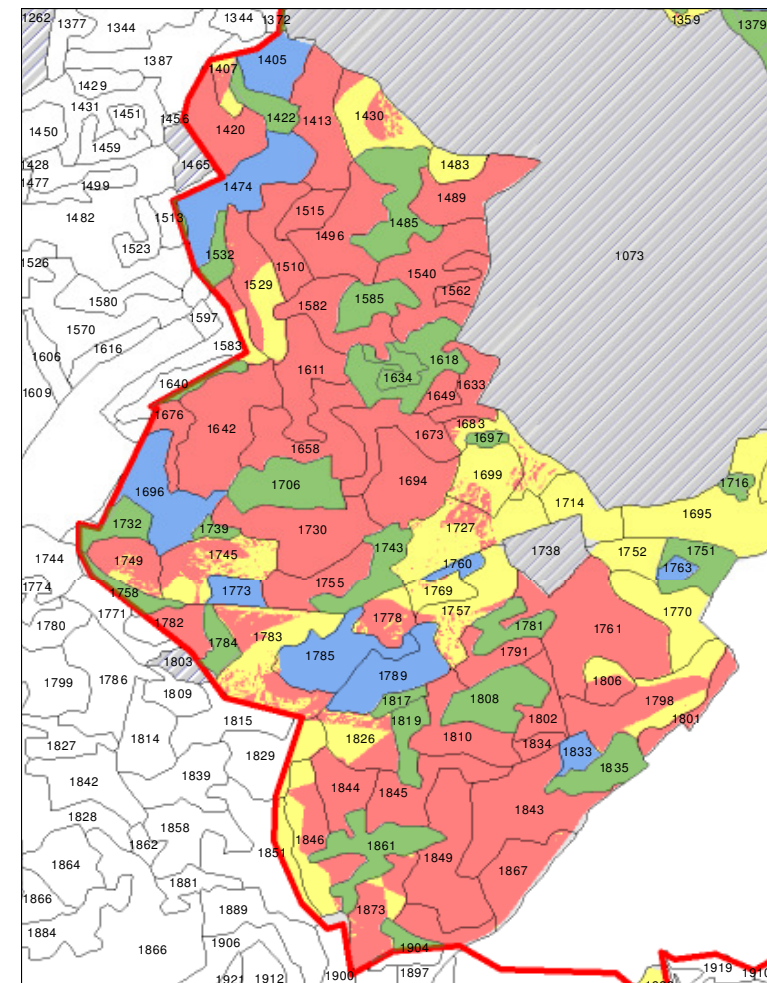


Abb. 25: Sturmstabilität auf Bestandesebene (detailliert)

Der Herbststurm vom 3. Oktober 2006 hinterliess im Perimeter Ebrach vereinzelte Streuschäden. Diese wurden grob kartiert und mit der modellierten Sturmstabilitätskarte überlagert. In 10 von 12 Fällen fielen diese Schäden in die Klasse „geringe Stabilität“ (rot). Je ein Schaden fiel in die Klasse „mittlere“ (gelb) und „hohe Stabilität“ (blau). Der eine Schaden in der Klasse „hohe Stabilität“ wies zwar bezüglich des Standorts eine geringe Stabilität auf, wurde aber aufgrund der Bestandeshöhe (14 m) direkt in die Klasse „geringe Stabilität“ eingeteilt.

Die existierenden Grundlagendaten, die ins Modell einfließen, erwiesen sich generell als von guter Qualität. Jedoch gab es vereinzelt Fälle, bei denen die aus Luftbildern kartieren **Bestandesfaktoren** nicht den Gegebenheiten vor Ort entsprachen. Diese Fehler wirkten sich dann auch auf die Bewertung der Sturmstabilität aus. In den meisten Fällen waren die Fehler jedoch auf das Alter der Daten zurückzuführen. Zwischen dem Zeitpunkt der Bestandesansprache und dem der Modellierung bzw. der Verifizierung vor Ort, waren im Extremfall bereits 5 Jahre vergangen (Kap. 2.4). Einige andere Fälle liessen sich darauf zurückführen, dass in Überhaltbeständen die Baumhöhenmessungen nicht konsequent gehandhabt wurden. Bei den einen Beständen wurden die Überhälter, bei den anderen die darunter liegende Bestockung gemessen. Zu guter letzt ist die Mischung zu nennen. Erfasst wurde zwar der Mischungsgrad nach Baumarten, nicht aber die Mischungsform. Das heisst, dass keine Informationen über die räumliche Verteilung der Baumarten vorliegen. Ein wegen des Mischungsgrades als „stabil“ eingestuftter Mischbestand kann jedoch aufgrund von grösseren Nadelholzaggregationen (Gruppe, Horst) durchaus instabil sein. Die Qualität der modellierten **Standortsfaktoren** wurde als gut beurteilt.

3.6 Zeitaufwand

Der in Abb. 26 dargestellte zeitliche Ablauf des Pilotprojektes konnte eingehalten werden. Der Zeitaufwand insgesamt bewegte sich im Rahmen der Planung. Der Aufwand für Datenbeschaffung und Aufbereitung war unterschätzt worden. Dies hat einerseits damit zu tun, dass die Datenquellen zuerst von verschiedenen Stellen zusammengetragen werden mussten und andererseits weil ein Teil der Arbeiten extern durchgeführt wurden. Damit wurde die technische Umsetzung mit rund zweiwöchiger Verspätung in Angriff genommen. Ausserdem fiel diese Phase in die Hauptferienzeit, wodurch es immer wieder zu kurzen Unterbrüchen kam. Das führte dazu, dass die restliche Zeit, die für die Modellierungen zur Verfügung stand eher knapp bemessen war. Das Projekt konnte jedoch termingerecht auf Ende Oktober abgeschlossen werden.

		2006						
Pilotprojekt: Sturmstabilität		April	Mai	Juni	Juli	Aug.	Sept.	Okt.
Projektmanagement								
Datenbeschaffung und Aufbereitung								
Kalibrierung Modell								
Technische Umsetzung Modell								
Modellierung								
Validierung								
Schlussbericht								

Abb. 26: Projektablauf

4 DISKUSSION

4.1 Sturmstabilitätsmodell

Das Modell zur Beurteilung der Sturmstabilität war vorgängig zum Pilotprojekt entwickelt worden. Eine der Zielsetzungen des Pilotprojektes war es, die Tauglichkeit des Modells zu überprüfen.

Die Auswahl der einzelnen Stabilitätsfaktoren für das Modell und vor allem deren Gewichtungen waren mit verschiedenen Experten diskutiert worden. Es gibt Faktoren mit sehr hohem Gewicht (z.B. Bestandeshöhe) und solche mit niedrigem Gewicht (z.B. Kronenlänge). Es stellte sich daher die Frage, ob auf die niedrig gewichteten Faktoren nicht auch verzichtet werden könnte, ohne dass die Ergebnisse wesentlich verändert würden. Dies ist für jeden einzelnen der niedrig gewichteten Faktoren zu bejahen. In ihrer Summe jedoch nicht. Sollte für einen niedrig gewichteten Faktor keine Daten zur Verfügung stehen, so ist für jedes Projekt im Einzelnen vorgängig zu entscheiden, ob der Merkmalskatalog angepasst werden soll oder nicht. Generell sollten alle Faktoren mitberücksichtigt werden, insbesondere wenn die Daten dafür ohnehin vorhanden sind. Mit Ausnahme der LIDAR Daten waren im Kanton Zürich alle Daten vorhanden.

Die Trennung von Bestandes- und Standortfaktoren hat sich im Hinblick auf die Schadenprävention bewährt. Je nach Situation kann die Stabilität des Bestandes oder des Standorts alleine oder als Kombination (Gesamtstabilität) beurteilt werden. Die Herleitung der Stabilitätswerte lässt sich jederzeit zurückverfolgen. Die Bewertung des **Standorts**, getrennt von den Bestandesfaktoren, liefert zusätzliche Informationen zu den bestehenden Standortkartierungen, insbesondere für die Verjüngungsplanung und Bestandesbegründung. Die Trennung der beiden Einheiten macht auch aus physikalischer Sicht Sinn. Die Bestandesfaktoren unterscheiden sich von den Standortfaktoren hinsichtlich ihrer zeitlichen Dynamik wie auch in der Beeinflussbarkeit. Während die Bestandeseigenschaften dynamischen Prozessen unterliegen, die vom Mensch direkt beeinflusst werden können, sind die Standortseigenschaften eher statischer Natur.

Die Gewichtungen und deren Verrechnung zu Stabilitätswerten für den Standort und den Bestand sind flexibel und können den jeweiligen Verhältnissen angepasst werden (z.B. Windrichtung, Region). Der Wertebereich reicht theoretisch jeweils von 1 bis 10 für jeden Bestand oder jede Rasterzelle, je nach Vorgehensweise. Das heisst, die Stabilität liesse sich auch als kontinuierliche Grösse kartographisch darstellen. In der Einteilung in Klassen ist man grundsätzlich frei. Sie kann je nach Situation gehandhabt oder angepasst werden. Sie orientiert sich aber grundsätzlich an der Zweckmässigkeit und an der Zielsetzung des Projektes. Um betriebliche Schwerpunkte zu setzen, macht es zum Beispiel keinen Sinn, die Klassen so zu wählen, dass mehr als die Hälfte des Waldes in die instabilste Klasse zu liegen kommt. Andererseits dürfen schlecht gepflegte Wälder auch nicht dazu verleiten, die Klassengrenzen einfach nach unten zu verschieben. Einmal festgelegt, sollten die Klassengrenzen nicht mehr verändert werden. Damit wird die Kontinuität gewährleistet und der Vergleich zwischen unterschiedlichen Gebieten ist möglich. Aufgrund der Stabilitätswerte kann man innerhalb der Klassen immer noch Prioritäten setzen. Die Klasseneinteilung ist also nicht grundsätzlich festgelegt. Die im

vorliegenden Projekt gewählte Einteilung in 4 Stabilitätsklassen hat sich jedoch im Hinblick auf die Schadensprävention als zweckmässig erwiesen.

Die Klasseneinteilung auf Bestandesebene erfolgte auf zwei unterschiedlichen Wegen. Für Bestände über 15 Meter Oberhöhe waren die hergeleiteten Stabilitätswerte für den Standort und den Bestand ausschlaggebend. Für Bestände unter 15 m Höhe war alleine die Oberhöhe für die Klasseneinteilung ausschlaggebend (k.o. Kriterium). Zwar wurden auch Stabilitätswerte für die Bestände von 10 – 15 m Höhe hergeleitet, jedoch hat sich gezeigt, dass nur sehr wenige Bestände aufgrund des Stabilitätswertes in eine instabilere Klasse hätten eingeteilt werden müssen. Es hat sich deshalb als zweckmässig erwiesen, diese Bestände direkt über die Oberhöhe zu klassieren, wie auch die Bestände, die niedriger als 10 m waren.

Grundsätzlich lässt sich die Sturmstabilität auf zwei Ebenen ansprechen. Einerseits auf der Ebene von Bestandespolygonen (Abb. 24) anderseits auf der Ebene von Rasterzellen (Abb. 25). Welche der beiden Karten die hilfreichere ist, muss von Fall zu Fall entschieden werden. Möchte man eindeutige Bewertungen und Klassierungen für den Bestand herleiten, so ist die generalisierte Bestandeskarte die richtige. Geht es darum - unabhängig vom Bestandesgedanken - möglichst differenzierte Informationen zu erhalten, so ist die Karte auf der Ebene von Raster die bessere Lösung. Da sich der Bezug auf die Bestandesebene jederzeit aus der Rasterkarte herleiten lässt, bildet die letztere die Hauptkarte.

Das Modell ist somit in seiner Struktur, in den Auswertungs- und Darstellungsmöglichkeiten flexibel. Es kann sowohl der Datenlage, als auch regionalen Gegebenheiten angepasst werden. Wichtig ist die Transparenz des Modells für allfällige Zeitreihen oder Quervergleiche.

4.2 Grenzen des Modells

Das Modell enthält nur Faktoren, für die es Grundlagendaten gibt. Es fehlen z.B. Informationen über den Gesundheitszustand oder die Art der Verjüngung. Bei der Interpretation der Ergebnisse müssen lokale Kenntnisse über solche relevante Sachverhalte mit berücksichtigt werden. Die Stabilitätskarten ersetzen demzufolge den Förster nicht. Sie sind aber ein Hilfsmittel für die Planung, die Entscheidungsfindung und das Setzen von Prioritäten auf betrieblicher und überbetrieblicher Ebene.

Das ganze Verfahren zur Bestimmung der Sturmstabilität basiert auf vorhandenen Daten. Diese wurden nicht im Hinblick auf die Sturmstabilität erhoben, sondern primär für andere Zwecke. Die Qualität oder die Aktualität der Daten ist von grosser Bedeutung für die Relevanz der Ergebnisse. Sind die Bestandeskarten oder die LIDAR Daten veraltet oder von unterschiedlichem Alter, gibt es Verzerrungen in den Ergebnissen, die mehr oder weniger von der Realität im Wald abweichen. Massnahmen im Wald, wie auch das Wachstum, verändern den Waldzustand. Diese Dynamik wird vom Modell noch nicht berücksichtigt. Das Modell ist derzeit ein statisches.

Ein Beispiel hierfür ist die Bestandeshöhe, die ein hoch gewichtetes Merkmal ist. Zehn Meter Oberhöhe ist die Grenze, von der an das Merkmal als stabilitätsmindernd klassiert wird. Bei dieser Oberhöhe haben die meisten Baumarten auf den Hauptstandorten einen sehr hohen jährlichen Zuwachs. Das heisst, dass die Bestände, die zum Zeitpunkt der Datenaufnahme (LIDAR, Bestandeskarten) noch deutlich unter dieser Oberhöhe gewesen waren, innerhalb weniger Jahre diese Grenze überwachsen und so in eine andere Stabilitätssituation kommen können. Dies könnte man mit einer Dynamisierung des Modells auffangen.

4.3 Technische Umsetzung

Die technische Umsetzung beinhaltete die Sammlung der relevanten Daten, ihre Aufbereitung, Auswertung sowie die Implementierung des Modells in einem GIS. Dies ist mit sehr guten Ergebnissen gelungen. Die Bestandesmerkmale Höhe, Baumartenmischung, Deckungsgrad und Struktur konnten direkt aus der digitalen Bestandeskarte übernommen werden. Aus der digitalen Standortkarte konnte die Bodenacidität und der Geländewasserhaushalt abgeleitet werden. Dazu mussten aber die standörtlichen Einheiten (pflanzensoziologische Einheiten) über die Ökogrammeinteilung interpretiert werden. Aus dem digitalen Geländemodell wurden Exposition und Neigung mit Standardfunktionen des GIS abgeleitet. Als Mass für die Exponiertheit wurde der TOPEX angewendet.

4.3.1 Stabilitätsfaktoren

Mit Ausnahme der Kronenlänge liessen sich alle für die Modellierung notwendigen Parameter aus den bestehenden Datensätzen herleiten. Dies ist ein grosser Vorteil, müssen doch keine zusätzlichen Daten erhoben werden. Abgesehen von der Geländeexponiertheit sind es auch alle Stabilitätsfaktoren, die den Forstverantwortlichen hinreichend bekannt sind. Dies fördert die Akzeptanz unter den Anwendern. Ausserdem können die bestehenden Datensätze so einer neuen Nutzung zugeführt werden.

Die Beurteilung der **Geländeexponiertheit** mit dem TOPEX hat sich in den Nachbarländern bewährt und wurde nach unserem Wissen in der Schweiz erstmals angewandt. Unsicherheiten bestanden vor allem darin, ob der TOPEX im topografisch stark gegliederten Gelände, wie es in der Schweiz öfters vorkommt, vernünftige Resultate liefern kann. Deshalb wurde der TOPEX auch für drei unterschiedliche Distanzen berechnet. Obwohl das Modell mit der Distanz von 2000 m für beide Perimeter die besten Ergebnisse lieferte (Abb. 9 bis Abb. 12), gab es doch Unterschiede. Im topografisch stärker gegliederten Perimeter „Knonauseramt“ unterschieden sich die Modelle mit einer Topex Distanz von 1500 und 2000 m bezüglich Bestimmtheitsmass für die Regressionsfunktion nicht, während sie sich im Perimeter „Embrach“ klar unterschieden. Daraus lässt sich schliessen, dass die Grenzdistanz für neue Gebiete vorgängig getestet werden muss und dass - tendenziell - je stärker das Gelände gegliedert ist, die Distanzen umso kürzer gewählt werden müssen. In Anbetracht der Resultate, wäre es vielleicht sinnvoll noch weitere Distanzen zu testen. Obwohl ein Terrainmodell mit einer Rasterauflösung von 2 x 2 m zur Verfügung gestanden hatte, wurden die Berechnungen mit dem Terrainmodell DHM25 mit einer Auflösung von 25 x 25 m durchgeführt. Der Grund dafür war einerseits, dass die Berechnungen von Zelle zu Zelle sehr recheninten-

siv waren, andererseits war kaum zu erwarten, dass mit einer feineren Auflösung bessere Resultate hätten erzielt werden können.

Dem Wind zugekehrte **innere Ränder** (Luv) beeinträchtigen die Sturmstabilität in erheblichem Masse. Im Modell sind sie deshalb stark gewichtet. Innere Ränder (Steilränder, Lücken) wurden bisher nicht standardmässig erfasst. Für die erfolgreiche Umsetzung des Verfahrens war es daher entscheidend, dass die Herleitung aus den bestehenden Datensätzen gelang. Die „inneren Ränder“ wurden aus einem Oberflächenmodell generiert, das aus den LIDAR Rohdaten abgeleitet wurde. Da die LIDAR Daten im laublosen Zustand erhoben worden waren, musste jedoch in den vom Laubholz dominierten Bereichen auch die Orthophotos und Bestandeshöhen aus der Bestandeskarte für die Herleitung des Oberflächenmodells herangezogen werden. Das erzeugte Oberflächenmodell mit einer Auflösung von 1 x 1 m ist daher aus der Kombination dieser Daten entstanden. Die exponierten Steilränder und Lücken wurden mit hoher Genauigkeit detektiert.

Steilränder können, sofern Informationen zur Bestandeshöhe bekannt sind, auch aus den digitalen Bestandeskarten abgeleitet werden. Auch diese Methode wurde im vorliegenden Projekt umgesetzt. Der Vergleich mit den aus LIDAR Daten und Orthophotos abgeleiteten Rändern zeigte jedoch, dass wegen der Generalisierung der Bestandeskarte einige potenzielle Anrissstellen nicht erkannt wurden. Ausserdem sind **Bestandeslücken** nur mit der Variante LIDAR-Daten/Orthophotos detektierbar. Das aus diesen Daten abgeleitete Oberflächenmodell ist umso wichtiger, je mehr Lücken in den Waldgebieten existieren. Nur wenn keine oder sehr wenige Lücken existieren und Informationen über die Bestandeshöhen in einem Gebiet vorhanden sind, kann unter Umständen auf das Oberflächenmodell verzichtet werden. Die Genauigkeit wird aber auch dann hinter denen der LIDAR Daten liegen. Für die beiden Versuchsflächen im Kanton Zürich waren die LIDAR Daten von grosser Bedeutung.

Der Effekt von **Waldaussenrändern** wirkt sich auch auf die Nachbarbestände aus. Dem wurde mit der Bildung von unterschiedlichen Gefährdungszonen hinter dem windexponierten Waldrand Rechnung getragen. Als einziger **Bestandesfaktor** bezieht sich dieser deshalb nicht auf die Bestandespolygone selber. Ein ähnliches Vorgehen wäre grundsätzlich auch für die „inneren Ränder“ denkbar. In erster Linie wirken sich Lücken und Steilränder aber auf den Bestand aus, in dem sie vorkommen. Über zonale Effekte, über die Bestände hinaus, ist aus der Literatur nur wenig bekannt. Deshalb beziehen sich die Auswirkungen der inneren Ränder im Gegensatz zu den Waldrändern auf die Bestände bzw. Bestandespolygone selber.

Der einzige Faktor der sich nicht aus den bestehenden Daten ableiten liess, war die **Kronenlänge**. Die Kronenlänge hätte aus den LIDAR Rohdaten abgeleitet werden sollen. Aufgrund der Befliegung im laublosen Zustand liessen sich Kronenlängen aus den LIDAR Daten für das Laubholz nicht ermitteln. In den wenigen vom Nadelholz dominierten Beständen wurden die Lichtkronenlängen aus dem für diesen Zweck generierten Oberflächenmodell mit einer Auflösung 0.5 x 0.5 m hergeleitet, im Gelände jedoch nicht verifiziert. Die Kronenlänge erhält im Modell ein geringes Gewicht. Um im Modell trotzdem nicht auf diesen Stabilitätsfaktor verzichten zu müssen, wurde für alle Bestände mit dem stabilsten Wert für die Kronenlänge modelliert.

4.3.2 Schwierigkeiten der technischen Umsetzung

Die technische Umsetzung des Pilotprojektes in Zusammenarbeit mit der Abteilung Wald der Baudirektion des Kantons Zürich verlief ohne grössere Probleme. Das Pilotprojekt hat jedoch aufgezeigt, dass für die Modellierungen Rechner der neuesten Generation notwendig sind. Insbesondere an den Prozessor (CPU) und den Arbeitsspeicher (RAM) der Computer werden hohe Anforderungen gestellt. Als sehr rechenintensiv hat sich die Herleitung der Geländeexponiertheit (Topex) erwiesen. Um Randeffekte bei den Berechnungen des Topex zu vermeiden, müssen die eigentlichen Flächen um mindestens die Grenzdistanz erweitert werden (hier 2000 m). Auch die Verrechnungen und Modellierungen im GIS auf der Basis von Rasterzellen mit einer Auflösung von zwei Metern waren rechenintensiv, wodurch es immer wieder zu Wartezeiten kam. Vorzugsweise sollten rechenintensive Prozesse über Nacht ausgeführt werden. Um die Rechenzeit für grosse Waldflächen zu minimieren, könnte ausserdem mit gröberer Rasterauflösung gearbeitet werden. Beispielsweise mit Rastern von vier mal vier anstelle von zwei mal zwei Metern. Die Auswirkungen auf die Genauigkeit der Resultate müsste jedoch vorgängig geprüft werden.

4.4 Validierung

Die modellierten Ergebnisse wurden von Experten im Gelände überprüft. Die Ergebnisse waren plausibel, nachvollziehbar und von guter Qualität. Die Schwierigkeit bei der Validierung liegt jedoch darin, dass die modellierten Resultate erst nach einem Sturmereignis abschliessend beurteilt werden können. Nach dem Sturm vom 3. November 2006 konnte gezeigt werden, dass der überwiegende Teil der beobachteten Schäden auch tatsächlich in den als instabil bewerteten Beständen auftrat. Als absoluter Beweis kann dies zwar nicht gelten, die Resultate bestätigen jedoch die modellierten Ergebnisse. Für abschliessende Betrachtungen müssten ausserdem die das Windfeld beschreibenden Parameter bekannt sein. Dabei genügt es nicht nur die Windgeschwindigkeiten zu betrachten. Mindestens so entscheiden sind beispielsweise Turbulenzen, Böenfrequenzen oder die Dauer der Stürme. Diese Parameter sind jedoch in der Regel nicht bekannt. Dies ist eine allgemeine, vom Projekt unabhängige, Schwierigkeit bei der Validierung von Stabilitäts- oder Risikomodellen.

4.5 Zielerreichung

Die gesteckten Ziele wurden erreicht. Auf zwei für das schweizerische Mittelland repräsentativen Versuchsflächen im Kanton Zürich, wurden das Modell zur Beurteilung der Sturmstabilität angewandt und das Verfahren erfolgreich umgesetzt. Für insgesamt 1720 ha Wald wurden digitale Sturmstabilitätskarten erzeugt. Die Modellierungen wurden durch eine Expertengruppe im Gelände überprüft und die Resultate als richtig und sinnvoll erachtet. Die für das Modell benötigten Variablen liessen sich, mit Ausnahme der „Kronenlänge“, aus den bestehenden Datensätzen in guter Qualität herleiten. Das Verfahren ist operationell.

4.6 Kosten des Verfahrens

4.6.1 Kosten der Grundlegendaten

Das Verfahren zur Beurteilung der Sturmstabilität basiert auf vorhandenen Daten. Die verwendeten Datensätze (digitale Bestandskarte, digitale Standortskarte, Oberflächenmodell, Geländemodell) waren jeweils für ganz spezifische Zwecke erhoben worden. Die Kosten dieser Daten liegen in der Grössenordnung von ca. **150 Fr./ha**. Sie sind unter dem Aspekt der forstlichen Verwendung sehr unterschiedlich lange gültig. Bei den in Tab. 12 angegebenen Kosten handelt es sich um Erfahrungswerte. Sie sind abhängig von Gebietsgrösse, Aufnahmemethode, Massstab etc. Aus der Tabelle ergibt sich ein **jährlicher** Aufwand von **5 bis 10 Fr. pro Hektar** für die Grunddaten zur Stabilitätsbestimmung (einschliesslich Bestandskartierung).

Datengrundlage	absolute Kosten [Fr./ha]	Gültigkeit [Jahre]	Minimal	Maximal
			jährliche Kosten [Fr./ha/Jahr]	jährliche Kosten [Fr./ha/Jahr]
Oberflächenmodell	5 - 10	5 – 8	0.625	2
Bestandskarte (incl. Befliegung, stereo- skopischer Auswertung, Orthophoto)	30	5 - 15	2	6
Standortskarte (incl. Schlüsselerstellung)	100	40	2.5	2.5
Geländemodell	5 - 10	100	0.05	0.1
			5.175	10.6

Tab. 12: Kosten und Gültigkeit der verwendeten Grundlegendaten

Besonderes zeitkritisch sind die Bestandskarte und das Oberflächenmodell. Die Beschaffung oder Erhebung von neuen Daten alleine zum Zweck der Stabilitätsbestimmung mag aus der Sicht von Jahresbudgets unverhältnismässig erscheinen. In diesem Fall muss der primäre Zweck der jeweiligen Datenerhebung berücksichtigt werden. Dies kann zum Beispiel eine neue Kartierung der Bestände oder eine Aktualisierung der Bestandskarte bedeuten. Es ist dann zu diskutieren und zu prüfen, ob neue Methoden wie das Laserscanning sowohl dem Primärzweck einer Bestandskartierung wie auch dem Sekundärzweck der Bestimmung der Sturmstabilität dienen können. Die technologischen Entwicklungen sind auch bei Kosten-Nutzen-Überlegungen zu beachten.

4.6.2 Kosten der technischen Umsetzung

Das Verfahren zur Bestimmung der Sturmstabilität alleine, ohne die Datenerhebung, ist sehr günstig machbar. Es braucht eine gewisse Infrastruktur an Hard- und Software (GIS). Die Daten müssen bereitgestellt und das Modell muss den Projektbedingungen angepasst werden. Dann kann das Verfahren jedoch grossflächig weitgehend automatisiert angewandt werden, mit einer starken Auflagedegression zur Folge. Die Erfahrungen aus dem Projekt lassen für grossflächige

Anwendungen Kosten von **2 – 3 Fr. pro Hektar** realistisch erscheinen. Eine Wiederholung des Verfahrens ist alle 5 – 10 Jahre zu empfehlen. Die Kosten der Stabilitätsbestimmung liegen somit zwischen **0.20 und 0.60 Fr./ha/Jahr**.¹⁸

4.7 Kosten – Nutzen Betrachtungen

Das Verfahren zur Bestimmung der Sturmstabilität von Waldbeständen ermöglicht es, präventive Massnahmen zu ergreifen. Der monetäre Nutzen des Verfahrens ist wegen der vielen Einflussgrössen und wegen der Langfristigkeit der Effekte nur schwer zu quantifizieren (z.B. direkte Holzentwertung, Holzpreissenkung im Fall von Überangebot, Folgeschäden. Siehe auch BAUR et al. 2003a und BAUR et al 2003b).

Der Sturm Lothar verursachte in der Schweiz Schäden in Höhe von ca. **900 Mio. Franken**, oder ca. **1'000 Fr. pro ha** Wald im Durchschnitt der betroffenen Kantone¹⁹. Bei einer angenommenen Wiederkehrzeit von 13 Jahren (WSL & BUWAL 2001), ergeben sich somit Schäden in Höhe von rund **80 Fr./ha/Jahr** im Mittel. Darin sind die „normalen“, nicht orkanartigen Sturmereignisse noch gar nicht berücksichtigt! Zudem rechnet man im Zusammenhang mit der Klimaerwärmung mit einem weiter steigenden Sturmrisiko, insbesondere mit einer erhöhten Frequenz schwerer Winterstürme in West- und Mitteleuropa (SCHMIDT et al. 2006).

Unter Berücksichtigung dieser konservativen Annahmen würde sich die Anwendung des Verfahrens bereits „rentieren“, wenn nur **4 Prozent** der Schäden durch Prävention verhindert würden. Dieser Wert schliesst sogar die Vollkosten für eine neue Bestandeskartierung mit ein. Ohne Berücksichtigung der Kosten für die Grunddaten sind die Kosten für die technische Umsetzung mit **0.20 bis 0.60 Fr./ha/Jahr** fast vernachlässigbar (Kap. 4.6.2). Sie rentieren sich bereits, wenn ca. **0.5 Prozent** der Schäden verhindert werden können. Der Jahresumsatz der Forstbetriebe in der Schweiz liegt im Mittel bei 500 bis 1'000 Fr./ha/Jahr, im Mittelland eher am oberen Wert.

4.8 Hemmnisse für die Umsetzung

Was sind Hindernisse für die Umsetzung von Projekten zur Bestimmung der Sturmstabilität und für die Entwicklung von Präventionsstrategien?

Bei den einzelnen Waldeigentümern oder den Bewirtschaftenden besteht die Gefahr, dass das Risiko sehr seltener Ereignisse mit grossem Schadenpotenzial bei betrieblichen Entscheidungen unterschätzt und deshalb nicht berücksichtigt wird (HOLTHAUSEN et. al. 2004). Der Nutzen einer stabilitätsorientierten Waldbewirt-

¹⁸ Die Annahmen für die Rahmenwerte: Der Minimalwert von 0.20 Fr./ha ergibt sich bei Kosten von 2 Fr./ha alle zehn Jahre, der Maximalwert beträgt 0.60 Fr./ha bei Kosten von 3 Fr./ha alle fünf Jahre.

¹⁹ Zahlen aus BAUR et. al (2003a) S. 96. Der Wert setzt sich zusammen aus den Aufwendungen des Bundes und der Kantone (680 Mio. Fr.) und dem mittleren Vermögensverlust (225 Mio. Fr.). Nicht von Lothar betroffen waren die Kantone Graubünden, Tessin, Uri und Genf.

schaftung in Gestalt der Schadenprävention ist nicht so direkt ersichtlich, obwohl er beträchtlich sein kann.

Die Aussicht auf finanzielle Unterstützung im Schadenfall (Art. 28 und 37 WaG) und die umfangreiche Unterstützung bei früheren Ereignissen, senken bei den Waldeigentümern tendenziell den Anreiz, selbst vorzusorgen (HOLTHAUSEN & BAUR 2004).

Zudem ist die immer noch weit verbreitete kameralistische Denkweise zu nennen, oft verbunden mit fiskalpolitischen Rahmenbedingungen. Es wird in Jahresbudgets gerechnet. Wirkliche Kosten-Nutzen Berechnungen auch im Sinne von Investitionsrechnungen werden nicht durchgeführt. Das gleiche gilt für Risikokosten.

Der Präventionsgedanke müsste sich eigentlich auch aus allgemeinen Nachhaltigkeitsüberlegungen ergeben. Die Nachhaltigkeit als betriebliches und öffentliches Formalziel, die von der Forstwirtschaft als ureigenste Maxime hochgehalten wird, wird unseres Erachtens wegen zeitgeistiger kurzfristiger Denkweisen vernachlässigt.

Andere Hemmnisse können struktureller Art sein. Zum Beispiel die Zersplitterung des Waldeigentums, wenn es keine Betriebsplanpflicht mehr gibt, und wenn die Grundlagendaten nicht mehr eigentumsunabhängig grossflächig erhoben werden (z.B. Bestandskartierung). Besitzer von kleineren Waldflächen sind ausserdem oftmals nicht auf ein Einkommen aus dem Wald angewiesen.

5 AUSBLICK

5.1 Anwendung des Verfahrens auf grossen Flächen

Mit dem Pilotprojekt wurde die Operationalität des von der SILVACONSULT AG entwickelten Modells zur Beurteilung der Sturmstabilität bewiesen. Das Modell wurde mit einem geographischen Informationssystem (GIS) umgesetzt und lässt sich auf grossen Flächen weitgehend automatisiert anwenden.

Mit der Ansprache der Sturmstabilität auf Bestandesebene erhält der Forstdienst eine objektive Gesamtübersicht über die potentiell gefährdeten Bestände auf dem Kantonsgebiet. Die modellierten Ergebnisse sollten direkt in die betriebliche und überbetriebliche Planung einfließen. Beispiele für die Anwendung auf **überbetrieblicher Ebene** sind:

- Gesamtübersicht und Lokalisierung sturmgefährdeter Bestände im Kanton.
- Sturmstabilitätskarte als Grundlagendokument für die überbetriebliche Planung insbesondere der Ausscheidung von Waldfunktionen. Zum Beispiel zur Ausscheidung von Wäldern oder Beständen mit Wertholzproduktion in Verbindung mit optimaler Betriebssicherheit und entsprechender Pflege.
- Herleitung von Handlungsempfehlungen an die Praxis auf der Grundlage der Stabilitätsklassen und Ausarbeitung einer kantonalen Präventionsstrategie.
- Bei wiederholter Anwendung des Verfahrens kann der Erfolg von angeordneten bzw. subventionierten Massnahmen kontrolliert werden.
- Beratung für öffentliche Betriebe und private Waldeigentümer.

Auf **betrieblicher Ebene** kann die Sturmstabilitätskarte als Grundlage für die Planung eingesetzt werden. Beispiele hierfür sind:

- Entscheidungsgrundlage für die Massnahmen- und Dringlichkeitsplanung sowie das Setzen von Prioritäten.
- Kosten-Nutzen-Betrachtungen (Massnahmen - Sturmschäden, Folgeschäden).
- Konzentration der Mittel (Pflege, Finanzen) auf die am meisten Erfolg versprechenden Waldobjekte (Konzentrationsprinzip).
- Entscheidungsgrundlage bei der Schaffung von lichten Wäldern und Waldrändern (keine oder nur vorsichtige Eingriffe auf instabilen Standorten oder Beständen, Traufbildung nach Möglichkeit verhindern).
- Die Standortstabilitätskarte als Grundlage für Entscheidung bei der Verjüngungsplanung (Mischungsform, -art, grad, Naturverjüngung).
- „Hot Spots“. Wo muss nach Sturmereignissen am ehesten mit Schäden gerechnet werden. Wo wird zuerst kontrolliert (Prioritäten). Wenn auf diesen Flächen keine Schäden auftreten, kann auf die Kontrolle weiterer Flächen eventuell verzichtet werden.
- Sicherheitsaspekt: Wo liegen sturmgefährdete Bestände an von Fussgängern oder Autofahrern stark frequentierten Strassen oder Wegen?

5.2 Prävention

Das Sturmstabilitätsmodell wurde im Hinblick auf die Schadensprävention umgesetzt. Deshalb sollten auf der Basis der hergeleiteten Stabilitätsklassen Handlungsempfehlungen an die forstliche Praxis ausgearbeitet und Präventionsstrategien entwickelt werden. Als Anreiz wäre denkbar, dass stabilitätsfördernde Massnahmen abgegolten werden. Ein anderer Ansatz wäre, dass nicht Massnahmen, sondern Zielerreichungen abgegolten würden. Dazu müssten Sturmstabilitätsziele bzw. zu erreichende Standards festgelegt werden. Beispielsweise über die Stabilitätswerte. Um für Erfolgskontrollen einzelner Bestände nicht das ganze Modell neu berechnen zu müssen, könnte ein Formular entwickelt werden, das im Gelände ausgefüllt wird. Dieses Formular sollte dieselben Faktoren und Klassen enthalten, wie das Modell im GIS. Die Faktoren bzw. ihre Ausprägungen (Klassen) könnten dann vom Förster vor Ort angesprochen und der Stabilitätswert auf diesem Wege ermittelt werden. Zusätzlich könnten auch Faktoren mit eingebracht werden, die sich nicht automatisiert erheben lassen (z. B. der Gesundheitszustand). Mit Ausnahme der Geländeexponiertheit, handelt es bei allen Faktoren um wohlbekannte Merkmale zur Beschreibung des Standorts oder des Bestandes.

Die Forstverantwortlichen könnten weiter durch Schulungen oder Kurse im Hinblick auf die Sturmproblematik sensibilisiert und weitergebildet werden. Die Systematik des Merkmalkataloges ist auch ein Schulungsmittel um die Sturmstabilität eines Bestandes abzuschätzen (Checkliste).

5.3 Weiterentwicklung Verfahren

Das Verfahren ist flexibel und kann an die regionalen Gegebenheiten angepasst werden (inkl. Gebirge). Neue Forschungsergebnisse lassen sich integrieren. Werden die Ziele, die mit einer Stabilitätsansprache verfolgt werden, genauer definiert, kann das Modell weiter optimiert werden. Folgende Ansätze sind denkbar:

- Weiterentwicklung zu **Risikomodell**: Dazu müssten die das Windfeld beschreibende Faktoren ins Modell integriert werden und die Widerkehrzeit der Stürme statistisch hergeleitet werden. Dazu sind längere Zeitreihen und flächendeckende Messung notwendig, so dass bis zum heutigen Zeitpunkt die benötigten Faktoren nur unzureichend modelliert werden können. In dieser Richtung wird aber zur Zeit intensiv geforscht²⁰, so dass in naher Zukunft mit aussagekräftigeren Daten bzw. Modellen zu rechnen ist. Damit könnten Risiken abgeschätzt und potentielle Schäden monetarisiert werden.
- **Ökonomie**. Zum Stabilitätsmodell könnte ein Tool zur Unterstützung von ökonomischen Entscheiden, insbesondere Investitions- und Kosten-Nutzen Rechnungen, entwickelt oder bereits existierende Tools in das Verfahren integriert werden (z.B. RiskPlan, BUWAL/BABS 2005).
- Neue **Bezugsgrösse**: Bis zum heutigen Zeitpunkt beziehen sich Waldbeschreibungen auf betrieblicher Ebene in der Regel auf Bestände. Für die Beurteilung der Sturmstabilität sind diese nicht zwingend vorgegeben. Wird mit

²⁰ Laufende Dissertation von Tilo Usbeck (WSL), Meteo Schweiz, Université de Fribourg (Département Géoscience), Institut für Atmosphäre und Klima (IACETH) der ETH Zürich.

Oberflächenmodellen gearbeitet, die zum Beispiel aus LIDAR Daten abgeleitet wurden, können verschiedene Stabilitätsfaktoren, unabhängig von den Bestandespolygonen, auf der Ebenen von Einzelbäumen oder Kleinkollektiven erhoben werden (Bsp. Baumarten, Baumhöhe, Kronelängen, Lücken, Ränder). Das Modell könnte in Richtung der Einzelbaum- anstelle der Bestandesstabilität weiter entwickelt werden, was einer feineren Auflösung entspräche. Dies macht jedoch nur dann Sinn, wenn sich auch der Waldbau bzw. die Planung in diese Richtung entwickelt. Das heisst eine Abkehr von klar abgegrenzten Kollektiven, hin zum Einzelbaum ohne klare Bestandesabgrenzungen, wie dies zum Beispiel im Plenter- oder Dauerwald geschieht.

- **Funktionen:** Anstelle von Klassen könnten zumindest für die Faktoren mit stetigem Wertebereich Funktionen hinterlegt werden. Vor allem bei den stark gewichteten Stabilitätsfaktoren wie der Geländeexponiertheit oder der Baumhöhe, würde dies eine feinere Ansprache der Sturmstabilität ermöglichen.
- **Dynamisierung:** Das Modell ist zum heutigen Zeitpunkt rein statischer Natur. Damit wird mit dem Modell immer nur eine Aussage zu einem bestimmten Zeitpunkt gemacht. Die Ansprache der Sturmstabilität ist deshalb immer so aktuell wie ihre Daten. Eine Verbesserung in dieser Hinsicht könnte erreicht werden, indem man dynamische Modelle der Waldentwicklung ins Sturmstabilitätsmodell integriert. Damit könnten dann auch Aussagen über die möglichen Entwicklungen der Bestände im Laufe der Zeit gemacht werden.
- **Bodenfaktoren:** Das Sturmgefährdungspotential, das vom Standort ausgeht, wird stark von Bodenfaktoren beeinflusst (Azidität des Oberboden, Wasserhaushalt). Diese konnten nur indirekt über die pflanzensoziologischen Kartierungen hergeleitet werden. Weitere Informationen zum Boden wären wünschenswert (z. B. die Gründigkeit) und würden eine verfeinerte Ansprache des Standorts zulassen. Zwar existieren in einigen Kantonen einzelne Bodenkarten mit genügend kleinem Massstab, sie liegen jedoch nie flächendeckend und selten in digitaler Form vor. Die Bodeneignungskarte der Schweiz²¹ im Massstab 1:25'000 eignete sich zu diesem Zwecke nicht. Bodenfaktoren werden aber wohl auch in naher Zukunft nicht direkt zur Verfügung stehen.
- **Verknüpfung mit anderen Modellen:** Das Sturmstabilitätsmodell könnte in andere Modelle integriert werden. Beispielsweise in die Waldinformationssysteme WIS.2²² oder Geomail²³.

5.4 Weiterentwicklung Datenerhebung

Bestandeskarte / Laserscanning: Für die Anwendung des Verfahrens hat sich die Aktualität der Bestandesdaten als kritisch erwiesen. Sind die Bestandeskarten und die LIDAR Daten älter als fünf Jahre, so nehmen die Unschärfen in den Resultaten stark zu. Sollten die Bestände neu kartiert, oder die alten Bestandeskarte aktualisiert werden, so ist eine Kombination von Luftbild- und LIDAR-Befliegung vorstell-

²¹ Bodenkarte mit Erläuterung. Landeskarte der Schweiz 1:25'000. Eidgenössische Forschungsanstalt für Agrarökologie und Landbau (FAL), Zürich Reckenholz.

²² Waldbauliches Informationssystem (WIS.2) aufgebaut auf verschiedenen Planungsmodulen (Christian Rosset/ETH).

²³ Von der Firma FORSTWARE, Informationssysteme GmbH entwickelte Software zur Steuerung der Planung und Logistikkette.

bar. Es scheint durchaus Erfolg versprechend, die aufwendigen stereoskopischen Auswertungen von Luftbildern durch eine Interpretation von Orthobildern zu ersetzen, die zusätzlich durch die Höheninformation der LIDAR Daten unterstützt werden. Auch halbautomatische Verfahren sind vorstellbar, bei denen eine digitale Vorabgrenzung auf der Basis von LIDAR- und Luftbilddaten visuell überprüft wird. Innerhalb der ausgeschiedenen Bestände liessen sich die Hauptbestandesmerkmale digital klassifizieren²⁴.

5.5 Abschliessende Betrachtungen

Mit dem vorliegenden Projekt wurde eine Brücke zwischen der Forschung und der forstlichen Praxis geschlagen. Viele verteilt vorhandene Ergebnisse der Sturm-schadenforschung wurden zu einem Verfahren zusammengeführt und so direkt nutzbar gemacht. Abschliessend ist festzuhalten, dass das Verfahren zur Bestimmung der Sturmstabilität die Schwelle zur Operationalität klar überschritten hat. Das Modell hat sich als robust und flexibel erwiesen. Mit geringen Kosten können bereits vorhandene Daten einem erheblichen Zusatznutzen zugeführt werden. Hauptthemmnisse für die Anwendung sind, abgesehen von fehlenden Daten, vor allem administrativer und fiskalischer Natur. Es werden kaum wirkliche Kosten-Nutzen-Überlegungen im Sinne einer Investitionsrechnung durchgeführt.

Was das Verfahren vorwärts bringen kann, das ist die Verbindung mit aktuellen Bestandeskartierungen. Die verwendeten Oberflächenmodelle lassen sich auch für diese Zwecke nutzen. Die Aktualität der Grunddaten erhöht auch diejenige der Stabilitätsbeurteilung.

Hauptziel der Stabilitätskartierung ist die Prävention. Die Schulung der Förster für die Stabilitätsfaktoren in ihrer Ausprägung und in der Gewichtung können im Einzelfall Entscheidungshilfen sein. Die flächendeckende Anwendung kann dann in gesamtbetriebliche oder überbetriebliche Strategien münden.

²⁴ WACK (2006); SCHARDT et al. (2002).

6 LITERATUR- UND QUELLENVERZEICHNIS

BAUR P., BERNATH K., HOLTHAUSEN N., ROSCHEWITZ A. (2003a): LOTHAR Ökonomische Auswirkungen des Sturms Lothar im Schweizer Wald, Teil I. Einkommens- und Vermögenswirkungen für die Waldwirtschaft und gesamtwirtschaftliche Beurteilung des Sturms. Umwelt-Materialien Nr. 157. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern. 190 S.

BAUR P., HOLTHAUSEN N., ROSCHEWITZ A. (2003b): LOTHAR Ökonomische Auswirkungen des Sturms Lothar im Schweizer Wald, Teil II. Verteilung der Auswirkungen auf bäuerliche und öffentliche WaldeigentümerInnen: Ergebnisse einer Befragung. Umwelt-Materialien Nr. 158. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern. 204 S.

BOCK J., DUPLAT P., RENAUD J. P., VINKLER I. (2002): Influence des paramètres sylvicoles et stationnels sur l'intensité des dégâts provoqués par la tempête du 26 décembre 1999 dans les hêtraies du quart nord-est de la France. Rapport final. Conv. ÉCOFOR n. 2000-39. 70 p.

BOCK J. et DUPLAT P. (2004): Stabilité au vent des hêtraies: les enseignement de la tempête de 1999 dan le nord est de la France. Rendez-Vous Techniques 3/04, ONF, France. P- 29 – 34.

BUWAL/BABS (2005): Pragmatisches Risikomanagement. LernRisk/RiskPlan. Sicherheit von Naturgefahren. CD-ROM Version 1. 0.

CASALS Paula (2005): Tempêtes de vent et dommages causes à la forêt: Analyse de risques en Suisse à l'aide des Systèmes d'Informations Géographique. Département de Géosciences, Géographie, Université de Fribourg. 89 S.

DOBBERTIN M. (2002): Influence of stand structure and site factors on wind damage comparing the storms vivian and Lothar. For. Snow. Landsc. Res 77, 1/2. S. 187 - 205.

DUNHAM R., GARDINER B., QUINE C. and SUAREZ J. (2000): ForestGALES. A PC-based wind risk model for British forests, Version 1.3. Forestry Commission, Northern Research Station, Roslin, Great Britain.

DVORAK L. und BACHMANN P. (2001): Sturmschäden in ungleichförmigen Beständen in Abhängigkeit vom Bestandesaufbau. Schlussbericht. Professur Forsteinrichtung und Waldwachstum. ETH Zürich. 87 S.

FREHNER Monika, WASSER B., SCHWITTER R. (2005): Nachhaltigkeit und Erfolgskontrolle im Schutzwald. Wegleitung für Pflegemassnahmen in Wäldern mit Schutzfunktion, Vollzug Umwelt. BUWAL, Bern. 564 S.

HAAS P., BACHOFEN H. (1991): Die Sturmgefährdung von Einzelbäumen und Beständen. Schweiz. Zeitschrift für Forstwesen Nr. 6/1991, S. 477-504.

HEROLD Anne and ULMER U. (2001): Stand Stability in the Swiss National Forest Inventory: assessment technique, reproducibility an relevance. Forest Ecol. and Management 145. P. 29 – 42.

HOLENSTEIN K. (2002): Herleitung eines Modells zur Abschätzung der mechanischen Stabilität von Waldbeständen. Ergebnisse des Komponentenprojektes C Polyprojekt PRIMALP. ETH Zürich. 34 S.

HOLTHAUSEN N. und BAUR Priska (2004): Zum Interesser an einer Versicherung von Sturmschäden im Schweizer Wald. Schweiz. Z. Forstes. 155/10. S. 426 – 436.

HOLTHAUSEN N., HANEWINKEL M., HOLECY J. (2004): Risikomanagement in der Forstwirtschaft am Beispiel des Sturmrisikos. FORSTARCHIV 75. S. 149 – 157.

HOSTETTLER A., STOLL M. (2006): Aktuelles zum Wettergeschehen: Ein erster Herbsturm im Norden. MeteoSchweiz 4.10.2006. Internetmeldung:
http://www.meteosuisse.ch/web/de/wetter/wetterereignisse/herbststurm_031006.html.

HÜTTE P. (1967): Die standörtlichen Voraussetzungen der Sturmschäden. Forstw. Centralblatt. 86. S. 276 – 295.

INDERMÜHLE M., RAETZ P., VOLZ R. (2005): LOTHAR. Ursächliche Zusammenhänge und Risikoentwicklung. Synthese des Teilprogramms 6. Umweltmaterialien Nr. 184. BUWAL, Bern. 145 S.

KELLER M. (Red.) (2005): Schweizerisches Landesforstinventar. Anleitung für die Feldaufnahmen der Erhebungen 2004 -2007, Birmensdorf, WSL. 393 S.

KÖNIG A. (1995): Sturmgefährdung von Beständen im Altersklassenwald. Ein Erklärungs- und Prognosemodell. Diss. Universität München. Frankfurt am Main: Sauerländer 1996. 189 S.

LOHMANDER P. and HELLES F. (1987): Windthrow probability as a Function of Stand Characteristics and Shelter. Scand. Journal of Forest Research, 2. S. 227-238.

MARSCH M. (1989): Biomechanische Modelle zur Quantifizierung der Tragfähigkeit von Einzelbäumen und Beständen gegenüber Schnee- und Windbelastung sowie darauf aufbauende Bestandesbehandlungsmassnahmen mit Hilfe eines Simulationsmodells, dargestellt am Beispiel der Baumart Fichte. Dissertation TU Dresden. 384 S.

MAYER H. (1985): Baumschwingungen und Sturmgefährdung des Waldes. Fakultät für Physik, Universität München. 247 S.

MAYER H. (1988): Kartierung von potentiell sturmgefährdeten Waldstandorten in Bayern. Forstwissenschaftliches Centralblatt, 107. Jg., S. 239-251.

MAYER P., BRANG P., DOBBERTIN M., ZIMMERMANN S. (2004): Sturmschäden auf sauren Standorten häufiger. Informationsblatt Forschungsbereich Wald 16. WSL, Birmensdorf. S. 1 – 4.

MÜLLER F. (2002): Modellierung von Sturm-, Schnee- und Rotfäulerisiko in Fichtenbeständen auf Einzelbaumebene. Diss. Technische Universität München. 175 S.

NOPP Ursula (1999): Erarbeitung von Identifikationsschlüsseln der Prädisposition fichtenreicher Bestände gegenüber verschiedenen abiotischen und biotischen Schadauslösern. Dissertation an der Universität für Bodenkultur, Wien. 365 S.

PELTOLA H., KELLOMÄKI S., VÄISÄNEN H., IKONEN V.-P. (1998): HWIND: A mechanistic model for wind and snow damage of Scots Pine, Norway Spruce and birch sp. Can. J. For. Res. 29. P. 647 - 661.

PRETSCH H. (1992): Konzeption und Konstruktion von Wachstumsmodellen für Rein- und Mischbestände. Schriftenreihe der Forstwissenschaftlichen Fakultät der Universität München, Nr. 115. Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt, Bayern 332 S.

REDDE N. (2002): Risiko von Sturm- und Folgeschäden in Abhängigkeit vom Standort und von waldbaulichen Eingriffen bei der Umwandlung von Fichtenreinbeständen. Berichte des Forschungszentrums Waldökosysteme. Reihe A, Bd. 179.

ROTTMANN M. (1986): Wind- und Sturmschäden im Wald. J. J. Sauerländer's Verlag. Frankfurt a.M. 128 S.

SAATY T. L. (1980): The Analytic Hierarchy Process. McGraw-Hill, New York, NY.

SCHARDT M., ZIEGLER M., WIMMER A., WACK R., HYYPPÄ J. (2002): Assessment of Forest Parameters by Means of Laser Scanning. Proceedings of the ISPRS Commission III Symposium Graz, pp. 302-309.

SCHMIDER P., KÜPER M., TSCHANDER Bettina., KÄSER Brigitte (1993): Die Waldstandorte im Kanton Zürich: Waldgesellschaften, Waldbau, Naturkunde. Oberforstamt des Kantons Zürich. Vdf-Verlag. 287 S.

SCHMIDT M., BAYER J., KÄNDLER G. (2005): Sturm „Lothar“ – Ansatz einer inventurbasierten Risikoanalyse. FVA-Einblick 2/2005. FVA Baden Württemberg. 8 S.

SCHMIDT M., BAYER J., KÄNDLER G. (2006): Sturm Lothar – Ansatz einer inventurbasierten Risikoanalyse. DVFFA, Sektion Ertragskunde, Jahrestagung 2006. FVA Baden Württemberg. S. 5 – 20.

SCHMIDTKE H. und SCHERRER H.U. (1997): Sturmschäden im Wald. Projektschlussbericht im Rahmen des nationalen Forschungsprogrammes „Klimaänderungen und Naturkatastrophen in der Schweiz“ NFP 31. Vdf Hochschulverlag and der ETH. 38 S.

SCHÜTZ J. P. und GÖTZ M. (2003): Ursächliche Zusammenhänge zwischen LOTHAR Sturmschäden und Eigenschaften des Windfeldes sowie Bestandes- und standörtliche Faktoren im Perimeter des Dopplerradars der ETH Höggerberg am Fallbeispiel von Fichten- und Buchenreinbeständen. BUWAL-Abschlussbericht des TP6 LOTHAR. 74 S.
http://www.fowi.ethz.ch/pwb/D_PROF/deutsch/publi.htm.

SCHÜTZ J. P., GÖTZ M., SCHMID W., MANDALLAZ D. (2006): Vulnerability of spruce (*Picea abies*) and beech (*Fagus sylvatica*) forest stands to storms and consequences for silviculture. Eur. J. Forest Res. 125. P. 291 – 302.

SCOTT R. E. and MICHTECHEL S. J. (2005): Empirical modelling of windthrow risk in partially harvested stands using tree, neighbourhood and stand attributes. Forest Ecology and Management 218. P. 193 -209.

VANOMSEN P. (2006): Der Einfluss der Durchforstung auf die Verankerung der Fichte hinsichtlich ihrer Sturmresistenz. Diss. ETH Nr. 16532. 246 S.

VITÉ P. (1951): Methode und Ergebnis einer Sturmschadenskartierung im Lehrforstamt Bramwald (Oberweserbergland). Forstwissenschaftliches Centralblatt, 70. Jg., S. 336- 346.

WACK R. (2006): Assessment of Alpine Protection Forest Parameters based on LIDAR Data and SPOT V Satellite Imagery. Proceedings of the HMRSC Workshop Graz.

WSL und BUWAL (2001): Lothar der Orkan 1999. Ereignisanalyse. Birmensdorf, Bern. 365 S.