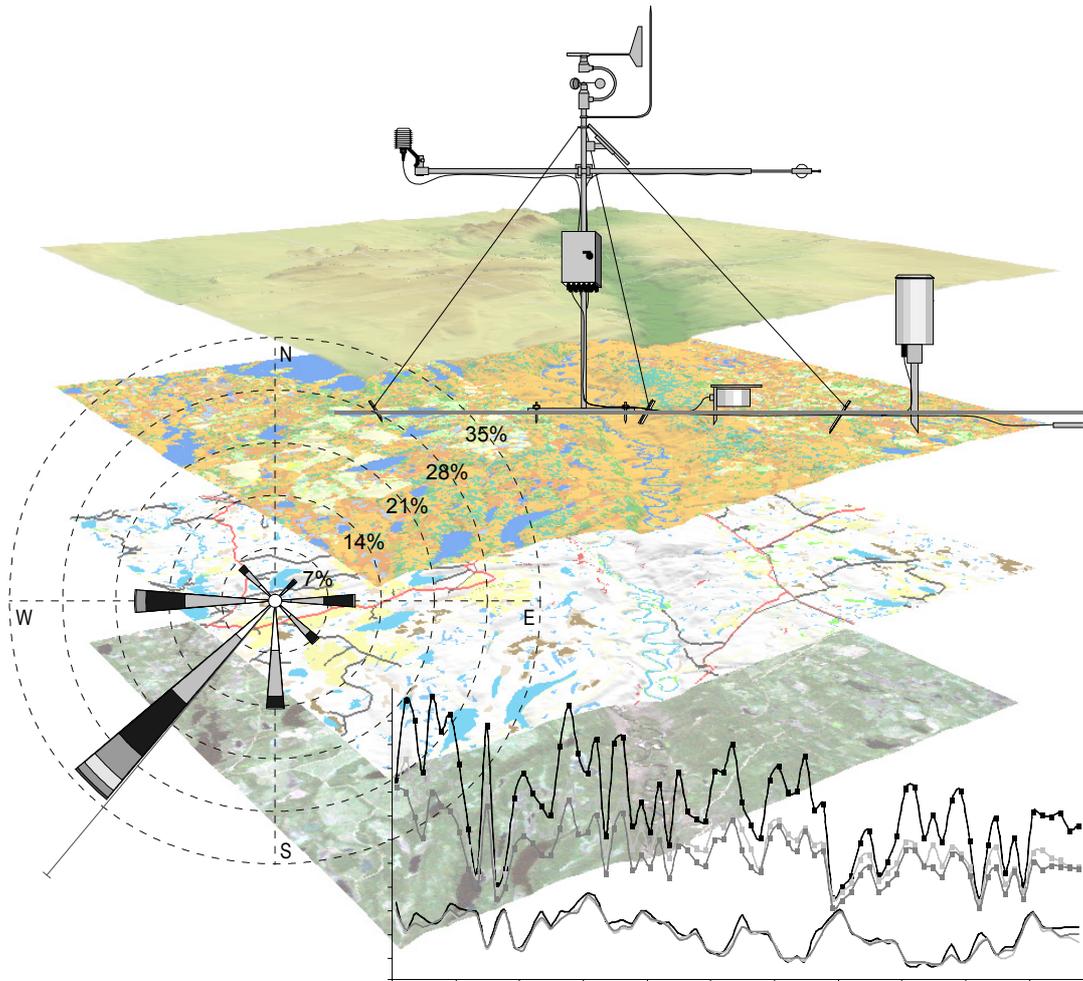


# Studien zur geländeklimatologischen Relevanz von Abholzungen in borealen Wäldern im Bereich des Oulanka-Nationalparks, Nordfinnland



Dipl.-Geogr. Steffen Schwantz · Dissertation · 2006

Universität Bremen · Fachbereich 8 · Geographie

---

---

*Studien zur geländeklimatologischen Relevanz von Abholzungen  
in borealen Wäldern im Bereich des  
Oulanka-Nationalparks, Nordfinnland*

*Dipl.-Geogr. Steffen Schwantz · Dissertation · 2006  
Universität Bremen · Fachbereich 8 · Geographie*

*vorgelegt zur Erlangung des Grades eines  
Doktors der Naturwissenschaften (Dr. rer. nat.)*

- 1. Gutachter Prof. Dr. Jörg-Friedhelm Venzke*
- 2. Gutachter Prof. Dr. Bernd Cyffka*

---

---

*Mein Dank gilt Prof. Dr. Jörg-Friedhelm Venzke und Prof. Dr. Bernd Cyffka für die Betreuung dieser Arbeit und ihren Rat. Weiterhin möchte ich auch den Mitgliedern der Arbeitsgruppe Physiogeographie für ihre Hilfsbereitschaft danken, sei es für fachliche Gespräche oder einfach einen netten Schnack und aufbauende Worte. Danken möchte ich auch Dr. Gerd König für seinen fachlichen Rat. Nicht zuletzt gilt mein Dank auch meinen Freundinnen und Freunden, die da waren, wenn ich sie brauchte und meine Launen ertragen mussten. Weiterhin möchte ich meiner Frau und meinen Eltern herzlich danken. Sie haben mich geduldig unterstützt.*

---



*Quo vadis, Borealis?*

---

---

## **Inhaltsverzeichnis**

1	Einleitung und Fragestellung .....	1
2	Untersuchungsraum .....	4
2.1	Naturräumliche Charakterisierung des Untersuchungsraums .....	5
2.1.1	Geologisch-morphologische Entwicklung des Untersuchungsraums .....	6
2.1.2	Vegetation .....	8
2.1.3	Anthropogene Einflüsse .....	9
2.2	Klima .....	10
2.2.1	Überregionale Klimabedingungen .....	11
2.2.1.1	Klimaklassifikation .....	12
2.2.1.2	Temperaturregime .....	12
2.2.1.3	Niederschlagsregime .....	15
2.2.2	Lokale Klimabedingungen .....	16
2.2.3	Lokale Besonderheiten .....	17
3	Angewandte Methoden und Struktur der Versuchsfelder .....	19
3.1	Angewandte Geländearbeitsmethoden .....	20
3.1.1	Geländeklimatologische Messungen .....	20
3.1.2	Einstrahlungs- und Beschattungsverhältnisse .....	24
3.1.3	Beschreibung der Vegetationsverhältnisse .....	26
3.2	Aufbau und Struktur der Versuchsfelder .....	26
3.2.1	Altbestandsfläche .....	27
3.2.2	Kahlschlagfläche .....	28
3.2.3	Aufforstungsfläche .....	30
4	Studien zum Bestandsklima .....	32
4.1	Dauer und Repräsentanz der Messungen .....	32
4.2	Meteorologische Gegebenheiten im Vorfeld der Messungen .....	33
4.2.1	Meteorologische Entwicklung im Vorfeld der Messkampagne 1999 .....	33
4.2.2	Meteorologische Entwicklung im Vorfeld der Messkampagne 2000 .....	34
4.2.3	Zusammenfassung der meteorologischen Bedingungen vor den Messkampagnen .....	35
4.3	Meteorologische Rahmenbedingungen während der Messungen .....	36
4.3.1	Meteorologische Situation während der Messkampagne 1999 .....	36
4.3.2	Meteorologische Situation während der Messkampagne 2000 .....	38
4.3.3	Zusammenfassung der meteorologischen Situation während der Messkampagnen .....	39
4.4	Bestands- und Referenzmessreihen .....	40
4.4.1	Strahlung .....	40
4.4.1.1	Globalstrahlung .....	41
4.4.1.2	Strahlungsbilanz .....	47
4.4.2	Temperaturen .....	52
4.4.2.1	Lufttemperaturen .....	53

4.4.2.2	<i>Erdoberflächentemperaturen</i> .....	57
4.4.2.3	<i>Bodentemperaturen</i> .....	60
4.4.3	<i>Niederschlags- und Feuchteverhältnisse</i> .....	62
4.4.3.1	<i>Niederschlag</i> .....	63
4.4.3.2	<i>Interzeption</i> .....	65
4.4.3.3	<i>Potenzielle Evaporation</i> .....	68
4.4.4	<i>Windverhältnisse</i> .....	71
4.5	<i>Ausgewählte Wetterlagen</i> .....	76
4.5.1	<i>Strahlungswetterlagen</i> .....	77
4.5.1.1	<i>Strahlungswetterlage vom 26.7 bis 28.7.2000</i> .....	77
4.5.1.2	<i>Analogien und Differenzen zu weiteren Strahlungswetterlagen</i> .....	82
4.5.2	<i>Frostwetterlagen</i> .....	87
4.5.2.1	<i>Frostwetterlage vom 6.8. bis 9.8. 1999</i> .....	88
4.5.2.2	<i>Analogien und Differenzen zu weiteren Frostwetterlagen</i> .....	91
4.6	<i>Zusammenfassung der Bestands- und Referenzmessreihen</i> .....	97
4.6.1	<i>Geländeklimatologische Eigenschaften der Versuchsflächen</i> .....	97
4.6.2	<i>Unterschiede zwischen Versuchsflächen und Referenzstandorten</i> .....	98
5	<i>Evaluation der räumlichen Übertragbarkeit klimaökologischer Modelle</i> .....	100
5.1	<i>Modellanforderungen</i> .....	100
5.2	<i>Datengrundlagen</i> .....	101
5.2.1	<i>Digitales Höhenmodell (DHM)</i> .....	102
5.2.2	<i>Daten finnischen der »Landnutzung und Waldinventur«</i> .....	104
5.2.3	<i>Nationales topographisches Datenmodell</i> .....	109
5.2.3.1	<i>Transport und Transmission</i> .....	109
5.2.3.2	<i>Flächennutzung</i> .....	111
5.2.3.3	<i>Bebauung</i> .....	113
5.2.3.4	<i>Höheninformationen (Isohypsen/Isobathen)</i> .....	113
5.3	<i>Modellansätze zur Temperaturverteilung und Frostgefährdung</i> .....	114
5.3.1	<i>Anforderungen von Modellen zur Temperaturverteilung oder Frostgefährdung sowie Möglichkeiten ihrer Übertragbarkeit</i> .....	115
5.3.1.1	<i>Klimaparameter</i> .....	115
5.3.1.2	<i>Orographie</i> .....	117
5.3.1.3	<i>Böden</i> .....	121
5.3.1.4	<i>(Wald-)Vegetation</i> .....	122
5.3.1.5	<i>Bestandsmanagement</i> .....	123
5.3.2	<i>Zusammenfassung zum Anforderungskatalog von Modellen zur Temperatur- verteilung und Frostgefährdung sowie Möglichkeiten ihrer Übertragbarkeit</i> .....	124
5.4	<i>Modellansätze zur Windwurfgefährdung</i> .....	125
5.4.1	<i>Anforderungen von Modellen zur Windwurfgefährdung sowie Möglichkeiten ihrer Übertragbarkeit</i> .....	127
5.4.1.1	<i>Windverhältnisse</i> .....	127
5.4.1.2	<i>Orographie</i> .....	128

---

5.4.1.3	Böden .....	131
5.4.1.4	(Wald-)Vegetation .....	133
5.4.1.5	Bestandsmanagement und anthropogene Strukturen .....	135
5.4.2	Zusammenfassung zum Anforderungskatalog von Modellen zur Windwurfge- fährdung sowie Möglichkeiten ihrer Übertragbarkeit .....	137
5.5	Entwicklungschancen .....	139
6	Zusammenfassung .....	142
7	Abstract .....	144
8	Literaturverzeichnis .....	146
8.1	Literatur allgemein .....	146
8.2	Kartengrundlagen .....	169
8.3	Datengrundlagen .....	169
8.4	Weitere Quellen .....	170
9	Anhang .....	172
9.1	Tabellen .....	173

---

## Abbildungsverzeichnis

Abb. 1:	Entwicklung der Holzexportmengen Russlands nach Nordostasien .....	1
Abb. 2:	Lage des Untersuchungsraumes in Fennoskandien .....	4
Abb. 3:	Übersicht über Untersuchungsraum und Untersuchungsgebiet .....	4
Abb. 4:	Geologische Strukturen und Morphographie im Untersuchungsraum .....	7
Abb. 5:	Erosions- und Akkumulationsformen in den glazifluvialen Sedimenten im Tal des Oulankajoki .....	8
Abb. 6/7:	Vegetationszonen und Waldvegetationszonen Finnlands .....	9
Abb. 8/9:	Jahres-Isothermen und thermische Kontinentalität in Finnland (1961-1990) .....	13
Abb. 10/11:	Januar- und Juli-Isothermen (1961-1990) .....	14
Abb. 12:	Mittlere Vegetationsperiode (1961-1990) .....	14
Abb. 13:	Mittlere Niederschlagsverteilung (1961-1990) .....	15
Abb. 14:	Vergleich der Tageslängen und potenziellen Strahlungsverhältnisse im Jahresverlauf zwischen dem Untersuchungsraum und Bremen .....	16
Abb. 15:	Verteilung der Hauptwindrichtungen während des Jahres und während der Vegetationsperiode .....	17
Abb. 16:	Klimadiagramm der Wetterstationen Kuusamo Lentoasema (Flughafen) und Kuusamo Kiutaköngäs (Oulanka) .....	18
Abb. 17:	Ausschnitt des Untersuchungsgebiets aus einer Landsat-Szene .....	19
Abb. 18:	Die Sukzessionsstadien der Versuchsflächen Altbestand, Kahlschlag und Aufforstung im Untersuchungsgebiet .....	20
Abb. 19:	Schematische Darstellung der Wetterstationen auf den Versuchsflächen .....	21
Abb. 20:	Maße der Eigenbau-Pluviometer und Beispiel für die Installation auf der Altbestandsfläche .....	22
Abb. 21:	Horizontüberhöhung der Versuchsflächen Altbestand, Kahlschlag und Aufforstung unter Berücksichtigung der Orographie und der umgebenden Vegetation .....	25
Abb. 22:	Aufnahmekonstruktion zur Erhebung der Kronenschlussdichte und Beispielfoto .....	26
Abb. 23:	Verteilung der Baum- und Strauchschicht, der Messinstrumente und höhenrelevanter Punkte im Altbestand .....	28
Abb. 24:	Verteilung der Baum- und Strauchschicht, der Messinstrumente und höhenrelevanter Punkte auf der Kahlschlagfläche .....	29
Abb. 25:	Verteilung der Baum- und Strauchschicht, der Messinstrumente und höhenrelevanter Punkte auf der Aufforstungsfläche .....	30
Abb. 26:	Tagesmittel- und Extremwerte der Lufttemperatur, Niederschlag und Luftdruck der Stationen Kuusamo Flughafen und Kuusamo Kiutaköngäs im Vorfeld der Messungen 1999 .....	34
Abb. 27:	Tagesmittel- und Extremwerte der Lufttemperatur, Niederschlag und Luftdruck der Stationen Kuusamo Flughafen und Kuusamo Kiutaköngäs im Vorfeld der Messungen 2000 .....	35
Abb. 28:	Tagesmittel- und Extremwerte der Lufttemperaturen und Tagessummen der Niederschläge während der Messkampagne 1999 an den Referenzstationen Kuusamo Lentoasema und Kuusamo Kiutaköngäs .....	37
Abb. 29:	Tagesmittel- und Extremwerte der Lufttemperaturen und Tagessummen der Niederschläge 2000 während der Messkampagne an den Referenzstationen Kuusamo Lentoasema und Kuusamo Kiutaköngäs .....	38
Abb. 30:	Stundenmittel der Globalstrahlung auf den Versuchsflächen im gesamten Messzeitraum 1999 .....	42
Abb. 31:	Stundenmittel der Globalstrahlung auf den Versuchsflächen im gesamten Messzeitraum 2000 .....	42

Abb. 32:	Transmissionsraten der Bestände während beider Messkampagnen auf Basis der Tagessummen der Globalstrahlung .....	44
Abb. 33:	Stundenmittel der Strahlungsbilanz auf den Versuchsflächen im gesamten Messzeitraum 1999 .....	48
Abb. 34:	Stundenmittel der Strahlungsbilanz auf den Versuchsflächen im gesamten Messzeitraum 2000 .....	48
Abb. 35:	Summen der Lufttemperatur der Versuchsflächen und Abweichungen der Temperatursummen vom gemeinsamen Mittel während der während der beiden Messkampagnen .....	55
Abb. 36:	Temperaturprofile der Versuchsflächen unter Berücksichtigung der Mittelwerte der Luft-, Erdoberflächen- und Bodentemperaturen .....	58
Abb. 37:	Verhältnis der Niederschlagsmengen zwischen der Kahlschlagfläche und den Referenzstationen während der beiden Messkampagnen .....	64
Abb. 38:	Mittelwerte der Niederschlagssummen sowie ihre Standardabweichungen aus jeweils 30 Niederschlagssammlern je Versuchsfläche .....	65
Abb. 39:	Interzeptionsverluste im Bereich der 30 Sammler im Altbestand sowie primäre Windrichtungen während der Niederschlagsereignisse in den Vergleichszeiträumen 1999 und 2000 .....	66
Abb. 40:	Interzeptionsverluste im Bereich der 30 Sammler im Aufforstungsbestand sowie primäre Windrichtungen während der Niederschlagsereignisse in den Vergleichszeiträumen 1999 und 2000 .....	66
Abb. 41:	Interzeptionsraten auf den Versuchsflächen während der zwei Messkampagnen .....	67
Abb. 42:	Niederschläge, potenzielle Verdunstung und Bilanz der Versuchsflächen während der beiden Messkampagnen .....	69
Abb. 43:	Verteilung der Windgeschwindigkeiten und -richtungen auf den Versuchsflächen und der Referenzstation Kuusamo Lentoasema .....	73
Abb. 44:	Verhältnis der Windgeschwindigkeiten in den Beständen zu denen der Kahlschlagfläche während der beiden Messkampagnen .....	74
Abb. 45:	Mittlere nächtliche Windgeschwindigkeiten auf den Versuchsflächen und aufgetretene Frostwetterlagen während der beiden Messkampagnen .....	76
Abb. 46:	Strahlungswetterlagen und Frostlagen während der Messungen 1999 und 2000 sowie Tagessummen der Globalstrahlung und Minimalwerte der Erdoberflächentemperatur .....	77
Abb. 47:	Ausschnitte der Bodenwetterkarten 26.-28.7.2000 und Verteilung der Bewölkung .....	78
Abb. 48:	Verlauf der Strahlungswetterlage vom 26.7. bis 28.7.2000 an den Standorten Altbestand, Kahlschlag und Aufforstung; Luftdruckwerte der Station Kuusamo Lentoasema .....	80
Abb. 49:	Tagesmittelwerte der Globalstrahlung während aufgetretener Strahlungswetterlagen sowie durchschnittliche, höchste und geringste Tagesmittel der gesamten Messzeiträume .....	83
Abb. 50:	Nächtliche Minimalwerte und Tagesamplituden der Lufttemperatur während aufgetretener Strahlungswetterlagen sowie höchste und geringste Tagesminima und -amplituden in den gesamten Messzeiträumen .....	84
Abb. 51:	Tagesmittel- und Extremwerte der Lufttemperaturen auf der Kahlschlagfläche und an den Referenzstandorten während aufgetretener Strahlungswetterlagen sowie Vergleichswerte der gesamten Messzeiträume .....	84
Abb. 52:	Tagesmittel- und Extremwerte der Erdoberflächentemperaturen auf der Kahlschlagfläche und an den Referenzstandorten während aufgetretener Strahlungswetterlagen sowie Vergleichswerte der gesamten Messzeiträume .....	85
Abb. 53:	Tagesminima der Erdoberflächentemperatur auf der Kahlschlagfläche und an den Referenzstandorten während aufgetretener Strahlungswetterlagen sowie Vergleichswerte der gesamten Messzeiträume .....	86
Abb. 54:	Tagesmittelwerte der Windgeschwindigkeiten auf den Versuchsflächen während aufgetretener Strahlungswetterlagen sowie durchschnittliche und höchste Tagesmittelwerte der gesamten Messzeiträume .....	87
Abb. 55:	Ausschnitte der Bodenwetterkarten 7.8.-9.8.1999 und die Verteilung der Bewölkung .....	88

Abb. 56:	Verlauf der Frostwetterlage vom 6.8. bis 9.8. 1999 an den Standorten Altbestand, Kahlschlag und Aufforstung; Luftdruckwerte der Station Kuusamo Lentoasema .....	90
Abb. 57:	Mittlere nächtliche Strahlungsbilanzwerte während aufgetretener Frostwetterlagen sowie durchschnittliche, höchste und geringste nächtliche Mittel der gesamten Messzeiträume .....	92
Abb. 58:	Nächtliche Minimalwerte und Tagesamplituden der Lufttemperaturen während aufgetretener Frostwetterlagen sowie durchschnittliche, höchste und geringste nächtliche Werte der gesamten Messzeiträume .....	93
Abb. 59:	Nächtliche Minimalwerte und Tagesamplituden der Lufttemperaturen auf der Kahlschlagfläche und an den Referenzstandorten während aufgetretener Frostwetterlagen sowie Vergleichswerte der gesamten Messzeiträume .....	94
Abb. 60:	Nächtliche Minimalwerte und Tagesamplituden der Erdoberflächentemperaturen während aufgetretener Frostwetterlagen sowie durchschnittliche, höchste und geringste nächtliche Werte der gesamten Messzeiträume .....	95
Abb. 61:	Nächtliche Minimalwerte der Erdoberflächentemperaturen auf der Kahlschlagfläche und an den Referenzstandorten im Verlauf aufgetretener Frostwetterlagen sowie den Vergleichswerten der Messzeiträume 1999 und 2000 .....	95
Abb. 62:	Anteil windstillen Phasen während der Nachtstunden im Verlauf von Frostwetterlagen und im Mittel der gesamten Messzeiträume .....	96
Abb. 63:	Digitales Höhenmodell des Untersuchungsgebiets und die Verteilung der Höhenstufen ..	103
Abb. 64:	Herstellungsprozess des Datensatzes der finnischen »Landnutzung und Waldinventur« ....	105
Abb. 65:	Verteilung der Landnutzung im Untersuchungsgebiet .....	106
Abb. 66:	»Landnutzung und Waldinventur« im Umfeld der Versuchsflächen .....	109
Abb. 67:	Datenebenen »Transport« und »Transmission« im Untersuchungsgebiet .....	110
Abb. 68:	Datenebenen »Terrain/1« und »Terrain/2« im Untersuchungsgebiet .....	112
Abb. 69:	Orographische Landschaftsmerkmale .....	117
Abb. 70:	Orographisch bedingte Variation der Einstrahlungsdauer im Untersuchungsgebiet vom 25.6. bis 8.9. 1999 .....	118
Abb. 71:	Orographisch bedingte Variation der Globalstrahlungssumme im Untersuchungsgebiet vom 25.6. bis 8.9. 1999 .....	119
Abb. 72:	Potenzielle Einzugsgebiete von Kaltluftabflüssen bzw. Kaltluftakkumulationen .....	120
Abb. 73:	Abgeleitete Bodeninformationen der finnischen Landnutzungs- und Waldinventurdaten .....	122
Abb. 74:	Verteilung der Windrichtungen und Windgeschwindigkeitsklassen auf der Kahlschlagfläche und dem Flughafen Kuusamo während der beiden Messkampagnen .....	128
Abb. 75:	Verteilung der Windrichtungen und Windgeschwindigkeitsklassen auf der Kahlschlagfläche während der beiden Messkampagnen .....	130
Abb. 76:	Reliefbedingte Windexposition im Untersuchungsgebiet des Oulanka-Nationalparks während der beiden Messkampagnen .....	131
Abb. 77:	Bodenabhängige Windgefährdungsklassen .....	133
Abb. 78:	Unbewaldete Flächen und Schneisen im Untersuchungsgebiet .....	136
Abb. 79:	Windexpositionsindex für die Waldränder im Untersuchungsgebiet am Oulankajoki .....	141

---

## Tabellenverzeichnis

Tab. 1:	Tageslängen in unterschiedlichen Breitenlagen zur Sommer- bzw. Wintersonnenwende .....	11
Tab. 2:	Zusammenfassung der meteorologischen Bedingungen bis zum Beginn der Vergleichs- zeiträume der beiden Messkampagnen .....	35
Tab. 3:	Zusammenfassung ausgewählter klimatologischer Parameter der Stationen Kuusamo Lentoasema und Kuusamo Kiutaköngäs für die Vergleichs- bzw. Messzeiträume der bei- den Messkampagnen sowie den Vergleichswerten des meteorologischen Zeitraums 1961-1990 (1967-1990) .....	39
Tab. 4:	Zusammenfassung ausgewählter Werte der Globalstrahlung während der beiden Mess- kampagnen .....	43
Tab. 5:	Generalisierte Einstrahlungsbedingungen auf den drei Versuchsfächen .....	46
Tab. 6:	Zusammenfassung ausgewählter Werte der Strahlungsbilanz während der beiden Mess- kampagnen .....	49
Tab. 7:	Generalisierte Strahlungsbilanzverhältnisse auf den drei Versuchsfächen .....	52
Tab. 8:	Zusammenfassung ausgewählter Mittel- und Extremwerten der Lufttemperatur der Versuchsfächen und der Stationen Kuusamo Lentoasema und Kuusamo Kiutaköngäs für die Vergleichs- und Messzeiträume der beiden Messkampagnen .....	54
Tab. 9:	Generalisierte Lufttemperaturverhältnisse auf den Versuchsfächen .....	56
Tab. 10:	Zusammenfassung ausgewählter Mittel- und Extremwerte der Erdoberflächentempera- turen der Versuchsfächen sowie der Minimalwerte der Stationen Kuusamo Lentoasema und Kuusamo Kiutaköngäs für die Vergleichs- und Messzeiträume der beiden Messkam- pagnen .....	57
Tab. 11:	Generalisierte Erdoberflächentemperaturverhältnisse auf den Versuchsfächen .....	60
Tab. 12:	Zusammenfassung ausgewählter Mittel- und Extremwerte der Bodentemperaturen der Versuchsfächen während der Vergleichs- und Messzeiträume der beiden Messkampag- nen .....	61
Tab. 13:	Generalisierte Bodentemperaturverhältnisse auf den Versuchsfächen .....	62
Tab. 14:	Zusammenfassung ausgewählter Niederschlagswerte der Versuchsfächen sowie der Stationen Kuusamo Lentoasema und Kuusamo Kiutaköngäs für die Vergleichs- und Messzeiträume der beiden Messkampagnen .....	63
Tab. 15:	Zusammenfassung ausgewählter Messwerte der Windgeschwindigkeit und -richtung der Versuchsfächen und der Stationen Kuusamo Lentoasema für die Vergleichs- und Mess- zeiträume der beiden Messkampagnen .....	71
Tab. 16:	Generalisierte Windverhältnisse auf den Versuchsfächen .....	76
Tab. 17:	Ausgewählte Messwerte der Strahlungswetterlage vom 26.7. bis 28.7.2000 .....	81
Tab. 18:	Ausgewählte Messwerte der Frostwetterlage vom 6.8. bis 9.8.1999 .....	91
Tab. 19:	Räumliche Datengrundlagen der finnischen Landesvermessung .....	101
Tab. 20:	Reklassifizierungsbeispiele für die Erhebung geländeklimatologisch relevanter Daten aus der finnischen »Landnutzung und Waldinventur« .....	107
Tab. 21:	Klassifizierung des Layers »Transport« innerhalb des Untersuchungsgebiets .....	110
Tab. 22:	Landnutzungsklassen im Untersuchungsgebiet .....	111
Tab. 23:	Variablen verschiedener Modellansätze zur Prognose der Temperaturverteilung bzw. Frostgefährdung an Standorten und die großflächige Verfügbarkeit entsprechender Datengrundlagen .....	124
Tab. 24:	Gewichtung des topographischen Windexpositionindex auf Basis der Windmessungen der beiden Messkampagnen .....	130
Tab. 25:	Beziehung zwischen Windgefährdung von Beständen und Bodeneigenschaften .....	132
Tab. 26:	Variablen von Modellansätzen zur Windprognose oder Windgefährdung an Standorten und Verfügbarkeit entsprechender Datengrundlagen .....	138
Tab. 27:	Übersicht der Versuchsfächen Altbestand, Kahlschlag und Aufforstung .....	173

---

Tab. 28:	<i>Vermessungsdaten der Wetterstation, der Lage der Messwertgeber und der Niederschlagssammler im Altbestand</i> .....	174
Tab. 29:	<i>Vermessungsdaten der Wetterstation, der Lage der Messwertgeber und der Niederschlagssammler auf der Kahlschlagfläche</i> .....	175
Tab. 30:	<i>Vermessungsdaten der Wetterstation, der Lage der Messwertgeber und der Niederschlagssammler im Aufforstungsbestand</i> .....	176
Tab. 31:	<i>Übersicht der Datenausfälle während der geländeklimatologischen Messungen 1999 und 2000</i> .....	177
Tab. 32:	<i>Überblick naturräumlicher Begriffe in der finnischen Sprache</i> .....	177
Tab. 33:	<i>Im Untersuchungsgebiet vorkommende Klassen der finnischen »Landnutzung und Waldinventur« und Reklassifizierung der Waldtypen</i> .....	178
Tab. 34:	<i>Im Untersuchungsgebiet vorkommende Klassen der finnischen »Landnutzung und Waldinventur« und Reklassifizierung der Holzmengen</i> .....	179
Tab. 35:	<i>Im Untersuchungsgebiet vorkommende Klassen der finnischen »Landnutzung und Waldinventur« und Reklassifizierung der Bodenklassen</i> .....	180
Tab. 36:	<i>Nationales topographisches Datenmodell - Layer »Transmission« und »Transport«</i> .....	182
Tab. 37:	<i>Nationales topographisches Datenmodell - Layer Flächennutzung »Terrain/1«</i> .....	183
Tab. 38:	<i>Nationales topographisches Datenmodell - Layer Flächennutzung »Terrain/2«</i> .....	184
Tab. 39:	<i>Nationales topographisches Datenmodell - Layer »Buildings« und Layer »Elevations«</i> .....	185

---

## Abkürzungsverzeichnis

<i>ALT</i>	<i>Versuchsfläche Altbestand</i>
<i>AUF</i>	<i>Versuchsfläche Aufforstung</i>
<i>BT</i>	<i>Mittelwert der Bodentemperatur (° C)</i>
<i>BT<sub>d</sub>max</i>	<i>Maximaler Tagesmittelwert der Bodentemperatur (° C)</i>
<i>BT<sub>d</sub>min</i>	<i>Minimaler Tagesmittelwert der Bodentemperatur (° C)</i>
<i>BT-Geber</i>	<i>Bodentemperaturgeber</i>
<i>B<sub>T</sub>m</i>	<i>Mittelwert der Bodentemperatur (° C)</i>
<i>B<sub>T</sub>max</i>	<i>Maximalwert der Bodentemperatur (° C)</i>
<i>B<sub>T</sub>min</i>	<i>Minimalwert der Bodentemperatur (° C)</i>
<i>ΔBT<sub>d</sub></i>	<i>Bodentemperaturamplitude (K)</i>
<i>ΔBT<sub>d</sub>max</i>	<i>Maximale Tagesamplitude der Bodentemperatur (K)</i>
<i>ΔBT<sub>d</sub>min</i>	<i>Minimale Tagesamplitude der Bodentemperatur (K)</i>
<i>ΔBTmax</i>	<i>Maximale Bodentemperaturamplitude (K)</i>
<i>DGPS</i>	<i>Differential Global Positioning System</i>
<i>DHM</i>	<i>Digitales Höhenmodell = Räumliche Abbildung des Georeliefs (vgl. DIKAU &amp; SCHMIDT 1999)</i>
<i>EOT</i>	<i>Erdoberflächentemperatur allgemein (° C)</i>
<i>EOT<sub>8h</sub>min</i>	<i>Mittleres Tagesminimum der Erdoberflächentemperatur (8 Uhr nach FMI-System) (° C)</i>
<i>EOT<sub>d</sub>max</i>	<i>Maximaler Tagesmittelwert der Erdoberflächentemperatur (° C)</i>
<i>EOT<sub>d</sub>min</i>	<i>Minimaler Tagesmittelwert der Erdoberflächentemperatur (° C)</i>
<i>EOT-Geber</i>	<i>Erdoberflächentemperaturgeber</i>
<i>EOT<sub>m</sub></i>	<i>Tagesmittel der Erdoberflächentemperatur (° C)</i>
<i>EOTmax</i>	<i>Maximalwert der Erdoberflächentemperatur (° C)</i>
<i>EOTmin</i>	<i>Minimalwert der Erdoberflächentemperatur (° C)</i>
<i>ΔEOT</i>	<i>Erdoberflächentemperaturamplitude (K)</i>
<i>ΔEOT<sub>d</sub></i>	<i>Tagesamplitude der Erdoberflächentemperatur (K)</i>
<i>ΔEOT<sub>d</sub>max</i>	<i>Maximale Tagesamplitude der Erdoberflächentemperatur (K)</i>
<i>ETP<sub>d</sub></i>	<i>Tagessumme der potenziellen Evaporation nach WENDLING et al. (1991)</i>
<i>FFRI</i>	<i>Finnish Forest Research Institute (finn.: Metla) = Finnisches Waldforschungsinstitut</i>
<i>FMI</i>	<i>Finnish Meteorological Institute (finn.: Ilmatieteen Laitos) = Finnischer Wetterdienst</i>
<i>GS</i>	<i>Globalstrahlung allgemein (Wm<sup>2</sup>)</i>
<i>GS<sub>d</sub>max</i>	<i>Maximaler Tagesmittelwert der Globalstrahlung (Wm<sup>2</sup>)</i>
<i>GS<sub>d</sub>min</i>	<i>Minimaler Tagesmittelwert der Globalstrahlung (Wm<sup>2</sup>)</i>
<i>GSF</i>	<i>Geological Survey of Finland (finn.: Geologian Tutkimuskeskus) = Finnische Gesellschaft für Geologie und Kartographie</i>
<i>GS<sub>h</sub></i>	<i>Stundenmittel der Globalstrahlung (Wm<sup>2</sup>)</i>
<i>GS<sub>m</sub></i>	<i>Mittlere Globalstrahlung (Wm<sup>2</sup>)</i>
<i>GSmax</i>	<i>Maximale Globalstrahlung (Wm<sup>2</sup>)</i>
<i>GSΣ</i>	<i>Globalstrahlungssumme (kWh m<sup>-2</sup>)</i>

$G\Sigma_d$	Globalstrahlungssumme ( $kWh\ m^{-2}$ )
GZ	Gesamtzeiträume der Messkampagnen (25.6.-8.9.99/17.6.-19.8.00)
$GZ_{max}$	Höchster Tagesmittelwert eines gemessenen Parameters im Gesamtzeitraum (1999: 25.6.-8.9; 2000: 17.6.-19.8.)
$GZ_{min}$	Geringster Tagesmittelwert eines gemessenen Parameters im Gesamtzeitraum (1999: 25.6.-8.9; 2000: 17.6.-19.8.)
GZm	Mittelwert eines gemessenen Parameters im Gesamtzeitraum (1999: 25.6.-8.9; 2000: 17.6.-19.8.)
GZmax	Höchster Maximalwert eines Messwertgebers im Gesamtzeitraum (1999: 25.6.-8.9; 2000: 17.6.-19.8.)
GZmin	Geringster Minimalwert eines Messwertgebers im Gesamtzeitraum (1999: 25.6.-8.9; 2000: 17.6.-19.8.)
HDR	Height-to-diameter ratio = Verhältnis Baumhöhe zum Stammdurchmesser in Brusthöhe
KAS	Versuchsfläche Kahlschlag
KK	FMI-Wetterstation Kuusamo Kiutaköngäs (Oulanka Nationalpark)
KKJ	Kartastokoordinaattijärjestelmä (finn.) - Finnisches Gauß-Krüger-Koordinatensystem für die topographischen Karten des Landes. Bezugsmeridiane sind 24, 27 und 30° E. Referenzellipsoid ist Hayford 1909 (= Internationaler Ellipsoid 1924)
KL	FMI-Wetterstation Kuusamo Lentoasema (Kuusamo Flughafen)
LAI	Blattflächenindex (Leaf Area Index)
LF	Relative Luftfeuchte allgemein (%)
$LF_h$	Stundenmittel der relativen Feuchte (%)
LFm	Mittelwert der relativen Luftfeuchte (%)
LT	Lufttemperatur (° C)
Lt2	Bodenart (schwach toniger Lehm) vgl. LESER & KLINK (1988)
$LT_d_{max}$	Maximaler Tagesmittelwert der Lufttemperatur (° C)
$LT_d_{min}$	Minimaler Tagesmittelwert der Lufttemperatur (° C)
$LT_h$	Stundenmittel der Lufttemperatur (°C)
LTm	Mittelwert der Lufttemperatur (° C)
LTmax	Maximalwert der Lufttemperatur (° C)
LTmin	Minimalwert der Lufttemperatur (° C)
$LT\Sigma$	Lufttemperatursumme (K)
$\Delta T$	Lufttemperaturamplitude (K)
$\Delta T_d$	Mittlere Tagesamplitude der Lufttemperatur (K)
$\Delta T_d_{max}$	Maximale Tagesamplitude der Lufttemperatur (K)
$\Delta T_d_{min}$	Minimale Tagesamplitude der Lufttemperatur (K)
$\Delta T\Sigma$	Abweichung vom gemeinsamen Mittelwert mehrerer Temperatursummen
n	Anzahl von Messwerten
NCDC	National Climatic Data Center, Datenserver der National Oceanic and Atmospheric Administration = Nationaler Wetter- und Ozeandienst der USA
NFI	National Forest Inventory
n. g.	Nicht gemessen

N-Geber	Niederschlagsgeber, Typ Hellmann mit einer Auffangfläche von 200 cm <sup>2</sup> , automatisch aufzeichnend
NS	Niederschlagssumme (mm)
N-Sammler	Niederschlagssammler, Eigenbau mit einer Auffangfläche von 95 cm <sup>2</sup>
NS <sub>d</sub>	Tagesniederschlagssumme (mm)
NS <sub>d</sub> max	Maximale Tagesniederschlagssumme (mm)
NS <sub>h</sub> max	Maximale Stundenniederschlagssumme (mm)
n. v.	Nicht vorhanden (gemessener Parameter, jedoch fehlender Wert)
OESZ	Osteuropäische Sommerzeit (UTC +3 h)
OEZ	Osteuropäische Zeit (UTC +2 h)
P-B	Bodentyp (Braunerde-Podsol) vgl. LESER & KLINK (1988)
Pt100	Platin-Messwiderstand für Temperaturgeber (0°C = 100 Ohm)
QS	Strahlungsbilanz (Wm <sup>-2</sup> )
QS'	Strahlungsbilanz, korrigiert durch Ausschluss von »Sonnenflecken«-beeinflussten Werten (Wm <sup>-2</sup> )
QS' <sub>d</sub> max	Maximaler Tagesmittelwert der Strahlungsbilanz, korrigiert durch Ausschluss von »Sonnenflecken«-beeinflussten Werten (Wm <sup>-2</sup> )
QS' <sub>d</sub> min	Minimaler Tagesmittelwert der Strahlungsbilanz, korrigiert durch Ausschluss von »Sonnenflecken«-beeinflussten Werten (Wm <sup>-2</sup> )
QS'm	Mittelwert der Strahlungsbilanz, korrigiert durch Ausschluss von »Sonnenflecken«-beeinflussten Werten (Wm <sup>-2</sup> )
QS'max	Maximale Strahlungsbilanz, korrigiert durch Ausschluss von »Sonnenflecken«-beeinflussten Werten (Wm <sup>-2</sup> )
QS'min	Minimalwert der Strahlungsbilanz, korrigiert durch Ausschluss von »Sonnenflecken«-beeinflussten Werten (Wm <sup>-2</sup> )
QSm <sub>Nacht</sub>	Nächtliche Strahlungsbilanz (Wm <sup>-2</sup> )
QSm <sub>Tag</sub>	Strahlungsbilanz zwischen Sonnenauf- und Sonnenuntergang (Wm <sup>-2</sup> )
QSm <sub>Tag</sub>	Strahlungsbilanz zwischen Sonnenauf- und Sonnenuntergang, korrigiert durch Ausschluss von »Sonnenflecken«-beeinflussten Werten (Wm <sup>-2</sup> )
QS'Σ	Strahlungsbilanzsumme, korrigiert durch Ausschluss von »Sonnenflecken«-beeinflussten Werten (Wm <sup>-2</sup> )
R <sup>2</sup>	Bestimmtheitsmaß
v	Resultierender Vektor aus Windgeschwindigkeit und -richtung von Windmesswerten
s	Standardabweichung
TOPEX	Topographic exposure = Windexpositionsindex
Tu	Bodenart (stark bis schwach schluffiger Ton) vgl. LESER & KLINK (1988)
ΔT	Temperaturamplitude (K)
ü. M.	über Meeresspiegel
UTC	Coordinated Universal Time (Abkürzung ist kein Initialwort); Koordinierte Weltzeit
v. h.	vor heute
VZ	Vergleichszeitraum der Messungen (25.6.-19.8)
WG	Windgeschwindigkeit (ms <sup>-1</sup> )

---

$WG_1$	Windgeschwindigkeit in 2 m Höhe (Term zur Umrechnung von Messwerten der Windgeschwindigkeit in unterschiedlichen Messhöhen) ( $ms^{-1}$ )
$WG_2$	Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe (Term zur Umrechnung von Messwerten der Windgeschwindigkeit in unterschiedlichen Messhöhen) ( $ms^{-1}$ )
$WG_dmax$	Maximaler Tagesmittelwert der Windgeschwindigkeit ( $ms^{-1}$ )
$WG_h$	Stundenmittel der Windgeschwindigkeit ( $ms^{-1}$ )
$WGM$	Mittlere Windgeschwindigkeit ( $ms^{-1}$ )
$WGM_{2m}$	Mittlere Windgeschwindigkeit umgerechnet auf 2 m Höhe ( $ms^{-1}$ )
$WGmax$	Maximalwert der Windgeschwindigkeit ( $ms^{-1}$ )
$WG_{Nacht}$	Nächtliche Windgeschwindigkeit ( $ms^{-1}$ )
$WHC$	Windthrow Hazard Classification (vgl. MILLER 1985)
$WMO$	World Meteorological Organization = UN-Zusammenschluss der nationalen Wetterdienste
$WR$	Windrichtung ( $^{\circ}$ )
$WRm$	Hauptwindrichtung innerhalb eines definierten Zeitraums ( $^{\circ}$ )
$WR_{prim}$	Primäre Hauptwindrichtung
$WR_{sek}$	Sekundäre Hauptwindrichtung
$Z$	Messwertgeberhöhe (m)
$Z_1$	Messwertgeberhöhe 2 m (Term zur Umrechnung von Messwerten der Windgeschwindigkeit in unterschiedlichen Messhöhen)
$Z_2$	Messwertgeberhöhe 10 m (Term zur Umrechnung von Messwerten der Windgeschwindigkeit in unterschiedlichen Messhöhen)

# 1 Einleitung und Fragestellung

Die boreale Landschaftszone (Taiga) erstreckt sich als zirkumpolarer Gürtel über den nördlichen Bereich Eurasiens und Nordamerikas. Sie wird durch die polaren Regionen im Norden und die kühlgemäßigten Breiten im Süden begrenzt. In Eurasien endet die nördliche Ausdehnung der Borealis bei etwa 70° nördlicher Breite. Die südliche Abgrenzung ist in Europa im Bereich von etwa 60° N zu finden, während sie im fernen Osten südlich von 45° N anzutreffen ist. In Nordamerika liegt die Verbreitungsgrenze zwischen 45° und 65° N (HARE & RITCHIE 1972).

Auf Grundlage der klimatologischen Abgrenzung nach TROLL & PAFFEN (1964) ist die boreale Landschaftszone mit etwa  $19,5 \cdot 10^6 \text{ km}^2$  - entsprechend 13 % des gesamten Festlands - die größte Waldregion der Erde (TRETER 1993). Je nach Definition beinhaltet die Borealis zwischen 25 % und 33 % der Waldfläche der Erde (WINDHORST 1979, OLSSON 1995). Darüber hinaus ist das Klima als Steuerungsgröße für alle physikalischen, chemischen und biologischen Prozesse einer der entscheidenden Faktoren dieses Ökosystems. Sowohl Relief, Boden, Wasserhaushalt und Lebewelt als auch ihre Prozesse untereinander unterliegen den besonderen Klimabedingungen in der Borealis. Kurze Sommer und die damit verbundene kurze Vegetationsperiode sowie lange Winter mit tiefen Temperaturen und geringer Einstrahlung sind explizit für die Lebewelt bestimmende Faktoren.

Trotz ihrer peripheren Lage unterliegen die borealen Wälder in vielen Regionen Europas, Nordamerikas und zunehmend auch Asiens einer intensiven forstwirtschaftlichen Nutzung. Im Rahmen des Bewirtschaftungsmanagements der Wälder finden großflächige Einschlagmaßnahmen statt, die im Wesentlichen der Versorgung industrieller Produktionsprozesse (Papier, Baumaterial, Verpackungen) dienen (HENNINGSEN & THIES 1998, NEWELL 2004). War der Holzverbrauch aus borealen Regionen bis Ende der neunziger Jahre durch die Staaten Nordamerikas, Europas und Japan bestimmt, so ist in jüngerer Vergangenheit ein erheblicher Anstieg der Einschläge durch eine hohe Nachfrage aus den sich schnell entwickelnden Ländern China und Südkorea zu verzeichnen. Eine zusätzliche Verschärfung ergibt sich aus den Folgen intensiver Überflutungen in China 1998, deren Ursache in weitreichenden Abholzungen in den Oberläufen der großen Ströme zu suchen ist. Einschlagsverbote und der Schutz naturnaher Restwälder bei gleichzeitig steigendem Bedarf haben zu einer Verlagerung der Transportwege und zu einem Ausweichen auf die borealen Waldbestände geführt (NEWELL 2004). Abbildung 1 zeigt u. a. die Verdreifachung der chinesischen Holzimporte aus Russland in nur vier Jahren.

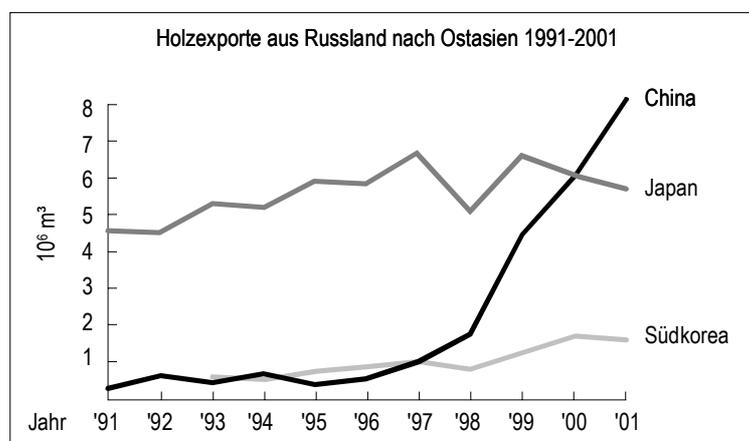


Abb. 1: Entwicklung der Holzexportmengen Russlands nach Nordostasien (NEWELL 2004)

Auch längerfristig ist eine Trendwende nicht absehbar, so wird für das Jahr 2010 ein jährlicher Importbedarf Chinas von  $110 \cdot 10^6 \text{ m}^3$  und für das Jahr 2025 ein Rundholzmengendefizit von etwa  $200 \cdot 10^6 \text{ m}^3$

prognostiziert (NEWELL 2004). Der zuletzt genannte Wert entspricht etwa der vierfachen Jahreseinschlagsmenge Finnlands aus dem Jahr 2000 (UNECE/FAO 2005).

Die Nutzung der borealen Landschaftszone als »Holzmine für die Welt« besitzt weitreichende klimaökologische und sozioökonomische Auswirkungen (FENNER 1994, 1998). Die heute vorherrschenden Nutzungsformen lassen sich unter dem Begriff »industrieller Holzabbau« zusammenfassen, wobei regionale Unterschiede von Bedeutung sind (LINDAHL 1998). Während im sibirischen Teil der Russischen Föderation vorwiegend Kahlschläge das Bild der Forstnutzung bestimmen (NEWELL 2004), ist die Rodungstätigkeit in Kanada meist mit anschließender Aufforstung verbunden (LINDAHL 1998). In der europäischen Borealis hat sich in einer mehr als einhundertjährigen Nutzungstätigkeit eine Plantagenwirtschaft durchgesetzt in der sich in Zyklen Einschlag, Bodenmelioration und Aufforstung sowie erneuter Einschlag abwechseln (HEIKKINEN 1988, OLSSON 1995, ÖSTLUND et al. 1997).

Entsprechend groß ist die Bedeutung der Ressource Wald für die nationalen Ökonomien der Länder Fennoskandiens. In Finnland, in dessen nördlichem Teil sich das Untersuchungsgebiet dieser Studie befindet, sind etwa 86 % der Landesfläche als »Forstfläche« klassifiziert (TOMPPO 2000). Damit weist das Land die höchste Walddichte Europas auf. In der Holzindustrie arbeiten ca. 95000 Personen, das entspricht 4,1 % aller Beschäftigten in Finnland (YRJÖLÄ 2002). Diese erwirtschaften zusammen mit angeschlossenen Industriebereichen etwa 30 - 35 % der jährlichen Exporterlöse Finnlands (MÄLKÖNEN 2000).

Die einleitend beschriebenen klimatologischen Bedingungen der Borealis stellen für forstwirtschaftliche Nutzungen einen bestimmenden bzw. limitierenden Faktor dar. Geringe Wachstumsraten der Vegetation sind verbunden mit langfristigen Veränderungen im Landschaftshaushalt nach Einschlägen. Selbst unter den - bezogen auf die Breitenlage - günstigen Klimaverhältnissen Nordfinlands erreichen Nadelbäume je nach Art und Standort erst nach 100 bis 160 Jahren einen Zustand, der einen erneuten Einschlag erlaubt (YRJÖLÄ 2002). Lokale Ungunstfaktoren wie besondere Höhenlagen erschweren eine Aufforstung oder Regeneration zusätzlich (TOLVANEN & KUBIN 1990).

Veränderungen im Strahlungs-, Temperatur- und Windregime sowie im Wasserhaushalt durch Kahlschläge können abiotische Gefährdungspotenziale verstärken und so einer nachhaltigen Nutzung sowohl in ökologischer als auch in ökonomischer Hinsicht entgegen stehen. Typische Beispiele sind Frostgefährdungen während der Vegetationsperiode (LINDKVIST & CHEN 1997, BEUKER et al. 1998) oder Schäden durch Wind- und Schneelasten (JALKANEN & MATTILA 2000, MITCHELL & LANQUAYE-OPOKU 2004).

Die Ergebnisse früherer Untersuchungen haben dazu beigetragen, dass klimatologische Aspekte Eingang in Empfehlungen zur forstwirtschaftlichen Praxis gefunden haben (STATHERS et al. 1994, METLA 2000, MITCHELL 2000). In jüngerer Zeit wurden darüber hinaus eine Reihe von Modellen zur Ausweisung von abiotischen Gefährdungen vorgestellt. Die Ansätze versuchen, räumliche Verteilungen von Gefährdungen in Form mechanistischer oder empirischer Modelle auszuweisen. Gemeinsames Merkmal der Modelle ist ein vergleichsweise hoher Eigenaufwand zur Erhebung der benötigten Daten für die angeforderten Variablen. Im Zusammenspiel moderner Vermessungs- und Erhebungsmethoden sowie steigender EDV-Kapazitäten entstanden zeitlich parallel Bestände großflächiger Daten mit hoher Auflösung, deren Qualität heute eine kommerzielle Vermarktung erlaubt (vgl. VUORELA 1997, TOMPPO & HEIKKINEN 1999).

Aus diesen Entwicklungen ergaben sich für diese Untersuchung zwei primäre Fragestellungen zur geländeklimatologischen Relevanz von Abholzungen in borealen Wäldern. Zum einen galt es, die geländeklimatologischen Veränderungen zu erfassen und zu analysieren, die im Verlauf der anthropogen überprägten Waldsukzession entstehen, und zum anderen sollte die Eignung von Modellen zur Ausweisung abiotischer Gefährdungen im Hinblick auf ihre räumliche Übertragbarkeit untersucht werden. Letzteres

geschah unter der Maßgabe der zur Verfügung stehenden Datenbestände öffentlicher oder privater Anbieter.

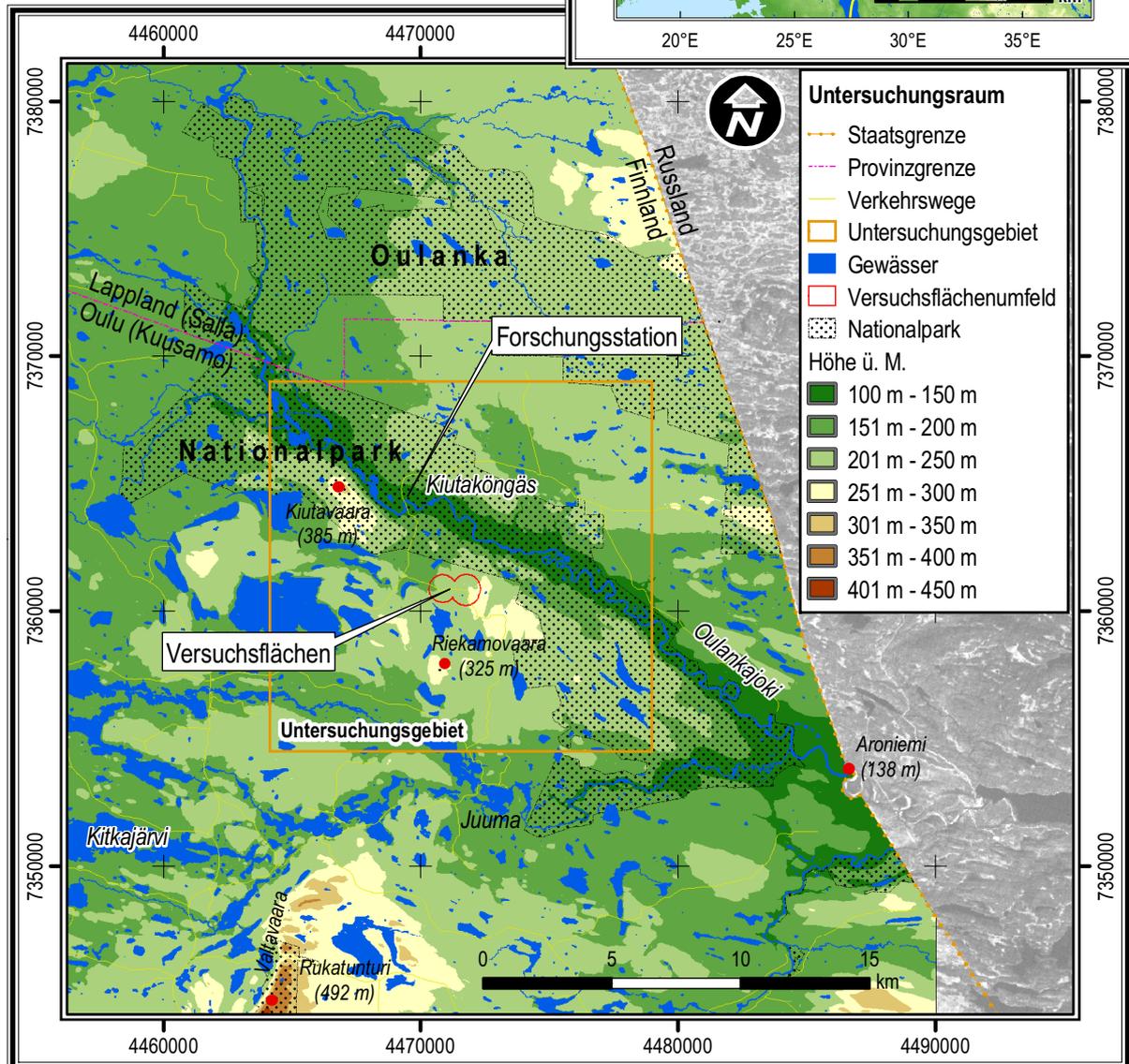
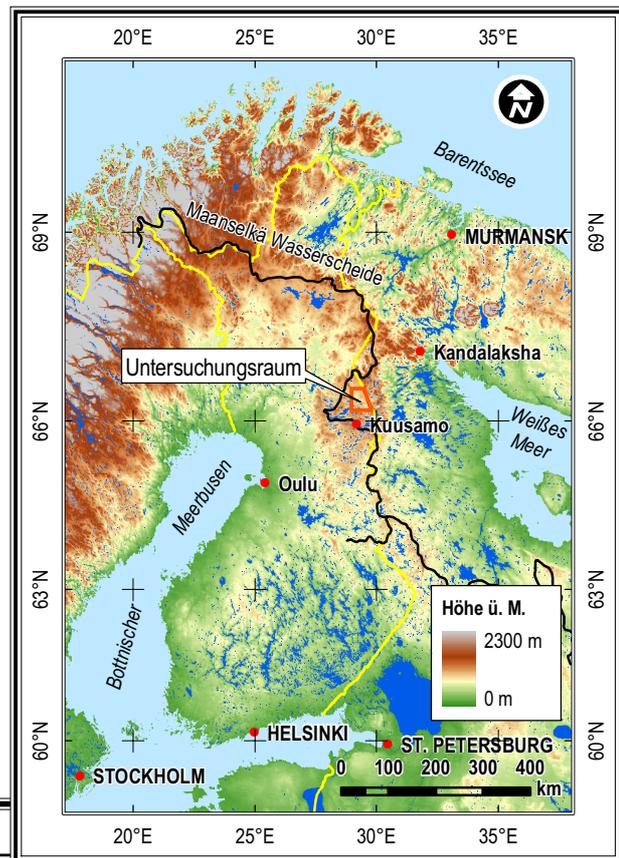
- Für den ersten Schwerpunkt wurden im Rahmen von zwei aufeinander folgenden Vegetationsperioden auf drei Versuchsflächen, welche die Waldsukzessionsstadien Altbestand, Kahlschlag und Aufforstung repräsentierten, geländeklimatologische Untersuchungen durchgeführt. Über das Maß früherer Untersuchungen hinaus ließen sich mit Hilfe von drei Wetterstationen die Kenngrößen für den Strahlungs-, Temperatur- und Wasserhaushalt mit hoher zeitlicher Auflösung erfassen. Die Messkampagnen waren darüber hinaus mit Aufnahmen der Baum-, Strauch- und Krautschicht sowie einer Vermessung der Versuchsflächen der Erfassung des Kronenraumes zur Differenzierung der Sukzessionszustände verbunden. Gleichzeitig galt es, die Standorte der Versuchsflächen im lokalklimatologischen Kontext mit den Messreihen der in der Nähe befindlichen Stationen des finnischen Wetterdienstes zu betrachten. Weitere Teilaspekte bestanden in der Analyse der Standortverhältnisse während des Auftretens von Strahlungswetterlagen, die zu einer Betonung der Unterschiede führen und von Wetterlagen, die im borealen Raum mit Gefährdungen für die Vegetation verbunden sind. Als Beispiele seien windarme, ausstrahlungsreiche Nächte und die damit verbundene Bodenfrostgefahr oder besondere Windereignisse genannt.
- Im Zusammenhang mit dem zweiten Schwerpunkt wurden aktuelle Modelle zur Ausweisung von Frost- oder Windgefährdungen im Hinblick auf ihre Anforderungen an Variablen und die Verfügbarkeit zugehöriger Daten untersucht. Der Hintergrund dieser Fragestellung besteht in dem Problem, dass viele Modelle auf Variablen basieren, deren zugrunde liegende Daten in hohem Maße selbst erhoben werden müssen, was einen universellen Einsatz einschränkt. Am Beispiel des Untersuchungsgebiets Oulanka wurden die Datengrundlagen der nationalen Katasterverwaltung Finnlands, des landesweiten digitalen Höhenmodells und der nationalen »Landnutzung und Waldinventur« auf die Möglichkeit zur Extraktion klimaökologischer Standorttypen untersucht und mit den Anforderungen der zuvor genannten Modelle verglichen. Zu diesem Zweck wurden die Ansprüche der Modelle und ihrer verwendeten Variablen in Relation zu den Angeboten räumlicher Daten durch öffentliche und private Dienstleister gesetzt.

## 2 Untersuchungsraum

Der Untersuchungsraum im nordöstlichen Teil Finnlands (Abb. 2) erstreckt sich über den Bereich von  $66^{\circ} 11' N$  und  $28^{\circ} 58' E$  bis  $66^{\circ} 32' N$  und  $29^{\circ} 28' E$  (Abb. 3) und umfasst in etwa den Bereich des Kartenblatts 4613 »Rukatunturi« (Maastokartta 1:50000, NLS 1998). Gleichzeitig deckt sich der Raum weitgehend mit dem zentralen Teil des finnischen Einzugsbereichs des Oulankajoki im Norden des Kuusamo-Hochlands (KOUTANIEMI 1984). Administrativ gehört der nördliche Bereich zur Provinz Lappland (Lapin lääni) und begrenzt die Kommune Salla nach Süden, während der zentrale

Abb. 2: Lage des Untersuchungsraums in Fennoskandien (rechts)

Abb. 3: Übersicht über Untersuchungsraum und Untersuchungsgebiet (unten)



und südliche Bereich von der Kommune Kuusamo verwaltet wird und Teil der Provinz Oulu (Oulun lääni) ist. Nach Osten wird der Untersuchungsraum durch das Gebiet der Russischen Föderation begrenzt.

Im Zentrum des Untersuchungsraums, etwa 20 km südlich des Polarkreises, liegt das Untersuchungsgebiet, dessen Fläche als Grundlage für die Evaluation der einleitend genannten Modellansätze diente. Darüber hinaus befanden sich im Untersuchungsgebiet die Versuchsflächen (66° 20' N; 29° 22' E), auf denen die geländeklimatologischen Messungen erfolgten. Ebenfalls innerhalb des Gebiets liegt die Wetterwarte der Forschungsstation Oulanka, die neben der Wetterstation in Kuusamo einen Referenzstandort darstellte.

Die Festlegung auf den Untersuchungsraum erfolgte in Abwägung inhaltlicher und praktischer Gesichtspunkte. Einerseits bestand die Forderung nach einem Untersuchungsraum in der borealen Landschaftszone und nach Versuchsflächen, die einer typischen, rezenten Waldnutzung unterliegen. Die Kahlschlag- und die Aufforstungsfläche sollten darüber hinaus in relativer Nähe zu einem Altbestand liegen und in nicht zu großer Distanz zu offiziellen Referenz-Wetterstationen. Andererseits waren logistische Gründe wie die Erreichbarkeit des Untersuchungsraums in einem angemessenen Zeitraum sowie die Nutzungsmöglichkeiten einer Infrastruktur zur Betreuung der Klimastationen nicht unbedeutende Auswahlkriterien. Daneben sprachen die gute Datenlage und kartographische Erfassung Finnlands im Allgemeinen sowie die intensive Erforschung des im Untersuchungsraum gelegenen Oulanka-Nationalparks im Speziellen für die Auswahl des Untersuchungsraums. Ein nicht zu vernachlässigender Punkt war nicht zuletzt die langjährige Zusammenarbeit zwischen der Forschungsstation Oulanka (ehem. Biologische Forschungsstation Oulanka) der Universität Oulu und dem Institut für Geographie der Universität Bremen.

## 2.1 Naturräumliche Charakterisierung des Untersuchungsraums

Der Untersuchungsraum ist Teil des »Kuusamo-Hochlandes« und liegt etwas östlich der Maanselkä-Hauptwasserscheide zwischen Bottnischem Meerbusen im Westen und Weißem Meer im Osten (Abb. 2). Das Hochland bildet eine Nord-Süd-Achse und liegt etwa zentral in einer Entfernung von jeweils 170-180 km zu beiden Meeren. Die Einzugsbereiche der Hauptfließgewässer Oulankajoki und Kitkanjoki werden über die Kandalakschabucht in das Weiße Meer entwässert (KOUTANIEMI 1983).

Die wesentlichen Relieftypen im Untersuchungsraum sind das zuvor genannte Kuusamo-Hochland und die Talstrukturen von Oulankajoki und Kitkanjoki. Das Hochland ist durch eine hügelige, meist waldbestandene Drumlinlandschaft, Seenketten und zahlreiche Torfmoore in einer WNW-ESE- bzw. NW-SE-Ausrichtung als Folge tektonischer Prozesse und der Weichselvereisung gekennzeichnet (AARIO et al. 1974, KOUTANIEMI 1999). Die meisten Stillgewässer des Hochlands sind in Höhen zwischen 240 und 280 m ü. M. gelegen, während die umliegenden Erhebungen über 350 m erreichen (KOUTANIEMI 1983). Der höchste Punkt des Hochlands ist der etwa 20 km südwestlich der Versuchsflächen liegende Rukanturi mit 492 m (KOUTANIEMI 1983). Die bedeutendsten Erhebungen innerhalb des Untersuchungsgebiets sind der 380 m hohe Kiutavaara und der Riekamovaara mit 325 m (Abb. 3).

Mit einer Höhenlage zwischen 137 und 160 m unterscheidet sich das Tal des Oulankajoki orographisch deutlich vom umgebenden Hochland. Die etwa 30 km lange und ein bis zwei Kilometer breite Talstruktur öffnet sich in südöstlicher Richtung. Etwa zehn Kilometer östlich der russischen Grenze mündet der Oulankajoki in den Paanajärvi, der als geologische Depression eine Tiefe von 124 m erreicht (HÄNNINEN 1912, KOUTANIEMI 1979). Etwa drei Kilometer westlich der Grenze mündet der Kitkanjoki von Südwesten in den Oulankajoki. Flussaufwärts ist der Kitkanjoki durch canyonartige Strukturen mit annähernd senkrecht aufragenden Uferbereichen geprägt. Im Übergangsbereich zwischen Hochland und Talagen beider Fließgewässer sind beachtliche Höhenunterschiede anzutreffen. Im Durchschnitt beträgt die Differenz zwischen der 500 bis 1000 m breiten Talsohle des Oulankajoki und dem Hochland etwa 100 m; im Mittellauf sind am Kiutavaara sogar 225 m zu verzeichnen (MATUSZKIEWICZ et al. 1995). Der

Höhenunterschied im Seitental des Kitkanjoki beträgt etwa 70 bis 100 m. Die Talsohle am Zusammenfluss beider Gewässer ist das tiefstliegende Gebiet der finnischen Ostgrenze im Umkreis von 600 km (KOUTANIEMI 1984).

### 2.1.1 Geologisch-morphologische Entwicklung des Untersuchungsraums

Das Grundgestein im Untersuchungsraum (Abb. 4) wird im Wesentlichen aus Schiefen gebildet, die aus Sedimenten des frühen Proterozoikums entstanden und während der Sveokarelidischen Orogenese vor 1,7 bis 1,9 Mrd. Jahren gefaltet wurden (SILVENNOINEN 1991). Außerdem existieren vulkanische Gesteine wie Basalt und Tuffit. In dieser Orogenese entstand aus älteren, etwa 2,2-2,3 Mrd. Jahre alten Sedimentationsabfolgen die sog. Karelische Formation, deren Gesteine hauptsächlich aus Orthoquarziten, Arkosen, Amphibolschiefen und Dolomiten bestehen (NOWOK 1993, KOUTANIEMI 1999). In der Formation finden sich vulkanische Intrusionen, die vor 2,20 und 2,08 Mrd. Jahren entstanden und aus Albit-Diabasen und Hornblenditen bestehen (SILVENNOINEN 1991). Südlich und östlich wird die Schieferzone durch die Orthogneise des archaischen Kerns der Prävekokareliden mit einem Alter zwischen 2,6 und 2,8 Mrd. Jahren begrenzt, während im Nordwesten spätkarelische Granite das Grundgestein bilden (SIMONEN 1971, SILVENNOINEN 1972, KOUTANIEMI 1979). Die anstehenden Gesteine der proterozoischen Formationen, besonders die karbonathaltigen Dolomite, sind bedeutend für die Vegetation, da sie eine reiche Nährstoffversorgung gewährleisten, während die sauren archaischen Gesteine durch ein geringes Nährstoffangebot geprägt sind (KOUTANIEMI 1999).

Im Zuge der tektonischen Bewegungen sind im Untersuchungsraum Störungen in einer NW-SE-Achse meist entlang von Gesteinen unterschiedlicher Härte entstanden. Diese Scher- oder Quetschungsbereiche konnten während der Kaltzeiten des Pleistozäns leichter erodiert werden als die umliegenden Bereiche und geben die Fließrichtung der rezenten Fließgewässer vor. Der Oulankajoki folgt praktisch in seinem gesamten Lauf einer Bruchzone (HÄRME 1961, KOUTANIEMI 1979). Der Störungsbereich zwischen härterem Quarzit und weicherem Dolomit ist am Wasserfall des Kiutaköngäs durch unterschiedliche Färbung der anstehenden Gesteine erkennbar (vgl. SCHWANTZ 2004).

Das heutige Relief des Untersuchungsraums ist zu großen Teilen das Ergebnis der Weichselkaltzeit und fluviatiler sowie mariner Prozesse des folgenden Postglazials (KOUTANIEMI 1999). Im Zuge klimatologischer Schwankungen unterlagen die Eismassen einer Serie von Vorstößen und Rückzügen (vgl. KAISER 1993), die sowohl verantwortlich sind für die charakteristischen Formen des Hochlands wie Drumlins, Oser und Endmoränen (AARIO et al. 1974, GLÜCKERT 1974, AARIO & FORSSSTRÖM 1979) als auch für die Aufweitung und Ausformung der Tallagen des Oulankajoki. Das Fehlen von Nunatakern lässt darauf schließen, dass in Zeiträumen größter Vereisung eine vollständige Eisbedeckung herrschte (KOUTANIEMI et al. 1994). Die zuvor genannten Erosionsvorgänge waren nach AARIO et al. (1974) bzw. KOUTANIEMI (1979) im Untersuchungsraum besonders effektiv, da die Fließrichtung der Eismassen der Richtung der tektonischen Störungszonen entsprachen (Abb. 4). Vor etwa 9500 Jahren wurde in der Region das Postglazial mit dem vollständigen Rückzug der Gletscher eingeleitet (HYVÄRINEN 1973, HEIKKINEN & KURIMO 1977, AARIO & FORSSSTRÖM 1979). Während im Hochland nur noch geringe Erosionsprozesse stattfanden, füllten sich die Talräume mit glazifluvialen Sedimenten der sich zurückziehenden Gletscher. Diese Phase dauerte jedoch nur 150 bis 200 Jahre, bevor rein fluviatile und äolische Prozesse in der Reliefgestaltung dominant wurden (KOUTANIEMI 1979). Im Untersuchungsraum entstanden Dünen, die in einigen Tallagen noch existent sind. Die Entstehung einer Vegetationsdecke beendete die Phase der Dünenbildung nach wenigen Jahrhunderten vor etwa 8900 - 9000 Jahren (KOUTANIEMI 1979). In Folge der beginnenden isostatischen Hebung änderte sich die Neigung des Untersuchungsraums, wodurch die Erosionsrate der Fließgewässer anstieg und zu einer Eintiefung der Talsohlen führte. Der Oulankajoki hat die Sedimente je nach Zusammensetzung um 20 bis 35 m

erodiert (KOUTANIEMI 1979). In Folge einer reduzierten isostatischen Hebung findet in jüngerer Zeit fast ausschließlich laterale Erosion statt, in der z. B. vor etwa 1500 bis 1600 Jahren ältere Mäander abgeschnitten wurden (vgl. KOUTANIEMI & RONKAINEN 1983).

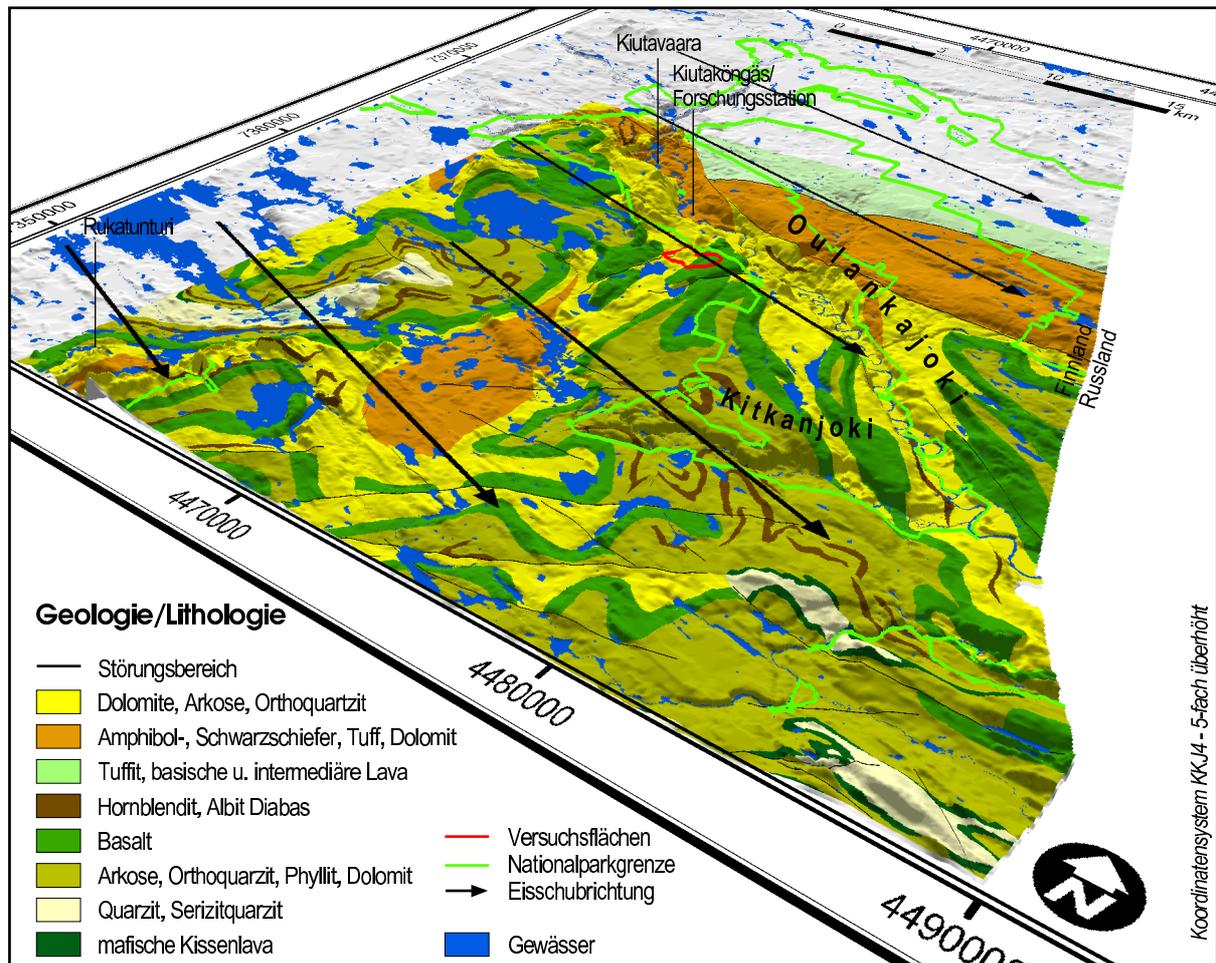


Abb. 4: Geologische Strukturen und Morphographie im Untersuchungsraum (Quelldaten: GSF 1999; NLS 1999a)

In Folge der glazialen Geschichte stellen die im Untersuchungsraum vorhandenen Moränenablagerungen die vorherrschenden Mineralbodenarten dar (SÖYRINKI & SAARI 1980). In Teilen des Untersuchungsraums, besonders in den nördlichen Bereichen, überlagern Torfböden die Moränenbereiche. Im Wesentlichen sind dies nach MATUSZKIEWICZ et al. (1995) Seggen- und Braunmoorstorfe mit einem geringen bis mittleren Trophiegrad, es existieren aber auch *Sphagnum*-Torfe (SÖYRINKI & SAARI 1980). In der Talsohle des Oulankajoki finden sich glazifluviale Sedimente, deren Korngröße flussabwärts abnimmt. Im östlichen Bereich hat der Fluss vegetationslose Böschungsbereiche in den Prallhängen und sandbankartige Ufer in den Gleithängen gebildet (Abb. 5). Anstehendes Grundgestein ist in den Erosionsbereichen der Fließgewässer und an den Hanglagen des Valtavaaramassivs zu finden. Weitere Bereiche auf meist westlich exponierten Flächen des Hochlands entstanden durch die Schubrichtung glazialer Eismassen von NW nach SE. Entsprechend sind ostexponierte Lagen mehrheitlich durch Moränenablagerungen gekennzeichnet (SILVENNOINEN 1972). Eine Besonderheit des Untersuchungsraums stellt das lokale Vorkommen karbonathaltiger Moränenbereiche in Folge des anstehenden Dolomits dar (SÖYRINKI & SAARI 1980). Diese Bereiche bieten einer Reihe von Pflanzengesellschaften mit eutrophen Ansprüchen eine Lebensgrundlage (SAARI 1978).

Nach Untersuchungen durch SEIFERT (1979, 1981) ist die Podsolierung unabhängig vom Ausgangsgestein der dominante Bodenbildungsprozess im Untersuchungsraum. Dafür verantwortlich ist die

klimabedingte Entwicklung einer Koniferen- und Zwergstrauchvegetation und deren Rohhumusbildung und starke Versauerung. Vergleichbare mitteleuropäische Bodentypen wie Braunerde entstehen lediglich als Übergangserscheinungen, so als Braunerdepodsol auch auf den Versuchsflächen (BUKTA 2001). Teilweise ist die Bodenbildung durch Stauwasser hydromorph überprägt (SEIFERT 1979).

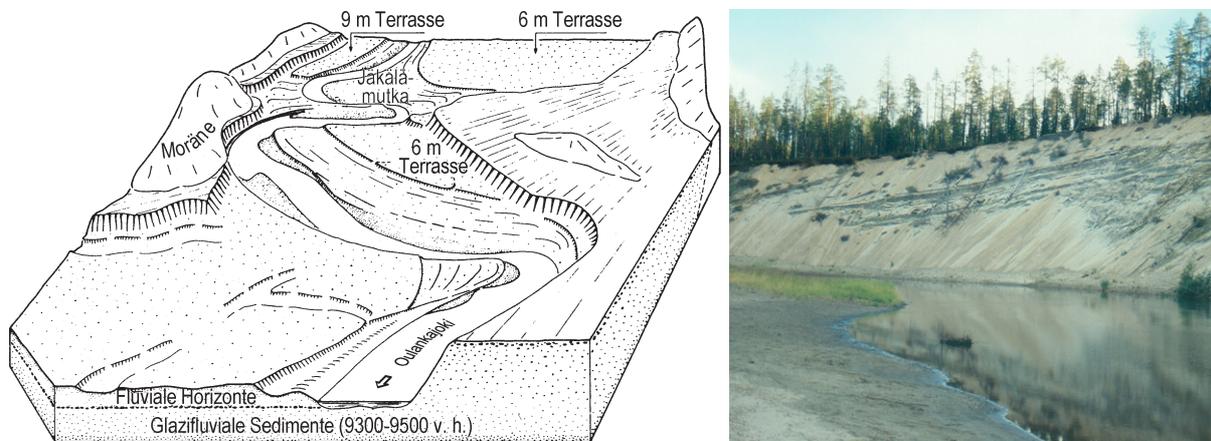


Abb. 5: Erosions- und Akkumulationsformen in den glazifluvialen Sedimenten im Tal des Oulankajoki - Diagramm nach KOUTANIEMI (1987), verändert

### 2.1.2 Vegetation

Innerhalb des Untersuchungsraums ist besonders das Gebiet des Nationalparks in floristischer Hinsicht bekannt für seine große Artenvielfalt (SÖYRINKI & SAARI 1980). Erste Untersuchungen wurden bereits vor 1772 durchgeführt. Im 19. und 20. Jahrhundert folgte eine Vielzahl von Veröffentlichungen über das Gebiet (SÖYRINKI & SAARI 1980). In einer Gliederung überregionaler Vegetationszonen, deren Definitionskriterien im Wesentlichen klimatologischer, edaphischer, floristischer bzw. pflanzensoziologischer Natur sind, ordnen AHTI et al. (1968) den Raum in die nordboreale Zone ein (Abb. 6). Aufgrund der verhältnismäßig großen Höhenunterschiede unterteilt HÄMET-AHTI (1973) das Gebiet zusätzlich vertikal in eine (oro-)hemiarktische und eine mittelboreale Zone. Während das Hochland durch einen Wechsel aus borealem Nadelwald (Taiga), Torfmooren und Seen geprägt ist, zeichnet sich das Tal des Oulankajoki durch eine hochvariable, stark standortabhängige Vegetation mit einer Vielzahl von floristischen Raritäten wie *Calypso bulbosa*, *Lonicera caerulea* oder *Actaea erythrocarpa* aus (vgl. SAARI 1978, VIRAMO 1995). Etwa 80 % der Fläche des Untersuchungsraums sind bewaldet (NLS 1999b). Ausgehend von der finnischen Nomenklatur der Waldvegetation nach CAJANDER (1909, 1921) dominieren mäßig trockene Kiefernwälder des *Empetrum-Myrtillus*-Typs und frische Fichtenwälder des *Hylocomium-Myrtillus*-Typs die Bestände der Region (KALELA 1961, HÄMET-AHTI 1973). Außerdem finden sich verschiedene sog. Heide-, hainartige Heide- und Hainwälder verschiedener Trockenstufen (SÖYRINKI et al. 1977, SÖYRINKI & SAARI 1980). In der Klassifizierung der finnischen Waldvegetationszonen nach KALELA (1958) ist das Gebiet der finnischen Nadelwaldzone von Peräpohjola (Abb. 7) zuzuordnen, die sich im Vergleich zu den südlicheren Wäldern durch lichtere Bestände, geringeres jährliches Wachstum und andere Wuchsformen der dominanten Baumarten *Pinus sylvestris* und *Picea abies* unterscheidet (KALELA 1961). Die Zahl der vorkommenden Baumarten ist relativ gering, es treten hauptsächlich *Picea abies*, *Pinus sylvestris*, *Juniperus communis*, *Populus tremula* sowie diverse *Salix*- und *Betula*-Arten auf. Ebenfalls vorhanden sind *Alnus incana*, *Prunus padus* sowie *Sorbus aucuparia* (HÄMET-AHTI 1973).

Der Untersuchungsraum wird der Aapamoorzone von Peräpohjola zugeordnet (RUUHIJÄRVI 1960, (EUROLA & RUUHIJÄRVI 1961). Aapamore treten in der Region als Nieder- und Übergangsmoore auf, sind meist großflächig, baumlos und oft schwer begehbar. Nährstoffe werden hauptsächlich durch

Frühjahrsüberflutungen eingetragen (HANNELIUS & KUUSELA 1995). Im Untersuchungsraum finden sich primär eutrophe Braunmoore, Rimpi-Braunmoore, Braunmoor-Reisermoores und Braunmoorbrüche. Daneben lassen sich besonders in der Kommune Salla auch mesotrophe Moore und vereinzelt oligotrophe Moorbereiche finden (SÖYRINKI & SAARI 1980).

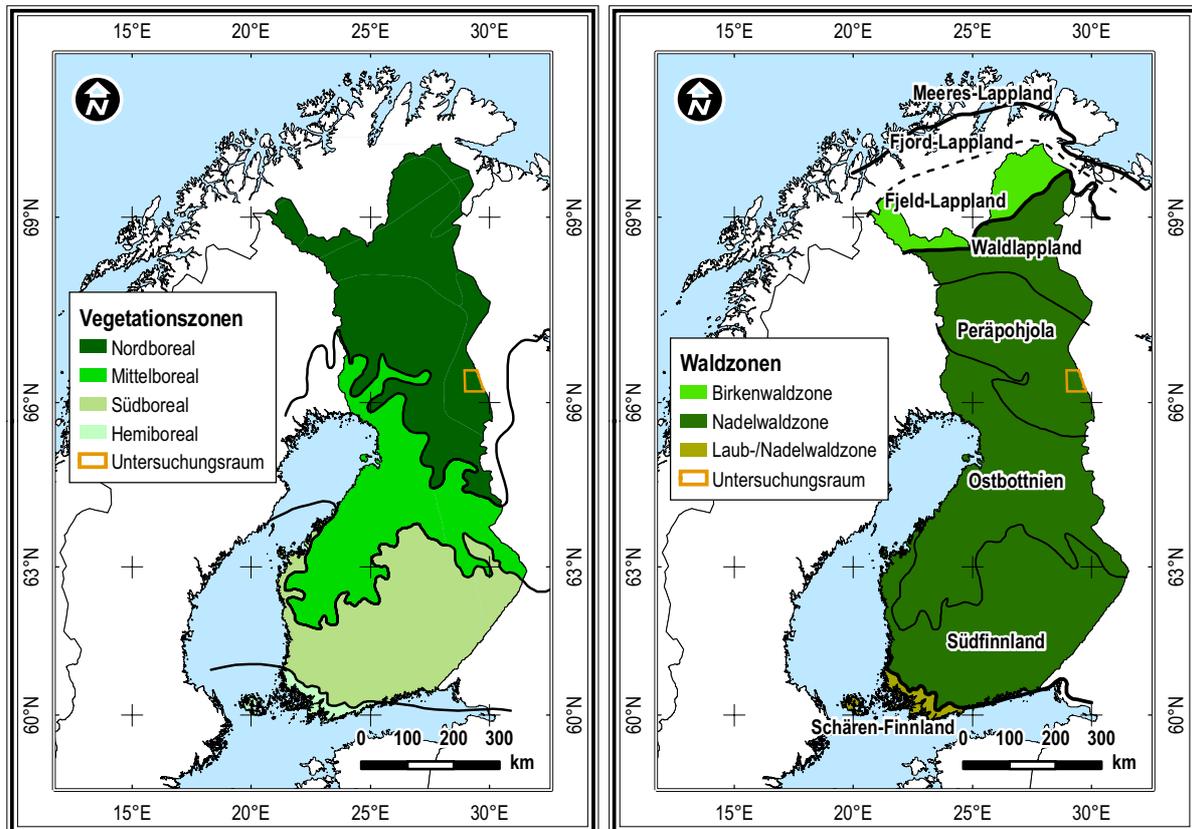


Abb. 6/7: Vegetationszonen Finnlands nach AHTEI et al. (1968) und Waldvegetationszonen Finnlands nach KALELA (1961)

Wie zuvor angedeutet hat sich in den Tallagen der größeren Fließgewässer, besonders am Oulankajoki, eine vielfältige, stark petrographisch bestimmte, standortabhängige Vegetation ausgebildet. Ursache ist die Kombination verschiedener Ausgangsgesteine (vgl. Kap. 2.1.1), die teilweise hohe Reliefenergie an den Talrändern sowie die Vielfalt der Erosionsformen in den Gewässerläufen. Im Gewässerbett existieren z. B. Überschwemmungswiesen, die aufgrund früherer Mahd und fluvialer Akkumulation erweitert oder durch Erosionsvorgänge verändert wurden (SÖYRINKI & SAARI 1980). Daneben finden sich offene, sandige Standorte, die entsprechenden Spezialisten Lebensraum bieten. Die Lage der Täler in West-Ost-Richtung ist verbunden mit nord- bzw. südexponierten Hanglagen, die Lebensraum für Pflanzengesellschaften bieten, die sonst nur deutlich nördlicher bzw. südlicher auftreten (PESOLA 1934, SÖYRINKI & SAARI 1980, VIRAMO 1995).

### 2.1.3 Anthropogene Einflüsse

Eine dauerhafte Besiedlung der Region begann etwa im 17. Jahrhundert mit dem Eintreffen von ostfinnischen Siedlern. Zuvor lebten in der Region ausschließlich Sámi als Halbnomaden von der Jagd, dem Fischfang und der Haltung kleinerer Rentierherden (VASARI 1990). Um 1670 begann die agrarische Nutzung in Form der Brandrodung durch die eingewanderten Siedler. Die auf diese Weise geschaffenen Agrarflächen ermöglichten ihren Nutzern den Anbau von Roggen und Gerste für einen Zeitraum von 40 - 50 Jahren, wenn auch mit abnehmendem Erfolg (VASARI 1990). Erst im 19. Jahrhundert endete die Brandrodung durch staatliche Sanktionen und fehlende Primärwälder, was zu einer Zunahme der

Viehhaltung und in deren Folge zur Heugewinnung in trockeneren Mooren führte. Der Besiedlungsdruck und die Brandrodung führten zu einer Verdrängung der Sámi bis 1720 und zu einer Vernichtung der Primärwälder im Zeitraum von 1680-1870, von der auch die Flächen des heutigen Nationalparks betroffen waren (VASARI 1990).

Die Region um den Oulankajoki wurde im 20. Jahrhundert Gegenstand von Diskussionen um die Erhaltung seiner geomorphologischen und botanischen Besonderheiten. Die Forderungen nach der Einrichtung eines Nationalparks im Umland von Kuusamo gehen zurück auf das Jahr 1897 (KALLIOLA 1980). Die Gründung des nach dem Oulankajoki benannten Nationalparks erfolgte jedoch erst 1956 im Zuge einer Ausweisung von landesweit zwölf Naturreservaten und sieben Nationalparks durch den Beschluss des finnischen Parlaments. Die Flächen des 107 km<sup>2</sup> großen Nationalparks wurden jedoch bereits in den Jahrzehnten zuvor nach Prinzipien des Naturschutzes verwaltet (SÖYRINKI & SAARI 1980). In den Jahren 1982 und 1989 wurde der Park um die nördlichen Moorbereiche und die Flächen im Unterlauf des Kitkanjokis erweitert. Er weist heute eine Fläche von 269 km<sup>2</sup> auf (VIRAMO o. D.). Im Nationalpark betreibt die Universität Oulu seit 1966 eine Forschungsstation, auf deren Gelände eine der Referenz-Wetterstationen steht.

Die rezenten Nutzungen in Untersuchungsraum sind hauptsächlich in der Forst- und Landwirtschaft sowie im Tourismus zu finden (VASARI 1990). Besonders der letztgenannte Bereich gewinnt zunehmend an Bedeutung. Eine touristische Infrastruktur hat sich hauptsächlich am Rukamassiv, im Tal des Kitkanjoki und im Umfeld des Oulanka-Nationalparks etabliert. Während am Rukatunturi eine Infrastruktur für den Wintersport aufgebaut wurde, dienen der Kitkanjoki als Raftingstrecke und der Oulankajoki als Kanu-Route während des Sommers. Im Nationalpark sind mit dem 80 km langen »Bärenpfad« und mehreren kürzeren Wanderwegen sowie einem Natur- und einem historischen Lehrpfad ebenfalls touristische Strukturen aufgebaut worden (SCHWANTZ 2004). Das südlich der Forschungsstation gelegene Informationszentrum der Nationalparkverwaltung wurde 1999 von etwa 150000 Besuchern aufgesucht (BUKTA 2001).

Die Landwirtschaft beansprucht etwa 2 % der Fläche des Untersuchungsraums (NLS 1999b), das entspricht dem Durchschnitt der Gemeinde Kuusamo (VASARI 1990). Die Flächen werden, wie im Norden und Osten Finnlands üblich, primär zur Heugewinnung als Futter für die Viehhaltung genutzt (vgl. HÄKKILÄ 1999). Neben der Viehhaltung existiert im Untersuchungsraum die Rentierhaltung, sodass auch nicht abgezaunte Flächen einer Beweidung unterliegen. Diese Nutzungsform betrifft auch die Flächen des Nationalparks (SÖYRINKI & SAARI 1980).

Die Holzwirtschaft gehört zu den augenfälligsten Nutzungen im Untersuchungsraum. Etwa 4 % der Fläche sind als Kahlschlagfläche ausgewiesen, unberücksichtigt bleiben dabei die aktuellen Aufforstungsflächen (NLS 1999b, 1999c). Bis in die Zeit vor dem Ersten Weltkrieg waren auch Flächen des heutigen Nationalparks vom Einschlag betroffen (SÖYRINKI & SAARI 1980). Mit der Schließung der Grenze nach Russland und dem damit verbundenen Ende der Flößwege endete die Einschlagstätigkeit. Rezent wird außerhalb des Nationalparks nach wie vor gerodet und anschließend meist aufgeforstet, wobei auch Flächen in Gewässernähe (KOUTANIEMI 1983) und in höheren Lagen eingeschlagen werden (TOLLVANEN & KUBIN 1990). Die fehlenden Wasserwege werden heute durch die Nutzung der Straßeninfrastruktur ersetzt.

## 2.2 Klima

Die bestimmenden Merkmale des Klimas in Finnland und damit auch des Untersuchungsraums ergeben sich im Wesentlichen aus der nördlichen Breite der Region und den damit verbundenen jahreszeitlichen Schwankungen im Strahlungs- und Temperaturregime. Von besonderer Bedeutung ist darüber hinaus die Lage Fennoskandiens im System der allgemeinen atmosphärischen Zirkulation in Verbindung mit der

relativen Nähe zum Atlantik und zur Ostsee im Westen sowie zu den Landmassen des Nordrussischen Tieflands im Osten (WALLÉN 1974, SCHWEDLER 1993).

### 2.2.1 Überregionale Klimabedingungen

Die Lage Finnlands zwischen 59,5° und 70,1° nördlicher Breite ist verbunden mit strahlungsreichen Sommermonaten, an denen die Sonne im Süden des Landes bis zu 18,5 Stunden und in Lappland ununterbrochen über dem Horizont steht (vgl. Tab. 1), während in den Wintermonaten ein Strahlungsdefizit besteht. Zur Wintersonnenwende beträgt die Tageslänge selbst im Süden lediglich 5,5 Stunden; an der Nordgrenze bleibt die Sonne im Dezember und Januar durchgehend unter der Horizontlinie.

Tab. 1: Tageslängen in unterschiedlichen Breitenlagen zur Sommer- bzw. Wintersonnenwende

Ort	nördl. Breite	Tageslänge*	
		21. Dezember	21. Juni
Utsjoki	69° 45'	0:00	24:00
Oulanka (Untersuchungsraum)	66° 20'	0:59	22:59
Helsinki	60° 12'	5:26	18:34
Bremen	53° 30'	7:18	16:41

\* Tageslänge ohne Berücksichtigung der Dämmerung

Der während der Sommermonate auftretende Strahlungsüberschuss ist für Vegetation und Landwirtschaft von großer Bedeutung, jedoch wird dadurch das Strahlungsdefizit des Winters nur teilweise kompensiert. Ein hoher Anteil der Sonneneinstrahlung wird aufgrund des geringen Einstrahlungswinkels in der Atmosphäre absorbiert bzw. reflektiert (SCHWEDLER 1993). Im Jahresmittel entsteht so ein Strahlungsdefizit zwischen 523 kWh m<sup>-2</sup> in den südlichen Landesteilen und 779 kWh m<sup>-2</sup> in Lappland (vgl. WALLÉN 1974, NORDSETH 1987). Für den Untersuchungsraum ergibt sich daraus ein durchschnittliches Defizit von etwa 700 kWh m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>.

Als Folge der Strahlungsunterschiede treten hohe jahreszeitliche Temperaturamplituden auf, die jedoch im Vergleich zu Räumen gleicher nördlicher Breite geringer ausfallen. Auch die Jahresmittel der Temperatur von etwa +6 °C im Süden bis -2 °C im Norden liegen deutlich über den Werten vergleichbarer Breitenlagen. Diese Klimagunst Fennoskandiens zeigt sich in einer der höchsten positiven Temperaturanomalien der Erde und entsteht primär durch den weitgehenden Ausgleich des Strahlungsdefizits durch Advektion wärmerer Luftmassen aus südlichen bzw. südwestlichen Richtungen und der Freisetzung latenter Wärmeenergie durch Kondensationsprozesse (WALLÉN 1974, NORDSETH 1987, SCHWEDLER 1993). Die Ursachen für den Lufttransport finden sich in der Lage Finnlands im Bereich der außertropischen Westwindzirkulation, die sich etwa von 30-60° nördlicher Breite erstreckt, sowie der im Norden anschließenden Polarfrontzone. Im Grenzbereich entstehen über dem Atlantik Zyklone, die aufgrund ihrer östlichen Zugrichtung wetterbestimmend für Fennoskandien sind (MARTYN 1992). Als Folge der meist von Süden oder Südwesten heranziehenden Zyklone werden milde und feuchte Luftmassen nach Fennoskandien transportiert und bewirken besonders in den Wintermonaten die o. g. Klimagunst der Region. In den Sommermonaten können derartige Luftmassen jedoch abkühlend wirken (SCHWEDLER 1993). Während der Dominanz dieser zonalen Zirkulation sind unter dem Einfluss unterschiedlicher Luftmassen schnell wechselnde Folgen trockener und feuchter Wetterlagen charakteristisch (KOUTANIEMI 1983). Je nach Zugrichtung der Fronten entwickeln sich regional unterschiedliche Wetterlagen. So können beispielsweise Zyklone aus südwestlichen Richtungen über Dänemark und den Ostseeraum relativ ungehindert einfließen, während die Gebirgsformationen der Skanden eine natürliche orographische Barriere für Frontensystem aus westlichen Richtungen darstellen. Es kommt zu einem Aufgleiten der feuchten Luftmassen verbunden mit intensiven Niederschlägen auf der Luvseite der Gebirgskette. Im östlichen Leebereich der Skanden, den zentralen und nördlichen Bereichen Schwedens und Finnlands, entstehen in der Folge relativ warme Föhnwinde (vgl. AARIO 1966, KOUTANIEMI 1983, SCHWEDLER 1993).

Zeitweise wird die zonale Zirkulation durch eine meridionale Zirkulation abgelöst, in dem die Hauptwind-systeme in den oberen Luftschichten durch Antizyklone bzw. Tiefdruckrinnen und Hochdruckrücken blockiert werden (WALLÉN 1974, SCHWEDLER 1993). Die Wetterbedingungen hängen nach JOHANNESSEN (1970) bzw. BLÜTHGEN & WEISCHET (1980) in solchen Zeiträumen von der Lage der Antizyklone ab. SCHWEDLER (1993) führt als Beispiel für meridionale Zirkulation frühjährliche Wetterlagen auf, bei denen stabile Antizyklone über dem Atlantik zu Kaltluftenbrüchen polarer Luftmassen in Fennoskandien führen und Schäden in der Landwirtschaft verursachen. Nach Ende der Schneeschmelze bewirken derartige Kaltluftenbrüche in Interaktion mit der bereits erwärmte Erdoberfläche ständig wechselnde Wetterlagen mit trockenen Abschnitten und Konvektionsniederschlägen (»Aprilwetter«). In den Sommermonaten bilden sich zeitweise Antizyklone von Zentralrussland bis Fennoskandien aus, die oft mit längeren trockenen und warmen Perioden verbunden sind, während im Winter Hochdruckrücken von Sibirien bis Fennoskandien sehr kalte Luftmassen heranführen können (JOHANNESSEN 1970, KOUTANIEMI 1983). Trotz der Dominanz zonaler Zirkulation ist ein häufiger Wechsel mit meridionaler Strömung zu beobachten. Die Anteile der Wetterlagen variieren dabei über mehrere Jahre und führen in gewissem Maße zu Schwankungen des Klimas in Finnland bzw. Fennoskandien (WALLÉN 1974).

### 2.2.1.1 Klimaklassifikation

Einen Überblick über die Einordnung des Untersuchungsraums in die überregionalen Klimabedingungen ermöglichen Klimaklassifikationen, wie sie KÖPPEN (1931), TROLL & PAFFEN (1964) oder LAUER & FRANKENBERG (1988) für alle Räume der Erde entwickelt haben. In allen Klassifikationen wird die thermische Klimagunst Fennoskandiens deutlich, die sich als Nordausbuchtung der Mittelbreitenklimate darstellt (BLÜTHGEN & WEISCHET 1980). Die Klassifikation nach KÖPPEN (1931) orientiert sich an Schwellenwerten von Temperatur und Niederschlag. Finnland liegt in dieser Einordnung im Bereich des Dfc-Klimas, welches als Schneeklima (D) mit einem wärmsten Monat über 10 °C und einem kältesten von unter -3 °C festgelegt ist. Weitere Merkmale sind ganzjährig ausreichende Niederschläge (f), jedoch weniger als vier Monate mit einer Temperatur von mehr als 10 °C (c). Der Schwellenwert des letzten Punkts wird im Süden und Südwesten Finnlands überschritten (vgl. FMI 1991), sodass hier eine Zuordnung zum Dfb-Klima (b = mindestens vier Monate mit 10 °C) erfolgt.

In der die Vegetation berücksichtigende Klassifizierung nach TROLL & PAFFEN (1964) wird Finnland unter dem Begriff »kontinentales Borealklima« (II 2) eingeordnet ( $\Delta T = 20-40$  K, wärmster Monat mit 10-20 °C und Vegetationsperiode von 100-150 d). Ein wesentlicher Kritikpunkt dieser Klassifikation ist die besonders in den Außertropen uneinheitliche, teilweise subjektive Abgrenzung der Klimazonen (LAUER & FRANKENBERG 1988, KÖNIG 1995). In ihrer eigenen Klassifikation untergliedern LAUER & FRANKENBERG (1988) Finnland in drei Klimaräume. Der zentrale und östliche Teil des Landes, und damit der Untersuchungsraum, sind als C<sub>II</sub>3h-Typ bezeichnet. Dieser Typ ist geprägt durch ein maritimes (3), humides (h), kühlgemäßigtes (II) Mittelbreitenklima (C).

Obwohl Finnland in allen Klassifikationen als Raum mit relativ geringen räumlichen Klimagegensätzen charakterisiert ist, zeigt sich doch seine besondere Lage im Übergangsbereich zwischen maritimer (KÖPPEN 1931, LAUER & FRANKENBERG 1988) und kontinentaler Klimazuordnung (TROLL & PAFFEN 1964).

### 2.2.1.2 Temperaturregime

Das Klima Finnlands weist im Vergleich zu Mitteleuropa geringere Durchschnittstemperaturen auf. Im Südwesten des Landes werden im Jahresmittel etwa 6 °C und im äußersten Norden Lapplands -2 °C erreicht (Abb. 8). Wie zuvor angedeutet, werden in Finnland größere Amplituden im Jahresverlauf der

Temperatur registriert als in Mitteleuropa. Die Differenz zwischen den Mittelwerten des wärmsten und kältesten Monats bildet dabei das Maß für die thermische Kontinentalität (vgl. KOUTANIEMI 1983). Der geringste Gegensatz tritt in Finnland, wie in Abbildung 9 dargestellt, auf den im äußersten Südwesten gelegenen Åland-Inseln mit etwa 18 K auf. Sowohl nach Osten als auch nach Norden ist ein Anstieg der Werte zu verzeichnen, sodass sich die Räume mit der höchsten Kontinentalität im Osten entlang der russischen Grenze und im Lee der Skanden in Nordfinnland finden lassen. In beiden Regionen werden Werte von 29 K registriert.

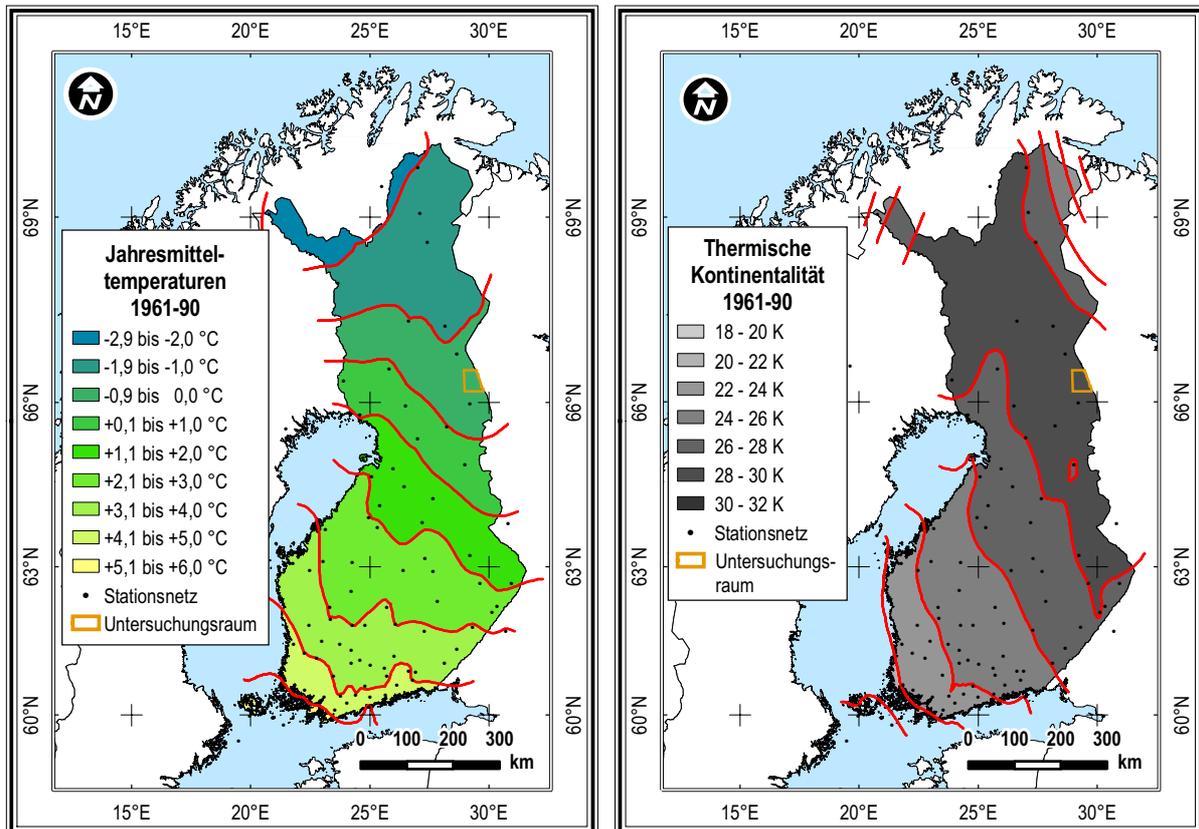


Abb. 8/9: Jahres-Isothermen und thermische Kontinentalität in Finnland (1961-1990) auf Grundlage von 112 Stationen ohne Berücksichtigung orographischer Besonderheiten

Die grundsätzlich breitenparallele Gliederung des Temperaturgradienten mit einer Ostsee-beeinflussten SW-NE-Verschiebung zeigt sich ganzjährig ausgeprägt. In den Wintermonaten ist der Temperaturgradient jedoch deutlicher ausgebildet als in den Sommermonaten (Abb. 10/11). Im Januar betragen die Unterschiede zwischen den Åland-Inseln und Lappland mehr als 14 K, während im Sommer lediglich etwa 6 K zwischen den südlichen Provinzen Uusimaa bzw. Kymi und dem Nordwesten Lapplands liegen (FMI 1991).

Die thermische Gliederung Finnlands spiegelt sich darüber hinaus in der Länge der Vegetationsperiode wieder. Diese wird in den Ländern Fennoskandiens über die Anzahl der Tage mit mehr als 5 °C definiert (TVEITO et al. 2001). Im Südwesten Finnlands beginnt die Vegetationsperiode im Zeitraum 16.4.-30.4. während sie im Norden erst zwischen dem 16.5. und dem 31.5. einsetzt (TVEITO et al. 2001). Der Vegetationszeitraum endet im Südwesten zwischen dem 16.10. und 31.10. nach durchschnittlich 200 Tagen und im Norden zwischen dem 16.9. und 30.9. nach lediglich etwa 75 Tagen (Abb. 12). In den Höhenlagen des Lapplands sind darüber hinaus weitaus kürzere Vegetationsperioden zu finden.

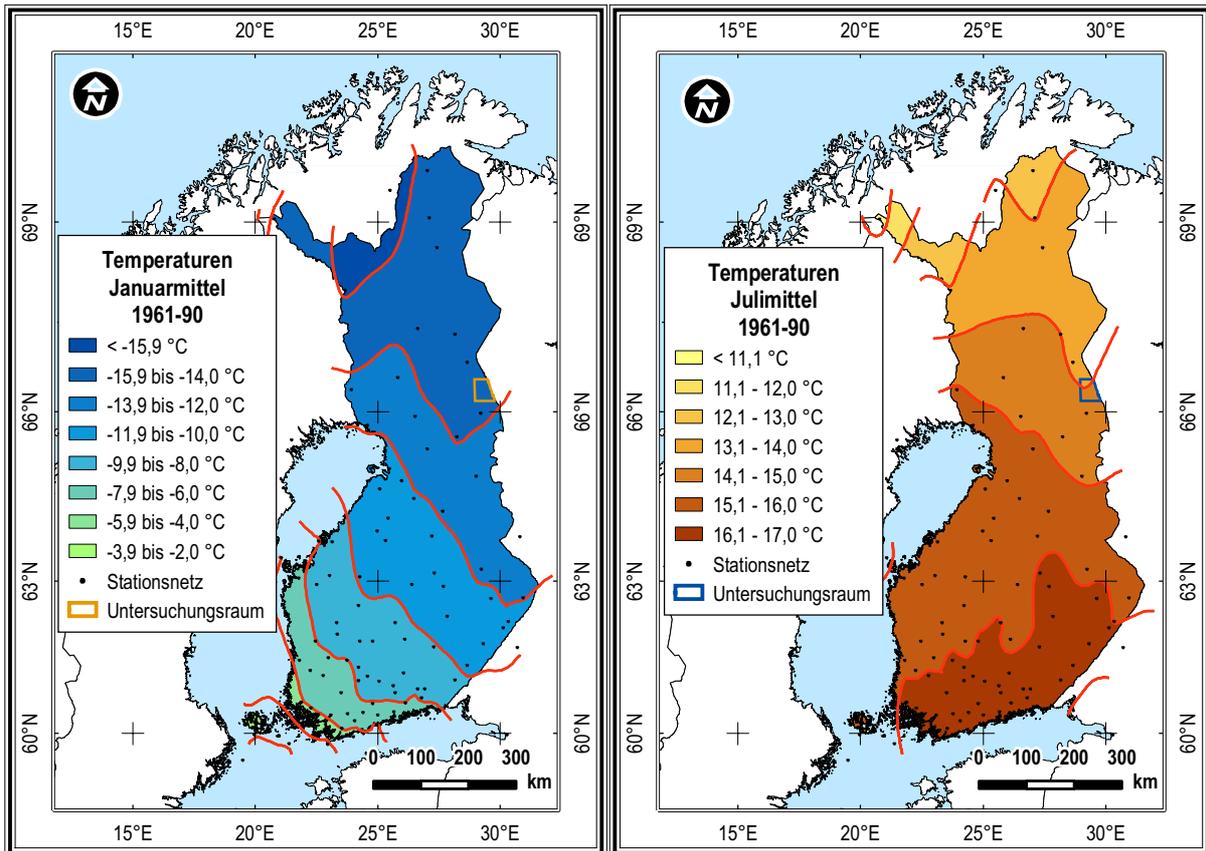


Abb. 10/11: Januar- und Juli-Isothermen (1961-1990) auf Grundlage von 109 Stationen ohne Berücksichtigung orographischer Besonderheiten

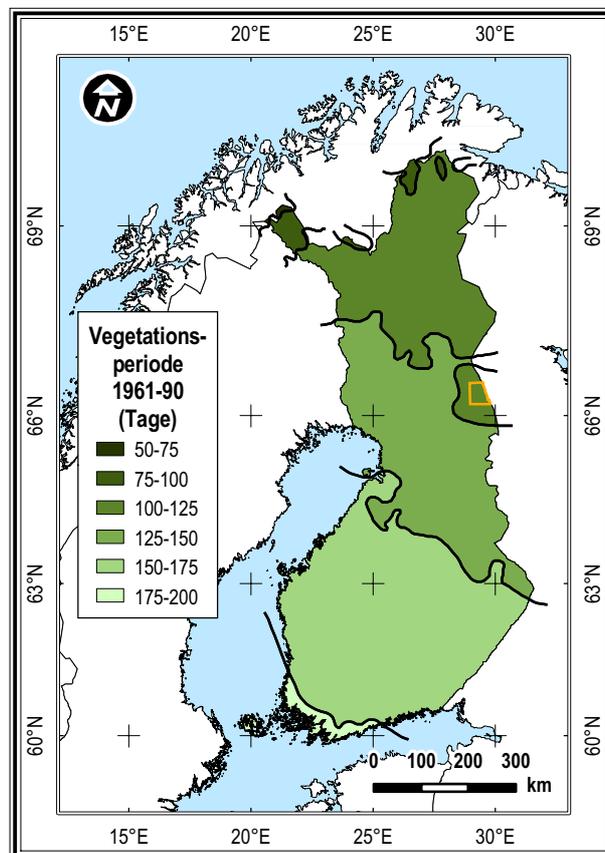


Abb. 12: Mittlere Vegetationsperiode (1961-1990) nach TVEITO et al. (2001), vereinfacht

### 2.2.1.3 Niederschlagsregime

Die durchschnittlichen Niederschlagsmengen sind in Finnland etwas geringer als in Mitteleuropa. Die höchsten Jahressummen werden mit etwa 700 mm im Süden bzw. Südosten des Landes gemessen (Abb. 13). Entlang der Nord-Süd-Achse Finnlands nehmen die Niederschläge in Richtung Norden ab und erreichen im Lee der Skanden mit weniger als 400 mm ihr Minimum (FMI 1991). Bezogen auf die Ausdehnung des Landes von etwa 1100 km in Nord-Süd-Richtung sind die Unterschiede von 300 mm relativ gering und in den fehlenden orographischen Hindernissen in weiten Teilen des Landes begründet (vgl. Abb. 2). Am Beispiel des in Südfinnland gelegenen Endmoränenkomplex »Salpausselkä« zeigt sich, dass selbst geringe Erhebungen bereits höhere Niederschlagsmengen zu Folge haben (SCHWEDLER 1993). Ausgehend vom Küstenraum des Bottnischen Meerbusens kann ein Anstieg der Niederschläge nach Osten registriert werden, der sich durch häufige sommerliche Konvektionsregen in Folge der Erwärmung der Landmassen erklärt (JOHANNESSEN 1970). Das Niederschlagsmaximum tritt in ganz Finnland in den Monaten Juli und August auf, wobei in den südwestlichen Landesteilen etwas später ein zweites Maximum auftritt (SCHWEDLER 1993). Die mittleren, jährlichen Evaporationsraten sind mit 425 mm im Süden des Landes und etwa 200 mm im Norden deutlich geringer als der Niederschlag (HANNELIUS & KUUSELA 1995).

Etwa 30 bis 40 % der Niederschläge fallen als Schnee und bilden eine geschlossene Schneedecke für einen Zeitraum von 80 bis 140 Tagen in den südlichen Landesteilen und bis zu 250 Tagen in Lappland (HANNELIUS & KUUSELA 1995). Abgesehen von einigen Gebirgslagen im Norden Finnlands werden die größten Mächtigkeiten von etwa 0,8 m in den östlichen Landesteilen gemessen (SCHWEDLER 1993, HANNELIUS & KUUSELA 1995). Dazu gehört auch der Untersuchungsraum (KOUTANIEMI 1983).

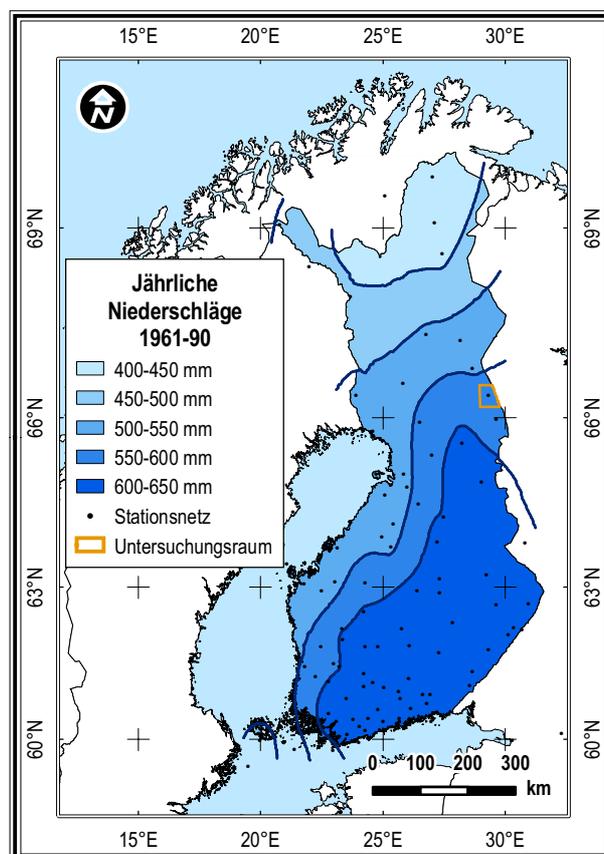


Abb. 13: Mittlere Niederschlagsverteilung (1961-1990) auf Grundlage von 121 Stationen ohne Berücksichtigung orographischer Besonderheiten

## 2.2.2 Lokale Klimabedingungen

Der Breitenlage entsprechend ist der wenige Kilometer südlich des Polarkreises gelegene Untersuchungsraum durch große jahreszeitliche Schwankungen der Strahlungsverhältnisse gekennzeichnet (Abb. 14). Nach der Wintersonnenwende, zu der lediglich etwa eine Stunde an Einstrahlung zu verzeichnen ist, nehmen die Tageslängen deutlich zu und erreichen zu Beginn der Vegetationsperiode im Mai etwa 19 Stunden. Zur Sommersonnenwende ist mit 23 Stunden fast durchgehend direkte Einstrahlung möglich. In den Folgemonaten sinken die Tageslängen wieder und weisen Mitte September, dem Ende der Vegetationsperiode, noch etwa 12-13 Stunden auf.

Abbildung 14 verdeutlicht darüber hinaus, dass im Untersuchungsgebiet ganzjährig mit einem geringeren Strahlungsgenuss je Flächeneinheit zu rechnen ist als in Mitteleuropa. Ursache ist der geringere Einfallswinkel der Sonneneinstrahlung im Vergleich zu Standorten geringerer Breitenlage (vgl. Kap. 2.2.1). Ohne Berücksichtigung lokaler Trübungs- und Bewölkungsverhältnisse ist z. B. in Bremen ein etwa 40 % höherer jährlicher Strahlungsgenuss möglich. Selbst während der Sommersonnenwende beträgt die Differenz etwa 10 %.

Der Untersuchungsraum ist nicht eindeutig einem Klimatyp zuzuordnen, da er in einem Übergangsbereich zwischen westlich-maritimem und östlich-kontinentalem Klima liegt (KOUTANIEMI 1983). Die hohe jährliche Temperaturamplitude von durchschnittlich 28 K verweist auf eine deutliche thermische Kontinentalität, andererseits gelten die hygrischen Bedingungen als humid bzw. maritim (HAVAS 1961, AHTI et al. 1968, SÖYRINKI & SAARI 1980, KOUTANIEMI 1983).

Ausgehend vom letzten meteorologischen 30-Jahres-Zeitraum 1961-1990 liegt die Jahresmitteltemperatur in Kuusamo bei  $-0,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Der wärmste Monat ist der Juli mit durchschnittlich  $14,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ , während der Januar mit  $-14,2\text{ }^{\circ}\text{C}$  die geringsten Temperaturen aufweist. Die Vegetationsperiode umfasst durchschnittlich 128 Tage pro Jahr (FMI 1991).

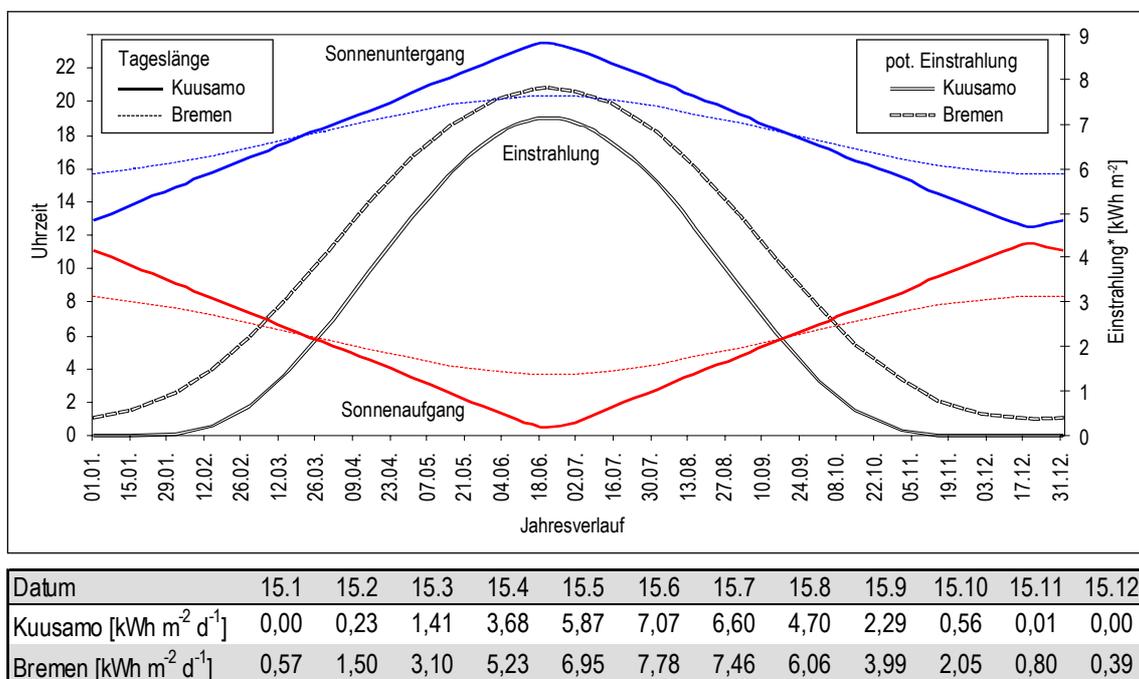


Abb. 14: Vergleich der Tageslängen und potenziellen Strahlungsverhältnisse im Jahresverlauf zwischen dem Untersuchungsraum und Bremen; Einstrahlungsangaben auf Grundlage astronomischer Werte ohne Berücksichtigung lokaler Bewölkung (Atmosphärischer Trübungsfaktor 0,25)

Die Niederschläge liegen in Kuusamo im langjährigen Mittel bei 571 mm. Die größten Niederschlagsmengen fallen in den Sommermonaten, besonders im Juli und August mit 73 mm bzw. 75 mm (Abb. 16).

Trotzdem werden in den Wintermonaten Schneemächtigkeiten von etwa 0,7 m erreicht, womit die Region zu den schneereichsten in Finnland gehört (SOLANTIE 1975, KOUTANIEMI 1983). Die Baumgrenze der Region liegt aufgrund der Schnee- bzw. Eislasten in den Wintermonaten bei etwa 450 m (KOUTANIEMI 1983).

In Folge der überregionalen Witterungsbedingungen sind auch im Untersuchungsraum Luftmassen aus westlichen Richtungen dominant, die temporär durch meridionale Strömungen unterbrochen werden. Die bodennahen Windverhältnisse weisen ebenfalls primär westliche Windrichtungen auf (KOUTANIEMI 1983, FMI 1991), jedoch ist ein sekundäres Maximum östlicher Richtungen messbar (Abb. 15). Während der Vegetationsperiode von Mai/Juni bis September ist sogar eine ungefähre Gleichverteilung zwischen West- und Ostwindwetterlagen zu beobachten. Die zeitweise Entkoppelung der bodennahen Winde von den überregionalen Luftströmungen ist insofern von Bedeutung, als dass die Herkunft der Sommerniederschläge vielfach dem östlich gelegenen Weißen Meer zugeordnet wurden (vgl. SÖYRINKI & SAARI 1980).

In einer Analyse der Wetterdaten von 1967 bis 1980 widerspricht KOUTANIEMI (1983) dieser These und verweist auf die jahreszeitliche Verschiebung der Zugbahnen der Zyklone und ihre Ablenkung nach Norden. Die Analyse ist insofern plausibel, als ein nördliches Ausscheren von Zyklonen aus der Westwinddrift, verbunden mit ihrer Eigenrotation gegen den Uhrzeigersinn (FLOHN 1954, HÄCKEL 1999), zu südlichen und östlichen Winden trotz überregionaler Westwindlagen führt.

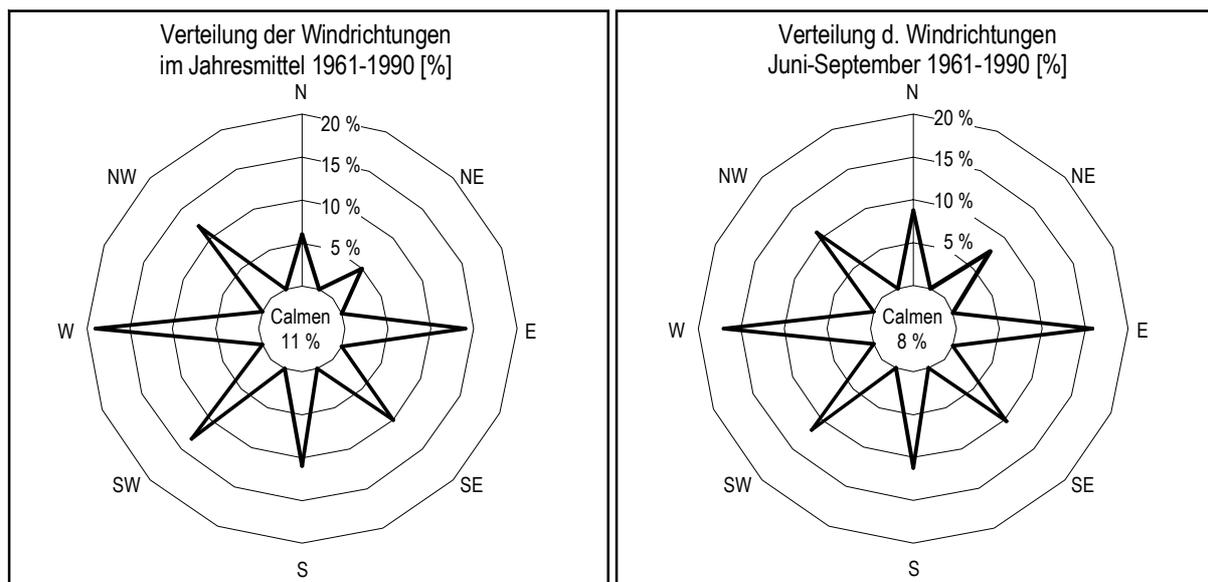


Abb. 15: Verteilung der Hauptwindrichtungen während des Jahres und während der Vegetationsperiode

### 2.2.3 Lokale Besonderheiten

Die Wetterstation des Flughafens Kuusamo (Kuusamo Lentoasema, 264 m ü. M.), etwa 40 km südlich des Untersuchungsgebiets, gilt als Referenz für die Wetter- und Klimabedingungen des Kuusamo-Hochlands und damit des Untersuchungsraums (vgl. HAVAS 1961, SÖYRINKI & SAARI 1980, KOUTANIEMI 1983). Da sich die Erhebungen des Rukatunturi-Valtavaara-Massivs sowie die Tallagen des Oulankajoki und des Kitkanjoki orographisch allerdings erheblich vom Hochland unterscheiden, sind in diesen Räumen besondere lokalklimatologische Eigenheiten zu erwarten. Für die Höhenlage des Rukatunturi sind aufgrund der erst seit 1990 bestehenden meteorologischen Station (Kuusamo Rukatunturi, 486 m ü. M) und nur lückenhafter Daten keine Aussagen möglich. Im Tal des Oulankajoki werden hingegen seit August 1966 Wetterdaten an der Biologischen Forschungsstation erhoben. Vergleiche mit der Referenzstation in Kuusamo beziehen sich somit auf den Zeitraum 1967-1990. Gegenüber dem umgebenden Hochland

lässt sich eine deutlich höhere thermische Kontinentalität beobachten. Mit 31 K zwischen höchstem und geringstem Monatsmittel wird an der in der Talmitte (160 m ü. M) liegenden Station Kiutaköngäs (KK) sogar der höchste Kontinentalitätsgrad Finnlands registriert (KOUTANIEMI 1983, FMI 1991). Die Spannweite der Extremwerte liegt im Jahresverlauf bei durchschnittlich 80 K, das entspricht einer etwa 10 K höheren Amplitude als in Kuusamo. Die geringsten bzw. höchsten je gemessenen Temperaturen am Kiutaköngäs waren  $-48,0\text{ °C}$  bzw.  $+31,1\text{ °C}$  (KOUTANIEMI 1999). In den Wintermonaten, genauer von November bis März, werden in der Tallage geringere Temperaturen als im Umland gemessen, während für Frühjahr und Sommer bzw. von April bis November höhere Werte dokumentiert sind (Abb. 16). Im Januar, dem kältesten Monat, beträgt die Differenz zum Hochland etwa 2 K. Im wärmsten Monat des Sommers, dem Juli, jedoch nur 0,3 K. Ursache für die geringeren Temperaturen des Winters sind Kaltluftabflüsse in die Tallagen (KOUTANIEMI 1983). Temperaturinversionen treten somit öfter auf und sind länger anhaltend als im vergleichsweise windigeren Hochland. Der Windschutz ist ebenfalls Ursache für die etwas höheren Temperaturen des Sommers. Bezogen auf das gesamte Jahr liegt die Temperatur mit  $-0,9\text{ °C}$  am Oulankajoki um 0,4 K unter der des Hochlands (FMI 1991).

Die Jahresniederschläge am Kiutaköngäs sind mit durchschnittlich 554 mm etwa 7 % geringer als die der Station Kuusamo. Für den Zeitraum von 1967-1980 ermittelte KOUTANIEMI (1983) eine Differenz von lediglich 3 %. Aufgrund der hohen Variabilität von Niederschlägen, verbunden mit der verhältnismäßig großen Distanz zwischen den Stationen Kiutaköngäs und Kuusamo, ist ein Vergleich der Niederschlagswerte zwischen Tallage und Hochland auf Basis der beiden Stationen jedoch problematisch.

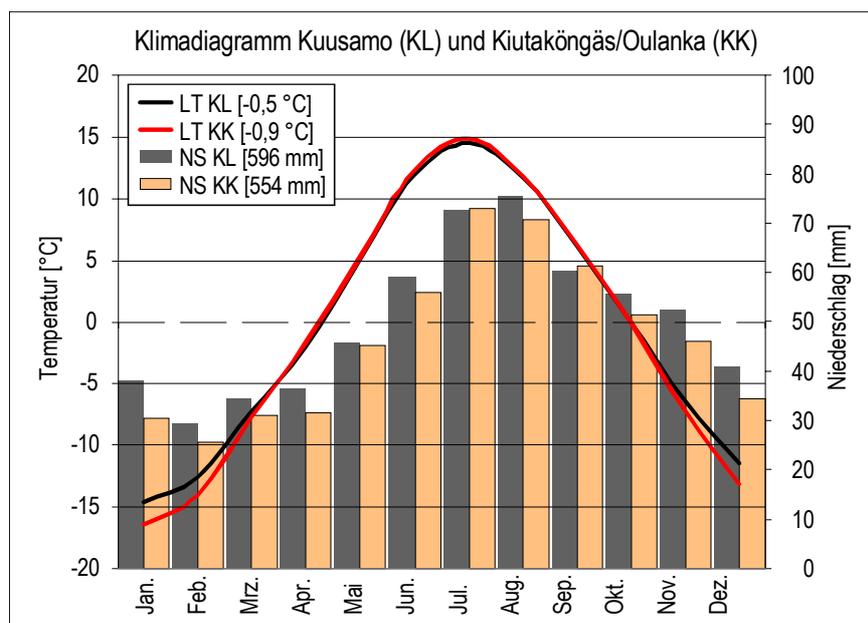


Abb. 16: Klimadiagramm der Wetterstationen Kuusamo Lentoasema (Flughafen) und Kuusamo Kiutaköngäs (Oulanka); Grundlage ist der Bezugszeitraum 1967\*-1990 (\* Beginn der Messungen)

### 3 Angewandte Methoden und Struktur der Versuchsflächen

Wie in Kapitel 2.2.1 beschrieben, zeichnet sich der boreale Raum durch kurze Vegetationsperioden aus. Die klimatologischen Gegebenheiten sind somit die Determinanten für die natürliche Vegetations-sukzession. Auf lokaler Ebene werden die klimaökologischen Bedingungen durch weitere Faktoren wie das Relief, aber auch die Vegetation selbst beeinflusst. Eine weitere Modifikation erfolgt durch anthropogene Einflüsse wie der Forst- oder Landwirtschaft. Im europäischen Raum der Borealis wird die Forstwirtschaft durch die so genannte Plantagenwirtschaft bestimmt. Flächen werden industriell eingeschlagen und anschließend mit Hilfe verschiedener Verfahren wieder aufgeforstet (LINDAHL 1998). Es entsteht ein Mosaik aus Flächen unterschiedlicher Sukzessionsstadien, wie es in Abbildung 17 am Beispiel des Untersuchungsgebiets erkennbar ist.

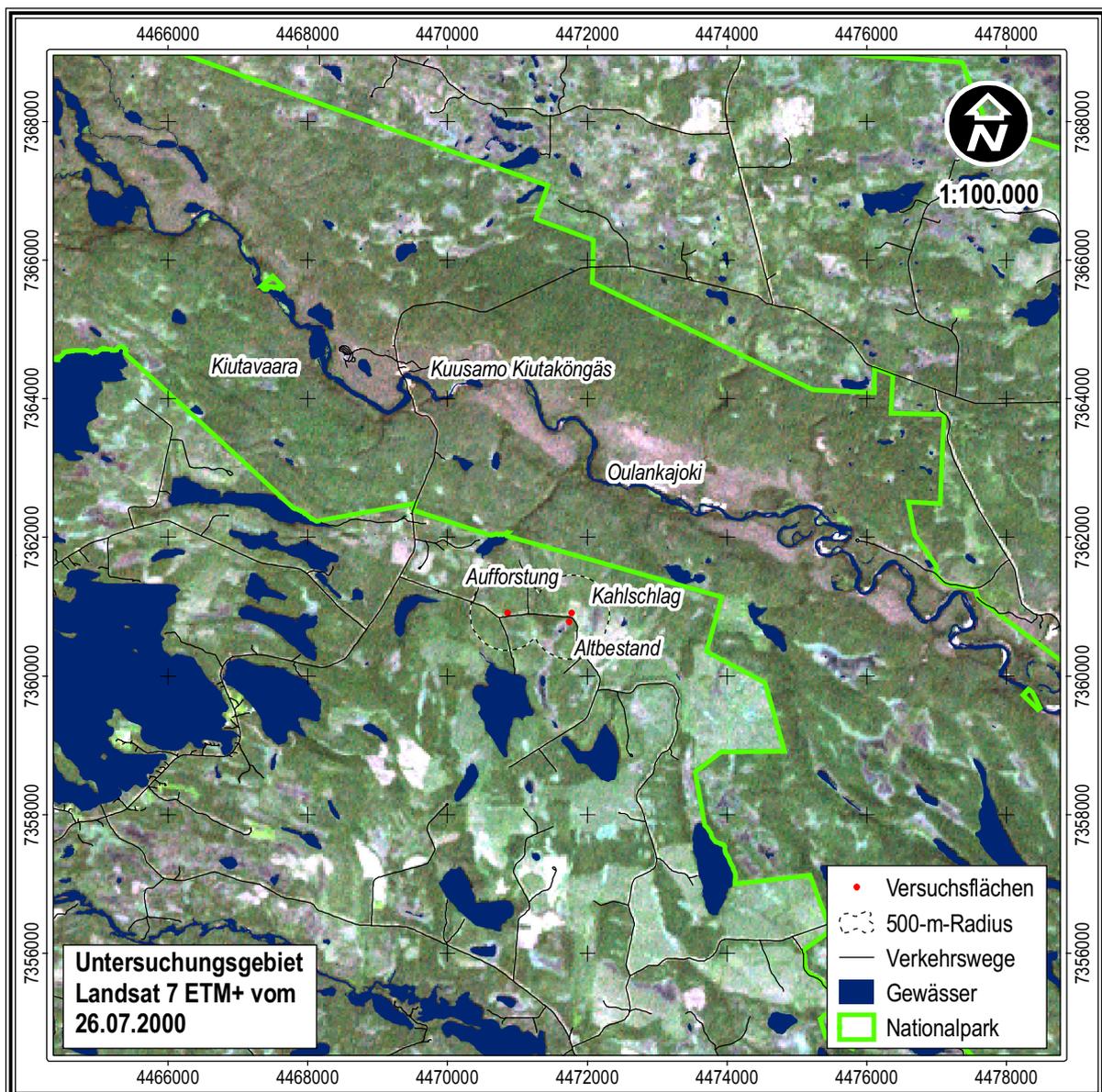


Abb. 17: Ausschnitt des Untersuchungsgebiets aus einer Landsat-Szene (Quelldaten: USGS 2000; Zusatzinformationen: NLS 1999c); Darstellung des Versuchsfächenumfelds (500-m-Radius) zur Verdeutlichung der Lage der Versuchsfächen

Vor dem Hintergrund dieser Nutzungsform wurden drei Versuchsfächen ausgewählt, die typische Stadien dieser anthropogenen überprägten Sukzessionsreihe wiedergeben. Dem forstwirtschaftlichen System folgend, wurden für die bestandsklimatologischen Messungen ein Altbestand, ein Kahlschlag und eine

Aufforstungsfläche ausgewählt (Abb. 18). Im Zuge der Messungen galt es, die Standorte im Verlauf von zwei Vegetationsperioden mikroklimatologisch zu charakterisieren und zu differenzieren sowie das gemeinsame Umfeld der Flächen mit den Referenzstandorten des finnischen Wetterdienstes zu vergleichen. Ein Schwerpunkt war die Ausweisung von speziellen Wetterlagen, in denen sich Gegensätze besonders hervorheben bzw. in denen sich Gefährdungen wie Frost oder Windeinwirkung äußern.



Abb. 18: Die Sukzessionsstadien der Versuchsflächen Altbestand, Kahlschlag und Aufforstung im Untersuchungsgebiet

## 3.1 Angewandte Geländearbeitsmethoden

Auf den zuvor genannten drei Versuchsflächen wurden im Zeitraum der Sommermonate 1999 und 2000 Wetterstationen betrieben, deren zugehörige Messwertgeber die mikroklimatologischen Bedingungen während der Vegetationsperioden aufgenommen haben. Im Jahr 1999 erstreckten sich die Messungen über den Zeitraum vom 25.06. bis zum 08.09., und im Folgejahr wurde zwischen dem 17.06. und dem 19.08. gemessen. Für Vergleiche wurde der sich überschneidende Zeitraum der zwei Messkampagnen vom 26.06. bis zum 19.08. herangezogen und als »Vergleichszeitraum« (VZ) bezeichnet. Im Gegensatz dazu umfasst der Begriff »Gesamtzeitraum« (GZ) sämtliche Bezüge, welche die gesamte Messkampagne eines Jahres umgrenzten. Zur Erhebung der geländeklimatologischen Einflüsse des Reliefs und der lokalen Vegetation auf die Einstrahlungs- und Beschattungsverhältnisse wurde parallel zu den Messungen eine Bestandsaufnahme der Topographie und des Vegetationsbestandes der Versuchsflächen durchgeführt.

### 3.1.1 Geländeklimatologische Messungen

Die Datenlogger der drei installierten Wetterstationen registrierten über die Messwertgeber die Klimaparameter Strahlung, Temperatur, Luftfeuchte, Niederschlag und Windbedingungen. Sämtliche Parameter wurden in einem 60-Sekunden-Takt erhoben und als 10-Minuten-Mittelwerte gespeichert. Zusätzlich sicherten die Datenlogger in einem 30-Minuten-Takt die aufgetretenen Extremwerte. Mit Hilfe dieser hohen zeitlichen Auflösung konnte das Auftreten besonderer Wetterereignisse oder auch der Tagesverlauf regelmäßiger Vorgänge wie z. B. der Strahlungsgenuss im Bestand festgehalten werden. Die Funktionsweise der Stationen konnten im Rahmen einer agrarmeteorologischen Untersuchung sowohl hinsichtlich ihrer Genauigkeit als auch ihrer Zuverlässigkeit ausgiebig getestet werden (SCHWANTZ 1999). Abgesehen von der Station der Altbestandsfläche, auf der statt eines Kombiwindgebers lediglich ein Windgeschwindigkeitsgeber montiert war, konnte auf den Flächen eine identische Ausstattung installiert werden. Abbildung 19 stellt den Aufbau der Stationen schematisch dar.

Die Strahlungsverhältnisse wurden an allen Standorten über je ein Pyranometer vom Typ 2 nach ISO 9060 (CM 3, Fa. Thies) und ein Strahlungsbilanzgeber (Fa. Thies) aufgenommen. Für das Pyranometer wird ein spektraler Empfangsbereich von 0,305 bis 2,8  $\mu\text{m}$  angegeben (THIES CLIMA 1995a), das entspricht dem gesamten Spektrum zwischen UV-B und fernem Infrarot (WEISCHET 1991, HÄCKEL 1999). Die Genauigkeit ist mit  $\pm 10\%$  bezogen auf Tagessummen festgelegt (THIES CLIMA 1995a). Zur Erfassung auch der langwelligigen Ausstrahlung umfasst der Strahlungsbilanzgeber einen breiteren spektralen Empfangsbereich von 0,3 bis 50  $\mu\text{m}$  (THIES CLIMA 1995b). Der Messfehler hängt von einer Reihe von Faktoren ab, sollte im Anwendungsfall jedoch 10 % nicht übersteigen (THIES CLIMA 1995b). Die Messhöhe der Ausleger für beide Geber lag etwas unterhalb einer Höhe von zwei Metern.

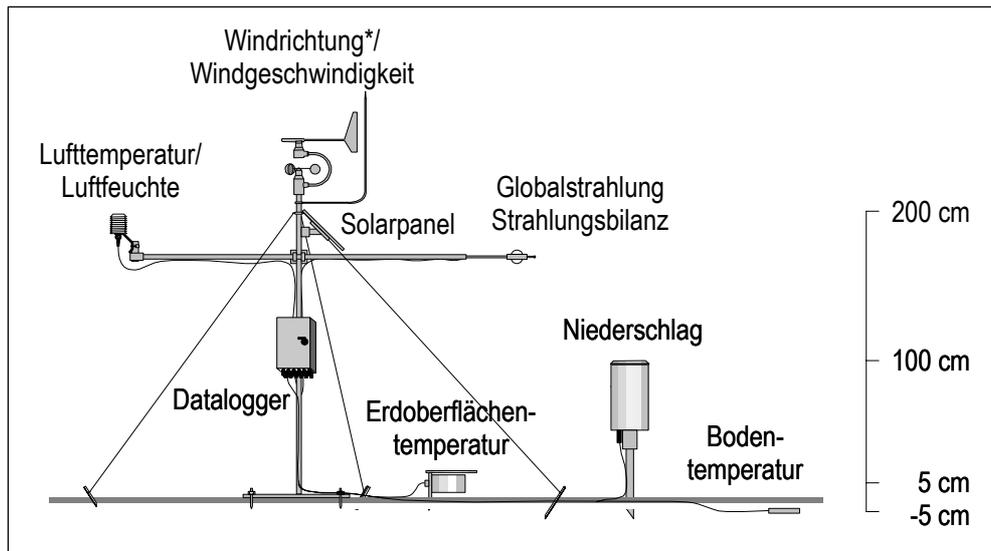


Abb. 19: Schematische Darstellung der Wetterstationen auf den Versuchsflächen (\*Auf der Altbestandsfläche nur Windgeschwindigkeit)

Das Temperaturregime der Flächen wurde jeweils in drei Messhöhen von +200 cm, +5 cm und -5 cm erhoben und als Lufttemperatur, Erdoberflächentemperatur/bodennahe Temperatur und als Bodentemperatur bezeichnet. Die Erfassung der Lufttemperaturen erfolgte über Hygrothermogeber mit einem Messbereich von -30 bis +70  $^{\circ}\text{C}$  und einem mittleren Messfehler von 0,3 K (THIES CLIMA 1997a). Die Messhöhe von etwa zwei Metern und der montierte Strahlungsschutz boten normierte Messverhältnisse, die den Richtlinien der Wetterdienste entsprachen. In Kombination mit der Messung der Lufttemperaturen wurde über den Geber die relative Luftfeuchtigkeit erfasst. Der Parameter diente in der Versuchsanordnung zur Ermittlung der potenziellen Evaporation.

Die Messung der Erdoberflächentemperatur erfolgte über einen Pt100-Temperaturgeber, der in einem speziell für den Einsatz an der Bodenoberfläche gefertigten Gehäuse montiert war. Der Messbereich umfasst -30  $^{\circ}\text{C}$  bis +130  $^{\circ}\text{C}$  (THIES CLIMA 1992).

Auf jeder Fläche wurde in Stationsnähe je ein Bodentemperaturgeber in fünf Zentimeter Tiefe unterhalb der Vegetationsdecke befestigt. Die Geber des Typs Pt100 weisen einen Messbereich von -30  $^{\circ}\text{C}$  bis +130  $^{\circ}\text{C}$  bei einer Toleranz von  $\pm 0,3$  K auf (THIES CLIMA 1992). Die Boden- und Erdoberflächentemperaturgeber wurden vor Beginn der Messkampagnen unter Laborbedingungen von 0  $^{\circ}\text{C}$  bis 35  $^{\circ}\text{C}$  untereinander kalibriert, dabei traten Abweichungen von maximal 0,2 K auf.

Für Vergleiche mit den Daten des finnischen Wetterdienstes wurden die Tages-Extremwerte nach den Bildungsvorschriften des FMI (Finish Meteorological Institute) erstellt. Das Tagesminimum der Luft- und Erdoberflächentemperaturen wird über den Zeitraum von 8:00 Uhr (UTC 6:00 Uhr +2 h) bis zum gleichen

Zeitpunkt des nächsten Tages gebildet, während der Zyklus für die Erhebung der Lufttemperaturmaxima um 20:00 Uhr (UTC 18:00 Uhr +2 h) beginnt (MYLLYS 2002).

Die Erfassung von Niederschlägen erfolgte auf den Flächen jeweils mit einem Niederschlagsgeber vom Typ HELLMANN mit einer genormten Auffangfläche von 200 cm<sup>2</sup> (THIES CLIMA 1996). Ungeachtet der Montage des Gebers in einer Höhe von einem Meter (Oberkante des Auffangbehälters) zur Reduzierung von Spritzwasser- und Verwirbelungseinflüssen (VAN EIMERN & HÄCKEL 1984), stellt die Erfassung der Niederschläge bis heute ein großes Problem dar. Im Rahmen einer Untersuchung durch RICHTER (1995) gibt der Deutsche Wetterdienst für Niederschlagsmesser des Typs HELLMANN einen mittleren jährlichen Messfehler von etwa -15 % in ungeschützter Lage an. Während auf Freiflächen Fehler durch Windverwehung auftreten können, die zu einer Reduzierung der Messwerte führen, sind in Vegetationsbeständen Fehler durch Interzeption, Abtropfvorgänge oder Stammabfluss zu erwarten. Im Verlauf einzelner Niederschlagsereignisse in denen kleine Tropfen im Zusammenhang mit hohen Windgeschwindigkeiten auftreten sind Messfehler zwischen -5 % und -40 % möglich (BENDIX 2004). Dagegen sind die Einflüsse der zwei zuletzt genannten Phänomene auf die Wasserbilanz jedoch als gering einzuschätzen (GILL 1974, PERTTU et al. 1980). Für Vergleiche zwischen den Flächen wurden vor diesem Hintergrund zusätzlich je 30 Niederschlagssammler in sechs Transekten aufgestellt (Abb. 23-25). Aus Kostengründen wurden die Sammler aus 2000-ml-PE-Flaschen hergestellt, woraus sich eine nicht normgerechte Auffangfläche von 95 cm<sup>2</sup> ergab (Abb. 20). Trotzdem haben sich die Sammler bewährt. Zwischen dem HELLMANN-Gerät und den 30 Sammlern auf der mehrheitlich ungestörten Kahlschlagfläche bestand eine durchschnittliche Abweichung von -9 % (1999) bzw. -10 % (2000). Die in die Krautschicht eingelassenen Niederschlagssammler wurden in der Regel nach größeren Niederschlagsereignissen geleert und ihre Füllmenge erfasst.



Abb. 20: Maße der Eigenbau-Pluviometer und Beispiel für die Installation auf der Altbestandsfläche

Zu Beginn des Messzeitraums 2000 entstand als Folge einer verklemmten Wippe im Hellmann-Niederschlagssammler des Altbestandes ein Datenausfall von sieben Tagen. An fünf der Tage wurden auf den anderen Flächen Niederschläge registriert, sodass vor dem Hintergrund einfacherer Berechnungen und Vergleiche mit den anderen Flächen eine Interpolation der Werte durchgeführt wurde. Die Korrelation

der Werte des restlichen Zeitraumes mit den Daten der zwei anderen Versuchsflächen ergab einen höheren Korrelationskoeffizienten ( $r = 0,9961$ ) zu den Werten der Kahlschlagfläche, sodass die fehlenden Werte über einen Korrekturfaktor von 0,83 interpoliert wurden. Weitere Einzelfehler entstanden im Verlauf beider Messreihen durch umgeworfene Niederschlagssammler des Eigenbautyps, vermutlich in Folge von Tritt durch Rentiere oder Elche. Diese Werte wurden in jedem Einzelfall durch Interpolation der restlichen Niederschlagsereignisse der Messkampagne in Bezug zu den übrigen Sammlern ermittelt.

Auch im Fall der Niederschlagsmessungen erfolgte eine Anpassung der Werte an die Bildungsvorschriften des FMI. Die Tagessummen werden über den Zeitraum von 8:00 Uhr (UTC 6:00 Uhr +2 h) bis zum gleichen Zeitpunkt des Folgetages gebildet (MYLLYS 2002).

Die umfangreiche Ausstattung der Wetterstationen erlaubte die Erfassung der potenziellen Evaporation nach WENDLING et al. (1991), einer Weiterentwicklung des Verfahrens von PENMAN (1948). Unter Berücksichtigung von Lufttemperatur, Globalstrahlung, Windgeschwindigkeit und relativer Feuchte ermöglichte die Auswertungssoftware die Berechnung von Tagessummen nach folgender Formel:

$$ET_p = 2,4 \cdot \frac{LT_h + 22}{LT_h + 123} \cdot \left\{ \frac{0,36 \cdot GS_h}{410} + \left( 0,5 + 0,54 \cdot WG_h \cdot \frac{4,2}{3,5 + \ln Z} \right) \cdot \frac{100 - LF_h}{905} \right\} \quad [mm \cdot h^{-1}]$$

$LT_h$  = Stundenmittel der Lufttemperatur ( $^{\circ}C$ );  $GS_h$  = Stundenmittel der Globalstrahlung ( $W \cdot m^{-2}$ );  $WG_h$  = Stundenmittel der Windgeschwindigkeit ( $ms^{-1}$ );  $Z$  = Höhe des Windgeschwindigkeitsgebers über dem Boden (m);  $LF_h$  = Stundenmittel der relativen Feuchte (%) nach THIES CLIMA (2003), verändert

Die Windverhältnisse wurden in Form ihrer horizontalen Komponenten Geschwindigkeit und Richtung auf zwei der Flächen über je einen kombinierten Windgeber in erfasst (THIES CLIMA 1997b). Im Altbestand erfolgte hingegen ausschließlich die Messung der Windgeschwindigkeit über einen Windgeber (THIES CLIMA 1993). Die Anlaufgeschwindigkeit des Schalensterns der Geräte liegt bei  $0,3 \text{ ms}^{-1}$ , der Gerätefehler bei etwa  $0,5 \text{ ms}^{-1}$ , weshalb aus Erfahrungen früherer Untersuchungen (STEINECKE 1995, SCHWANTZ 1999) Windgeschwindigkeiten unterhalb  $0,5 \text{ ms}^{-1}$  den Calmen zugeordnet wurden. Aufgrund des bestandsklimatologischen Schwerpunktes der Arbeit wurden die Windgeber in einer Höhe von zwei Metern montiert. Damit wurden vergleichbare Messungen der bodennahen Windverhältnisse möglich, die eine besondere Bedeutung für ökologische und bioklimatologische Fragestellungen haben (vgl. STEINECKE 1995). Sofern Vergleiche der Windgeschwindigkeiten mit Werten des FMI durchgeführt wurden, deren Erfassungsstandards Messungen in einer Höhe von 10 m vorsehen, erfolgte eine Umrechnung der FMI-Daten nach unten stehender Formel (FLEMMING 1994).

$$\frac{WG_2}{WG_1} = \sqrt[4]{\frac{Z_2}{Z_1}} \text{ für } h \leq 10 \text{ m}; \quad \frac{WG_2}{WG_1} = \sqrt[5]{\frac{Z_2}{Z_1}} \text{ für } h \geq 10 \text{ m}$$

$WG$  = Windgeschwindigkeit [ $ms^{-1}$ ];  $Z$  = Höhe [m]

$WG_1$  = Windgeschwindigkeit geringere Höhe;  $WG_2$  = Windgeschwindigkeit größere Höhe;  $Z_1$  = geringere Höhe;  $Z_2$  = größere Höhe nach FLEMMING (1994), verändert

Im Verlauf der Messkampagne des Jahres 2000 kam es auf der Kahlschlagfläche zu einem Ausfall des Kombiwindgebers. Vor dem Hintergrund, dass diese Fläche als Referenz- und Vergleichsfläche diente, erfolgte ein Austausch des Gebers mit dem der Aufforstungsfläche. Auf der Kahlschlagfläche war somit ein Datenausfall vom 24.06. bis 27.06.2000 zu beklagen, und bis zum Ersatz des Gebers im Aufforstungsbestand entstand dort ein Datenausfall vom 27.06. bis 05.07.2000. Details finden sich in Tabelle 31 im Anhang.

Die Speicherung der Messdaten wurde mit Datenloggern des Typs DL 15 der Fa. Thies durchgeführt (THIES 1997c). Bezugszeit war analog zu den Datenerhebungen des FMI die Osteuropäische Zeit (OEZ), die gegenüber der UTC eine östliche Verschiebung von +2 Stunden aufweist. Die in den Sommermonaten auch in Finnland gebräuchliche Sommerzeit (OESZ) blieb bei den Messungen und Auswertungen entsprechend unberücksichtigt.

Als Vergleichsreferenz für die bestandsklimatologischen Messungen auf den Versuchsflächen dienten die Messwerte der bereits erwähnten Stationen des finnischen Wetterdienstes. Neben der etwa 40 km südlich des Untersuchungsgebiets gelegenen Wetterstation des Flughafens Kuusamo (Kuusamo Lentoasema), die in mehreren Veröffentlichungen (HAVAS 1961, SÖYRINKI & SAARI 1980, KOUTANIMI 1983, TOLVANEN & KUBIN 1990) als Referenz für das Hochlandklima genutzt wurde, standen die Daten der 4,5 km nordwestlich der Versuchsflächen im Tal des Oulankajoki gelegene Station Kiutaköngäs (Kuusamo Kiutaköngäs) zur Verfügung. Von beiden Stationen lagen Tagesdaten der Temperaturen in Form der Mittel- und Extremwerte sowie die Tageswerte des Niederschlags vor. Das FMI erhebt darüber hinaus am Flughafen noch die Daten des Luftdrucks sowie der Windgeschwindigkeit und -richtung, die ebenfalls zur Verfügung standen.

#### 3.1.2 Einstrahlungs- und Beschattungsverhältnisse

Bedeutende Merkmale des Mikroklimas der Versuchsflächen ergeben sich aus den Einstrahlungsverhältnissen. Abgesehen von wetterbedingten Einflüssen wird der Einstrahlungszeitraum systematisch durch eine Horizontüberhöhung der Orographie des umgebenden Raums, der Vegetation und ggf. vorhandener Bebauung verkürzt.

Abbildung 21 veranschaulicht in generalisierter Form die Horizontüberhöhung der drei Versuchsflächen. Die jeweils in 10°-Schritten tachymetrisch erhobenen Darstellungen geben sowohl die relief- als auch die vegetationsbedingte Horizontüberhöhung wieder. Eine Bebauung war nicht vorhanden. Anhand der ebenfalls dargestellten scheinbaren Sonnenbahnen lässt sich die Einschränkung der potenziellen Einstrahlungszeiträume für den gesamten Jahresverlauf ablesen.

Deutlich erkennbar ist der Einfluss der Vegetation in den Diagrammen der zwei Bestände. Einzelbäume oder Baumgruppen verursachen im Aufforstungsbestand Horizonteinschränkungen von bis zu 50° und im Altbestand von bis zu 70°. Auf der Kahlschlagfläche bestimmt lediglich die Orographie der Umgebung die Horizontüberhöhung, sodass eine Horizontüberhöhung von 15° nicht überschritten wird (Abb. 21).

Für die Zeiträume der Messkampagnen waren auf der Kahlschlagfläche sogar geringere Horizonteinschränkungen wirksam, die je nach Zeitpunkt zu einem verspäteten Sonnenaufgang und einem früheren Sonnenuntergang von jeweils höchstens 1,5 Stunden führten. In den Beständen war die Situation grundverschieden, hier kam es während des Tages zu einem Wechsel von Einstrahlungs- und Beschattungszeiträumen, die sich im Diagramm widerspiegeln. Die entsprechenden Verhältnisse ließen sich während des Auftretens von Strahlungswetterlagen in den Messwerten der Globalstrahlung wiederfinden (vgl. Kap. 4.5.1). Im Gegensatz zur generalisierten Darstellung der Horizontüberhöhung war in den Werten der Globalstrahlung auch die Teildurchlässigkeit des Kronenraums erkennbar.

Teildurchlässigkeiten und Öffnungen im Kronenraum sind darüber hinaus verbunden mit einem als »Sonnenflecken« bezeichneten Phänomen. Mit dem Begriff wird das zeitweise Vordringen direkter Einstrahlung in den Boden- bzw. Krautschichtbereich eines Waldbestandes bezeichnet (NIILISK et al. 1970, MILLER & NORMAN 1971a, 1971b). Die unterhalb des Kronenraums montierten Strahlungsgeber erfassten an strahlungsreichen Tagen einen Wechsel zwischen beschatteten und einstrahlungsreichen Phasen in Abhängigkeit von der Kronenraumstruktur und der Sonnenbahn. Durch die Beschattungsphasen und den entsprechenden Strahlungsumsatz im Kronenraum lagen die Mittelwerte der Globalstrahlung

deutlich unter den Werten der Kahlschlagfläche, während in Einstrahlungsphasen gleiche Maximalwerte erreicht werden (SCHWANTZ 2003).

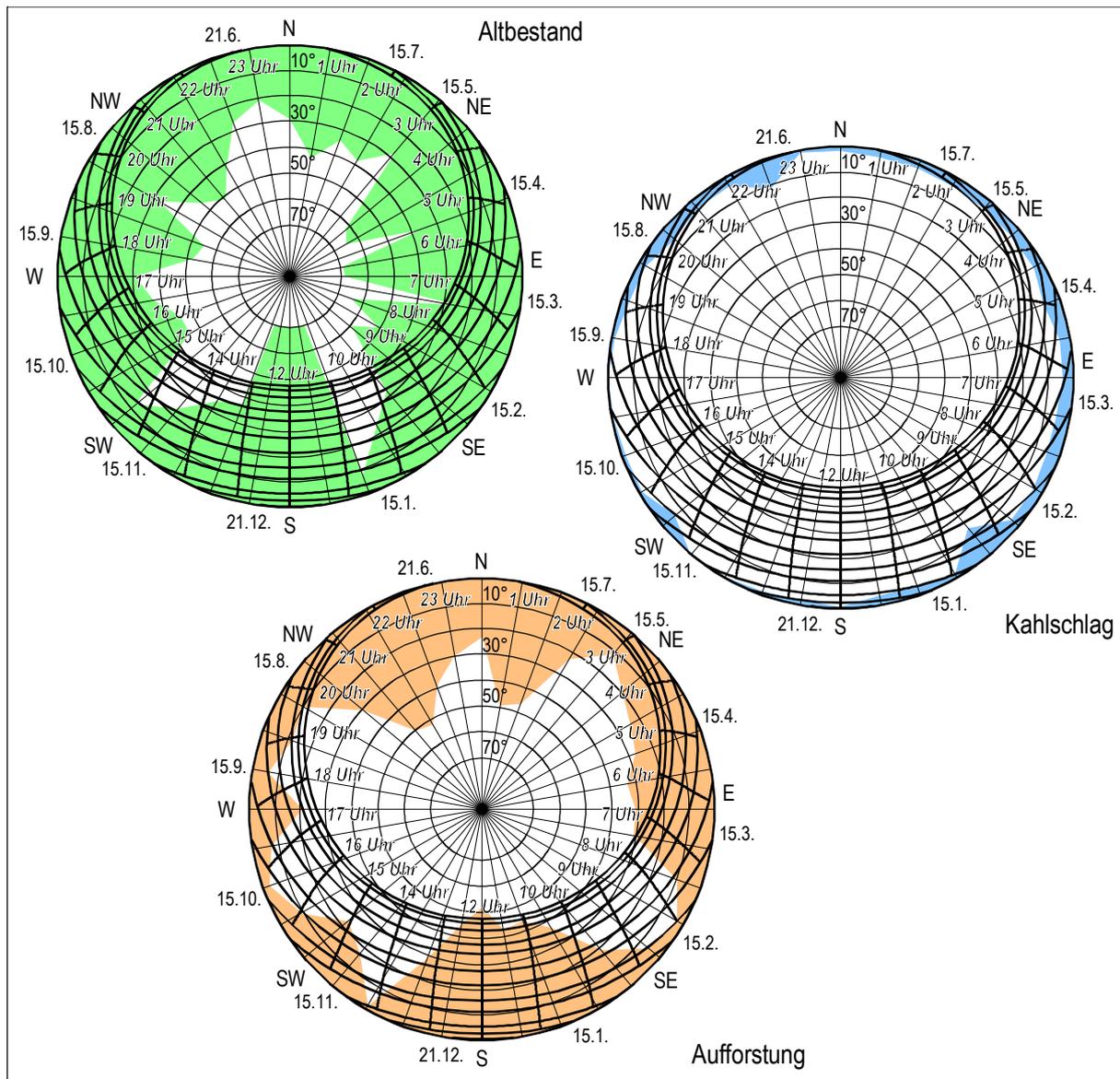


Abb. 21: Horizontüberhöhung (schraffiert) der Versuchsfelder Altbestand, Kahlschlag und Aufforstung unter Berücksichtigung der Orographie und der umgebenden Vegetation

Bei der Messung der Strahlungsbilanzwerte entstanden an den bewaldeten Standorten nachweislich Messfehler durch das »Sonnenfleckenphänomen«. In Phasen direkter Einstrahlung kam es zu Beschattungen der Geber, während die darunter befindliche Fläche einer direkten Einstrahlung unterlag. Dies führte zu einer hohen Rückstrahlung, während die Einstrahlung durch die Beschattung reduziert war. Die Folge war ein vermeintlich hohes Bilanzdefizit trotz direkter Einstrahlung. Vor diesem Hintergrund wurden für die Bestände extreme Tagesminimalwerte festgehalten. Zur Erfassung der tatsächlichen - dann nächtlichen - Minimalwerte wurde neben der gemessenen Strahlungsbilanz (QS) die korrigierte Strahlungsbilanz (QS') ausgewiesen. Dazu wurden 10-Minuten-Mittelwerte, die während des Tages negative Werte aufwiesen, als fehlend angenommen. Der Ausschluss der Werte beschränkte sich auf Zeiträume, in denen der Sonnenstand höher war als die orographische Horizontüberhöhung. Die Vorgehensweise führte zu Tagesmittelwerten von QS'm, die in den Vergleichszeiträumen durchschnittliche Abweichungen von ein bis zwei Prozent im Altbestand und zwei Prozent im Aufforstungsbestand gegenüber QS<sub>m</sub> aufwiesen. Die

höchsten Diskrepanzen wurden während der Strahlungswetterlage um den 26.7.2000 mit +21 % (Altbestand) bzw. +24 % (Aufforstung) verzeichnet.

### 3.1.3 Beschreibung der Vegetationsverhältnisse

Die Beschreibung der Vegetationsverhältnisse auf den Versuchsflächen erfolgte primär nach physiognomischen Gesichtspunkten, wie sie für eine mikroklimatologische Einschätzung z. B. der Strahlungs- oder Interzeptionsverhältnisse von Bedeutung ist (VENZKE 1990). Ausgehend von den Messstationen und den Niederschlagssammlern erfolgte eine tachymetrische Erfassung der Baum- und Strauchschichten in einem Radius zwischen fünf und zehn Meter. Nach Vorlagen von WAGNER & NAGEL (1992), HÄGNER & HÄLLSTRÖM (1997) und FRAZER et al. (2001) wurde die Kronenschlussdichte oberhalb der Messwertgeber und der Niederschlagssammler fotografisch aufgenommen und über ein PC-System ausgewertet. Im Gegensatz zu den Veröffentlichungen stand jedoch kein »Fischaugen«-Objektiv zu Verfügung. Alternativ wurde ein Superweitwinkel-Objektiv mit einer Brennweite von 15 mm und einem Aufnahmewinkel von 117° über die Bilddiagonale verwendet (Abb. 22). Abschließend erfolgte eine Abschätzung der Holzmengen über die höhen- und durchmesserbezogenen Funktionen nach LAASASEN-AHO (1982).



Abb. 22: Aufnahmekonstruktion zur Erhebung der Kronenschlussdichte und Beispielfoto (Altbestand; Kronenschluss über dem Globalstrahlungsgeber)

## 3.2 Aufbau und Struktur der Versuchsflächen

Für die Aufnahme der mikroklimatologischen Parameter wurden, wie bereits beschrieben, drei Flächen ausgewählt, die typische Zustände in der Waldnutzung in Finnland darstellen (vgl. HEIKKINEN 1988, LINDAHL 1998, YRJÖLÄ 2002). Neben einem Altbestand im Klimaxstadium und einer Kahlschlagfläche wurde eine mit *Pinus sylvestris* aufgeforstete Fläche in die Messungen einbezogen.

Die Lage der Versuchsflächen etwa einen Kilometer südlich des Nationalparks stand im Zusammenhang mit lokalen forstwirtschaftlichen Nutzungen, die bis an die südliche Grenze des Schutzgebietes heranreichen. Der Forderung nach ähnlichen lokalklimatologischen Bedingungen folgend, lagen die Flächen in einer relativ geringen Distanz von weniger als einem Kilometer zueinander und wiesen ähnliche Eigenschaften hinsichtlich der Höhenlage, Neigung und Exposition auf. Mit Werten zwischen 270 und 300 m lagen die Flächen etwas über der von KOUTANIEMI (1983) beschriebenen mittleren Höhe des Hochlands von etwa 250 m. Entsprechend der Fragestellung unterschieden sich die Standorte somit im Wesentlichen durch ihre Vegetation bzw. ihren Sukzessionszustand.

Die im Zentrum der Versuchsflächen installierten Wetterstationen bildeten zusammen mit den je 30 Niederschlagssammlern pro Fläche die Ausgangsbasis für die Vermessung der Fläche. Im Verlauf der Messkampagnen wurden Stationen und Niederschlagssammler ausgehend vom Trigonometrischen Punkt Nr. 92M9202 (NLS 2000) mit Hilfe eines DGPS vermessen. Wie bereits in Kapitel 3.1.3 angedeutet, bildeten die o. g. Punkte die Ausgangsbasis für die tachymetrische Vermessung der Baum- und Strauchschichten im Umkreis von 5,0 bis 10,0 m, je nach Grad der Überschneidung.

Als Koordinatensystem für die Vermessung und der folgenden lokalen Kartendarstellungen diene das finnische Koordinatensystem KJ (Kartastokoordinaattijärjestelmä). Dieses in den topographischen Karten Finnlands verwendete System ähnelt dem in Deutschland gebräuchlichen Gauß-Krüger-Koordinatensystem (vgl. HAKE 1982), jedoch ist die Bezugsfläche der Internationale Ellipsoid von 1924. In beiden Systemen sind Meridiane in einem Abstand von 3° gebräuchlich, entsprechend der Lage Finnlands liegen die Bezugsmeridiane jedoch im Bereich zwischen 21° und 30° östlicher Länge. Die Koordinatenangaben des Untersuchungsraums beziehen sich auf den vierten Bezugsmeridian bzw. 30° E und als Einheit sind Meterangaben gebräuchlich.

### 3.2.1 Altbestandsfläche

Der Altbestand (ALT) entsprach zum Zeitpunkt der Aufnahme einem im Untersuchungsgebiet üblichen *Empetrum-Myrtillus*-Waldtyp (vgl. KALELA 1961, SÖYRINKI & SAARI 1980) mit einer Fläche von etwa 13,6 ha. Die erfassten Bäume erreichten ein Alter von bis zu 265 Jahren (HUTTUNEN 2002) und eine Höhe von bis zu 19,2 m. Die durchschnittliche Höhe der Baumschicht betrug 7,1 m bei einer ermittelten Bestandsdichte der Baumschicht von 972 Stämmen je Hektar.

Der Bestand wies entsprechend seiner natürlichen Sukzession eine heterogene und lockere Bestandsstruktur auf, wie sie in Abbildung 23 erkennbar ist. Die mittlere Kronenschlussdichte betrug etwa 45 %, unterlag jedoch durch umgestürzte Bäume und der unterschiedlichen Altersstruktur des Bestandes einer recht hohen Standardabweichung von etwa 9 %. Die Hauptarten der Baumschicht waren im Wesentlichen *Betula spec.* (34 %), *Picea abies* (30 %), *Pinus sylvestris* (12 %) und *Salix spec.* (10 %). In der Strauchschicht fand sich überwiegend *Juniperus communis* (88 %). Weitere Arten wie *Sorbus aucuparia*, *Salix spec.*, *Pinus sylvestris*, *Betula spec.* und *Populus tremula* waren mit Anteilen von unter 3 % vertreten.

Die Aufnahmefläche des Altbestandes wies eine mittlere Höhenlage von 282 m bei einer durchschnittlichen Neigung von etwa 11° und südwestlicher Exposition auf. Das Areal wurde nördlich und östlich durch die Verbindungsstraße nach Juuma und die anschließende Kahlschlagfläche begrenzt. In südlicher Richtung folgte ein Übergang in eine baumlose, moorbestandene Fläche.

Die Bodenverhältnisse waren in den Datenbeständen der »Landnutzung und Waldinventur« als Mineralböden klassifiziert (NLS 1999b). Im Rahmen einer geoökologischen Kartierung nach LESER & KLINK (1988) wurde die Fläche als Braunerde-Podsol (P-B) und die Bodenart als Klasse III bzw. als sandig-lehmiger, schwach- bis mitteltoniger Schluff (Tu) bestimmt (BUKTA 2001).

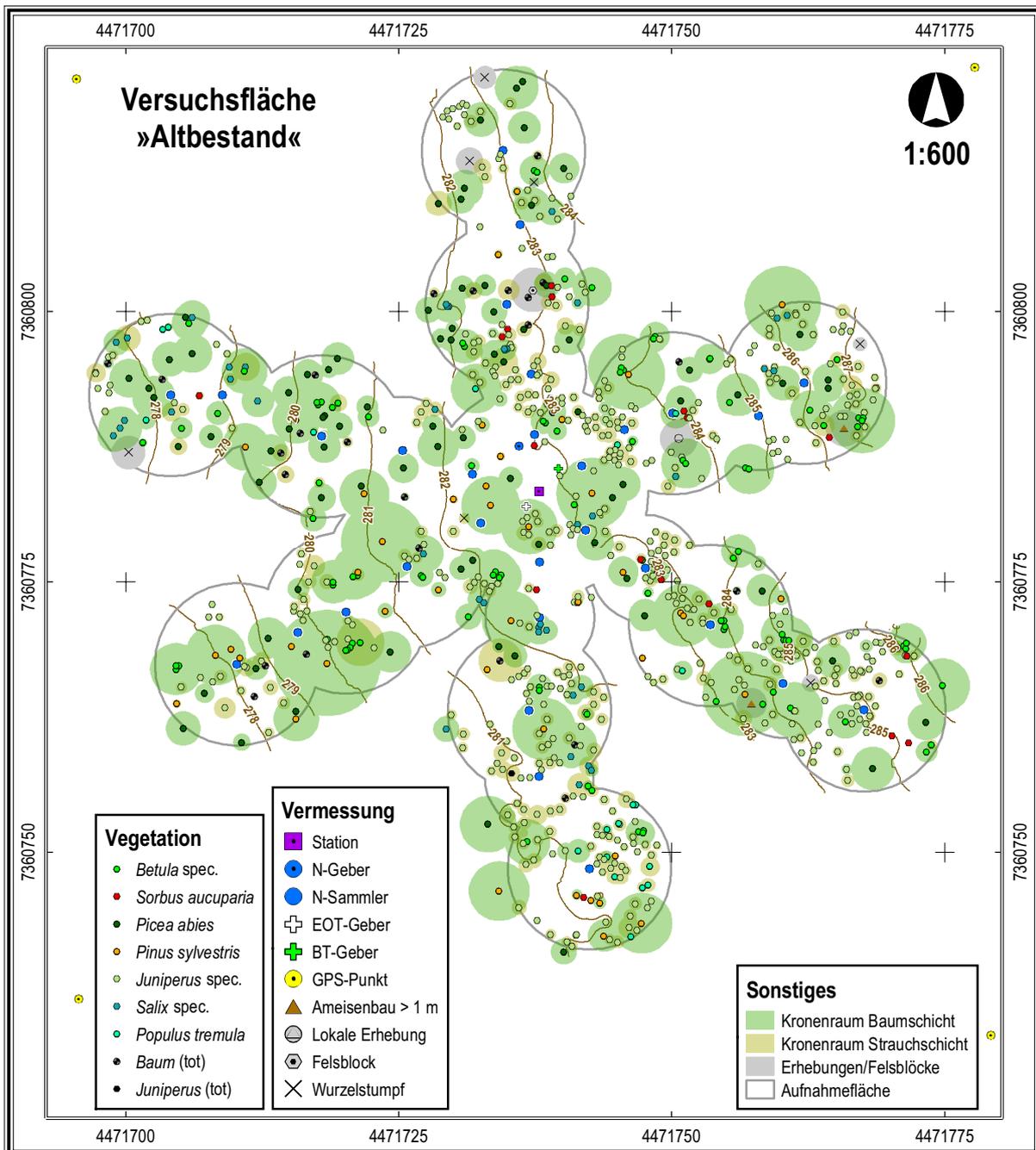


Abb. 23: Verteilung der Baum- und Strauchschicht, der Messinstrumente und höhenrelevanter Punkte im Altbestand

### 3.2.2 Kahlschlagfläche

Die in Abbildung 24 dargestellte, etwa 10,3 ha große Kahlschlagfläche (KAS) wurde 1992 eingeschlagen und im folgenden Jahr in WNW-ESE-Richtung gepflügt (HUTTUNEN 2002). Im Jahr 1994 erfolgte in Teilbereichen eine Aufforstung mit einjährigen *Pinus*- und zweijährigen *Picea*-Setzlingen. Die aufgenommenen Baumbestände bestanden primär aus *Betula*- (55 %), älteren *Salix*- (23 %) und *Picea*-Beständen (18 %). Verbliebene, einzelstehende Weiden erreichten eine Höhe von bis zu 15,2 m, die mittlere Höhe der verbliebenen Bäume 4,7 m. Ausgehend von diesen die Baumschicht erreichenden Individuen wies die Fläche eine mittlere Dichte von 152 Stämmen pro Hektar auf. Die eingebrachten Setzlinge hatten mit einer durchschnittlichen Höhe von weniger als 1,2 m die Baumschicht noch nicht erreicht, sie dominieren jedoch mit einem Anteil von 51 % die Strauchschicht. In dieser Schicht finden sich darüber hinaus *Betula spec.* (15 %), *Picea abies* (15 %), *Populus tremula* (7 %) und *Salix spec.* (5 %).

Die geringe Anzahl ausgewachsener Bäume bedeutete für die im Bereich der Niederschlagssammler erhobene Kronenschlussdichte einen Mittelwert von lediglich 6 %. Die Standardabweichung lag bei ausgesprochen hohen 8,3 % in Folge des »Ausreißers« Sammler 15 mit einem Kronenschluss von 41 % in direkter Baumnähe. Ohne den Wert lag die Standardabweichung bei 5,3 %.

Im Zeitraum von sechs Jahren, die seit dem Pflügen vergangen waren, hatte sich eine unvollständige, noch lückenhafte Krautschicht gebildet.

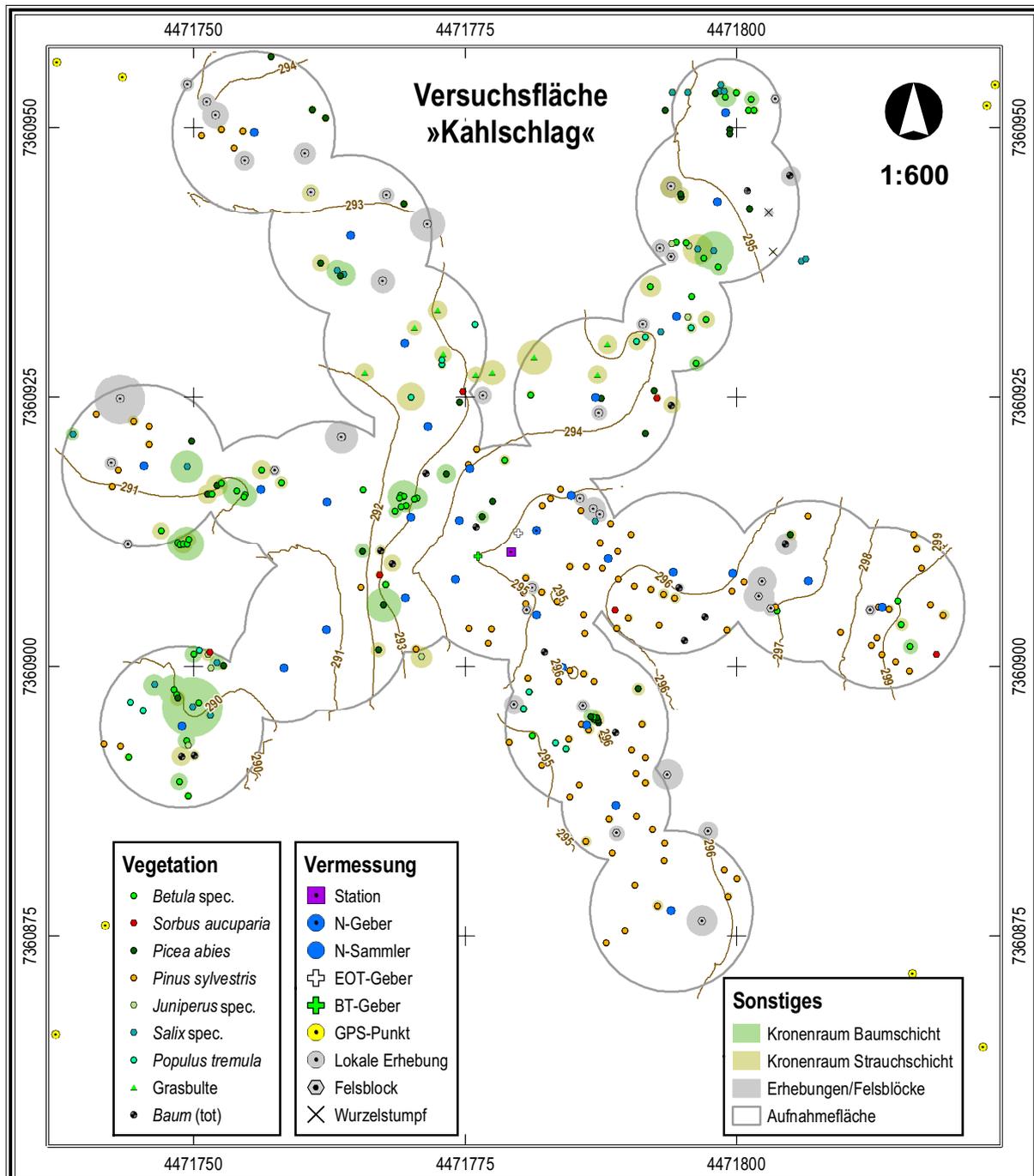


Abb. 24: Verteilung der Baum- und Strauchschicht, der Messinstrumente und höhenrelevanter Punkte auf der Kahlschlagfläche

Die Kahlschlagfläche lag mit einer mittleren Höhe von 294 m etwas höher als der Altbestand. Die durchschnittliche Neigung der ebenfalls südwestexponierten Fläche betrug durchschnittlich 10°. Die Fläche liegt im gleichen Neigungsbereich wie der Altbestand und wird südlich durch diesen begrenzt. Nach Norden und Osten reduziert sich die Neigung, wobei das Areal durch einen etwa 20 Jahre alten Bestand einer

Aufforstung begrenzt wird. Westlich schließt sich eine weitere Aufforstung an, zu der die gleichnamige Versuchsfläche gehört.

Die Bodenverhältnisse, ebenfalls Mineralböden, entsprachen in etwa denen des Altbestands (NLS 1999b). Auch hier lag als Bodentyp Braunerde-Podsol (P-B) vor, und als Bodenart fand sich nach BUKTA (2001) sandig-lehmiger, schwach- bis mitteltoniger Schluff (Ut3), entsprechend der Klasse III ökologisch ähnlicher Bodenarten nach LESER & KLINK (1988).

### 3.2.3 Aufforstungsfläche

Die Aufforstungsfläche (AUF) präsentierte sich als plantagenartig angelegter *Pinus sylvestris*-Bestand (Abb. 25). Die etwa 165 ha große Fläche wurde als Teil größerer Rodungen 1978 eingeschlagen und im gleichen Jahr in Nord-Süd-Richtung gepflügt (HUTTUNEN 2002). Im anschließenden Jahr erfolgte die Anpflanzung der *Pinus*-Bestände. Im Jahr 1992 wurde der Bestand ausgedünnt.

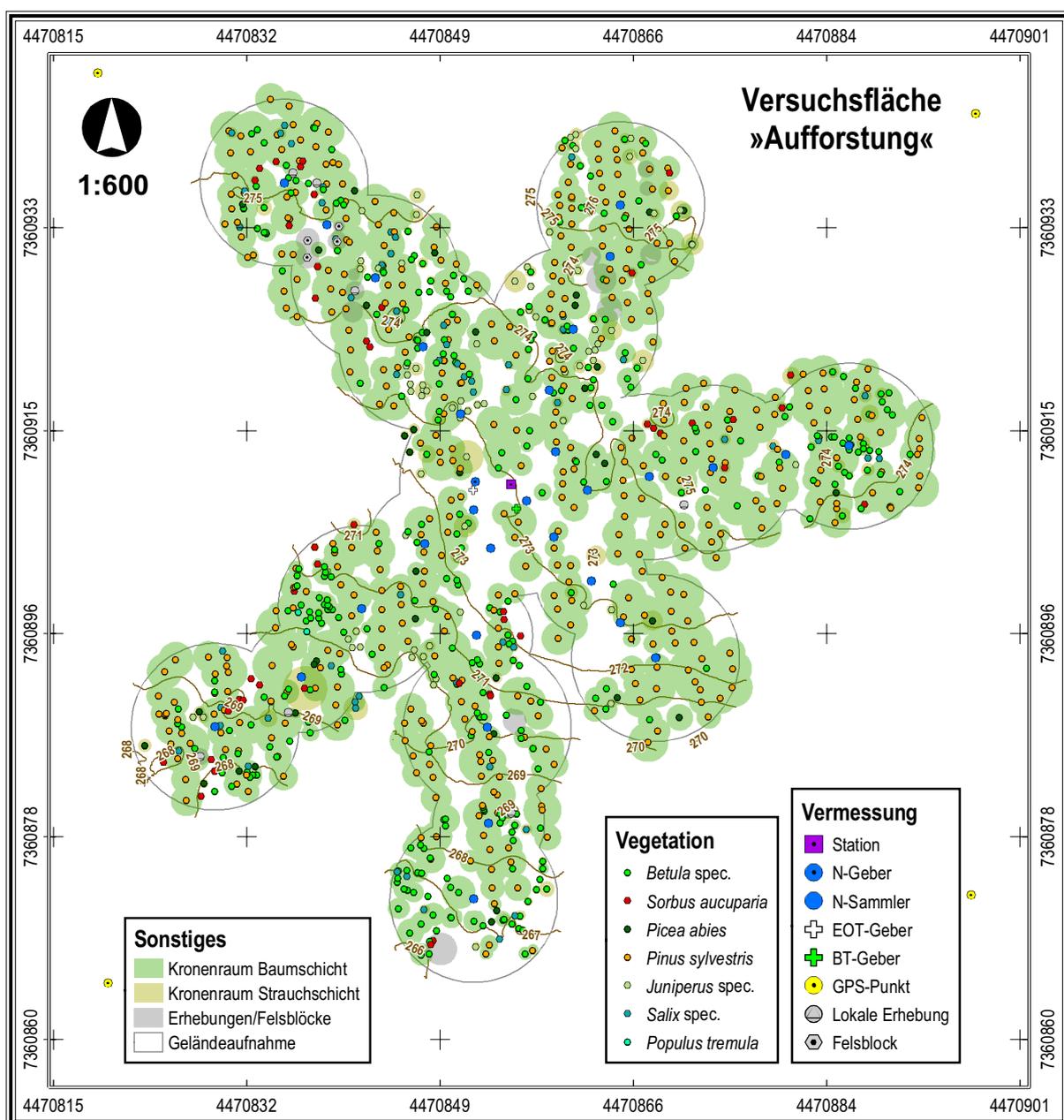


Abb. 25: Verteilung der Baum- und Strauchschicht, der Messinstrumente und höhenrelevanter Punkte auf der Aufforstungsfläche

Der Bestand war aufgrund der Pflanzung in Reihen parallel zur Pflugrichtung sehr homogen und wies mit 2485 Stämmen je Hektar die höchste Bestandsdichte der drei Flächen auf. Entsprechend ihrer Pflanzung dominierten *Pinus sylvestris* mit einem Anteil von 71 % die Baumschicht der Fläche. Als verbreitete Art war darüber hinaus lediglich *Betula spec.* mit 24 % anzutreffen. Vereinzelt traten noch *Picea abies* und *Sorbus aucuparia* auf. Der Bestand hatte in den 20 Jahren seit der Aufforstung eine mittlere Höhe von etwa 4,7 m erreicht, wobei die größten Individuen 8,4 m aufwiesen. Die dominante Baumart der Strauchschicht war mit etwa 46 % *Betula spec.*, darüber hinaus waren *Juniperus communis* (19 %), *Salix spec.* (15 %) und *Sorbus aucuparia* (10 %) verbreitet. Die mittlere Kronenschlussdichte lag bei durchschnittlich 49 % und war die höchste der drei Flächen. Die Standardabweichung der über den 31 Niederschlags-sammlern erhobenen Kronenschlussdichte war mit 14,1 % ebenfalls am höchsten.

Das Areal liegt etwa einen Kilometer westlich der zuvor beschriebenen Standorte. Ihre mittlere Höhe beträgt 272 m bei einer Hangneigung von etwa 12° und südlicher Exposition. Die nördliche Ausdehnung der Aufforstung endet erst etwa nach 1100 m durch die Altbestände des Nationalparks, während in südlicher Richtung die Verbindungsstraße nach Juuma einen Abschluss setzt. Südlich grenzen die Ausläufer des Altbestands an, in dem sich die erstgenannte Versuchsfläche befindet, und gehen in den Moorbereich des Hangasjärventaussuo über. Dieser entwässert den gesamten Bereich erst in Richtung Westen und schließlich nach Norden in den Oulankajoki.

Die Bodenverhältnisse basieren wie bei den anderen Flächen auf Mineralböden (NLS 1999b). Als Bodentyp fand sich nach BUKTA (2001) auch hier ein Braunerde-Podsol (P-B), während die Bodenart als sandig-lehmiger, schwach- bis mitteltoniger Schluff (Lt2) der Klasse II nach LESER & KLINK (1988) dokumentiert wurde.

---

## 4 Studien zum Bestandsklima

Im Mittelpunkt des Forschungsprojekts standen die bestandsklimatologischen Untersuchungen auf den Versuchsflächen im zeitlichen Rahmen der zwei Messkampagnen 1999 und 2000. Darüber hinaus wurden die Messwerte der im weiteren Umfeld des Untersuchungsgebiets vorhandenen Stationen des finnischen Wetterdienstes (FMI) genutzt. Neben Standortvergleichen ermöglichten die FMI-Daten eine Einschätzung des Zeitraums vor dem Beginn der Messkampagnen sowie eine Einordnung der Messzeiträume in den Kontext langjähriger Messreihen. Primär lassen sich die Untersuchungen zum Bestandsklima in vier Bereiche gliedern:

- Meteorologische Gegebenheiten im Vorfeld der Messungen. Die Analyse der Zeiträume vor dem Beginn der Messungen diente der Einschätzung der Repräsentanz der Messbedingungen. Untersuchungsschwerpunkt war die jahreszeitliche Entwicklung der thermischen und hygri-schen Bedingungen, die als Determinanten für die Vegetationsentwicklung dienten, sowie die Einordnung der Zeiträume in den langjährigen Klimakontext. Die Analyse basierte auf den Daten der Referenzstationen Kuusamo-Kiutaköngäs und Kuusamo-Lentoasema (Flughafen), die der finnische Wetterdienst je nach Parameter als Tages- oder 3-Stunden-Werte veröffentlicht. Für kürzere Zeiträume, einzelne Wetterlagen oder bestimmte Zeitpunkte wurde auf die Monatsberichte des finnischen Wetterdienstes und auf Datensätze des amerikanischen National Climatic Data Center (NCDC) zurückgegriffen.
- Meteorologische Rahmenbedingungen während der Messungen. Analog zum zuvor genannten Punkt galt es, die eigentliche Zeitspanne der Messkampagnen im klimatologischen Kontext der langjährigen Messwerte zu betrachten. Von besonderer Bedeutung war in dieser Hinsicht die Fragestellung, inwieweit die zwei Vegetationsperioden repräsentativ für die klimatologischen Bedingungen im Untersuchungsgebiet waren. Die Bezüge zu den langjährigen Messwerten basierten ebenfalls auf Daten der o. g. Referenzstationen des finnischen Wetterdienstes (FMI 1991). Die Werte des Flughafens Kuusamo umfassten dabei die WMO-Standardperiode von 1961-1990, während am Kiutaköngäs erst seit 1967 Daten erhoben wurden (FMI 1991).
- Bestands- und Referenzmessreihen. Die Untersuchungen zu den Bestands- und Referenzmessreihen beinhalten die mikroklimatologischen Unterschiede der Versuchsflächen sowie die Vergleiche mit den Referenzstationen des FMI. Die zwei Messkampagnen führten zu etwa 875000 Messwerten, die von den Datenloggern auf den Versuchsflächen gespeichert oder handschriftlich an den Standorten der 90 Niederschlagssammler aufgenommen wurden. Bezüge zu den Referenzstationen wurden auf der Basis der zuvor genannten Daten des finnischen Wetterdienstes ermittelt.
- Ausgewählte Wetterlagen. Für eine weitere mikroklimatologische Differenzierung der Standorte wurden Wetterlagen ausgewählt, die sich durch austauscharme, strahlungsreiche Bedingungen auszeichneten und so besonders kontrastreiche Messwerte erhoffen ließen (vgl. DUTTMANN & MOSIMANN 1994, KÖNIG 1995). Außerdem erfolgte eine Analyse von Wetterlagen mit Frostbedingungen, die per Definition einen limitierenden bioklimatologischen Faktor für die Vegetation darstellen können (vgl. GRANBERG et al. 1993, LINDKVIST & LINDQVIST 1997).

### 4.1 Dauer und Repräsentanz der Messungen

Die Zeiträume der Messkampagnen von Juni bis September 1999 und von Juni bis August 2000 orientierten sich primär an der Dauer der Vegetationsperiode im Untersuchungsraum und den zeitlichen und finanziellen Möglichkeiten des Projekts. Die mittlere Vegetationsperiode in der Region umfasst 100 bis 130 Tage im Jahr und beginnt in der Regel im Zeitraum von Mitte Mai bis Anfang Juni und endet in der zweiten Septemberhälfte (SÖYRINKI & SAARI 1980, TVEITO et al. 2001). Entsprechend wurde mit den

Monaten Juni bis August/September ein Zeitrahmen gewählt, der sowohl die mikroklimatologische Differenzierung der Versuchsflächen unter den durchgehenden Strahlungsbedingungen des Sommersolstitiums berücksichtigte als auch den Spätsommer umfasste. Im letztgenannten Zeitraum treten häufig die ersten Frostwetterlagen auf ohne dass die Vegetation eine entsprechende Frosthärte aufweist (LINDKVIST & CHEN 1997, BEUKER et al. 1998).

In den 140 Tagen der zwei Messkampagnen kam es auf den Versuchsflächen zu Datenausfällen, die in detaillierter Form in Kapitel 3.1.1 beschrieben wurden und in Tabelle 31 im Anhang zusammengefasst sind. Betroffen waren die Messwerte der Windgeschwindigkeit und -richtung sowie der Niederschläge während der Messkampagne des Jahres 2000. Der Ausfall, Tausch und Ersatz der Windgeber war auf der Kahlschlagfläche mit einem Datenausfall von sechs Prozent des Messzeitraums verbunden. Im Aufforstungsbestand entsprach der Ausfall etwa 14 % des Messzeitraums. Ein Montagefehler führte darüber hinaus zu einem siebentägigen Messausfall des automatischen Niederschlags Sammlers im Altbestand, das entspricht etwa elf Prozent des Messzeitraums. Im Hinblick auf die Werte der Windgeber kann davon ausgegangen werden, dass die beschriebenen Datenausfälle nur einen geringen Einfluss auf die Gesamtergebnisse hatten, da in den Zeiträumen ihres Auftretens sowohl auf den anderen Versuchsflächen als auch an den Referenzstandorten keine extremen Bedingungen auftraten. Im Fall der Altbestandsniederschläge wurde über eine lineare Interpolation auf Basis der Werte der Kahlschlagfläche (vgl. Kap. 3.1.1) eine Fehlerreduzierung angestrebt, da sonst im Messzeitraum 2000 ein Fehlbetrag von etwa 13 % der Niederschläge eingetreten wäre. Weitergehende Probleme verbanden sich mit den durch das FMI erhobenen Messwerten der Referenzstation Kuusamo-Lentoasema. Da dort ab dem 1.7.2000 keine bodennahen Temperaturen mehr erfasst wurden, betrug der vergleichbare Zeitraum im Jahr 2000 lediglich 14 Tage (22 % des Messzeitraums). Darüber hinaus konnten für den Zeitraum mehrerer Strahlungs- und Frostwetterlagen keine Vergleiche mit den Versuchsflächen durchgeführt werden.

## 4.2 Meteorologische Gegebenheiten im Vorfeld der Messungen

Von weitergehender Bedeutung für die Interpretation der Messdaten war der Vergleich der Messzeiträume 1999 und 2000 mit den Wetterbeobachtungen des WMO-Zeitraums 1961-1990 an den Referenzstationen. Vor diesem Hintergrund erfolgte, wie einleitend bereits erwähnt, eine Untersuchung außergewöhnlicher, vom langjährigen Mittel abweichender Witterungssituationen. Berücksichtigt wurden dabei auch die meteorologischen Bedingungen der Zeiträume vom 1.6. bis zum eigentlichen Beginn der Messkampagnen.

### 4.2.1 Meteorologische Entwicklung im Vorfeld der Messkampagne 1999

Die Temperatursumme als Indikator für die Vegetationsentwicklung entsprach am 1.6.1999 etwa dem langjährigen Mittel. Gegenüber dem WMO-Zeitraum 1961-1990 zeichnete sich das Frühjahr 1999 jedoch durch ein früheres Auftreten von temperatursummenrelevanten Tagen mit über 5 °C aus, denen in der Folgezeit geringe Temperaturen und eine Reihe von Frosttagen entgegen standen. Die letzten Nachtfroste an den Referenzstationen wurden am 4.6. registriert, anschließend folgte ein Anstieg der Tagesmittelwerte in den zweistelligen Bereich. Zu Beginn der Messkampagne am 25.6. wurden im Untersuchungsraum wie auch in ganz Finnland ungewöhnliche hohe Temperaturen gemessen. Ursache war ein Hochdruckgebiet über Finnland, dessen Einfluss sich ab dem 9. Juni im Untersuchungsraum durchsetzte, sodass sich warme Witterungsbedingungen etablierten (FMI 1999a). Die Junimittel der Temperatur lagen in Kuusamo 3,1 K und am Kiutaköngäs 3,3 K über dem langjährigen Mittel. An drei Tagen wurden die höchsten Tagesmittel des Zeitraums 1961-90 übertroffen (Abb. 26). Die am Flughafen Kuusamo akkumulierte Temperatursumme des 25.6. lag 69 K über dem langjährigen Mittel. Die Vegetationsentwicklung hatte

am Monatsende gegenüber dem durchschnittlichen Verlauf einen Vorsprung von etwa acht Tagen (FMI 1999a).

Das Frühjahr 1999 war am Flughafen in Kuusamo trockener als im langjährigen Mittel. Im Zeitraum Januar bis Mai wurden etwa 91 % der üblichen Niederschläge gemessen, bezogen auf die Monate April bis Mai waren es 78 % (NCDC 1999). Der Monat Juni zeichnete sich demgegenüber durch 40 % höhere Werte aus (+29 mm), allerdings waren allein 26 mm Niederschlag auf ein Starkregenereignis am 30.6. zurückzuführen. Bis zum Beginn der Messkampagne am 25.6. war am Standort des Flughafens noch ein geringes Defizit zu verzeichnen (Tab. 2). Die Referenzstation Kiutaköngäs registrierte 82 % der üblichen Juniwerte (-10 mm).

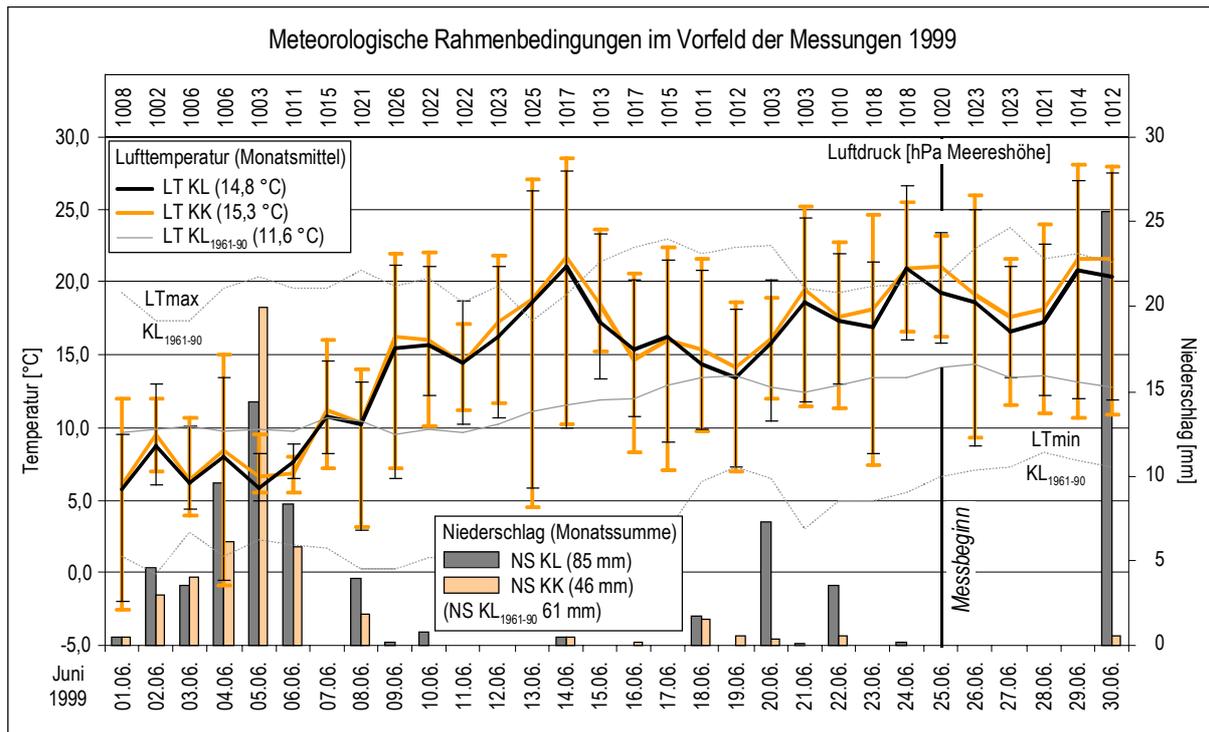


Abb. 26: Tagesmittel- und Extremwerte der Lufttemperatur, Niederschlag und Luftdruck der Stationen Kuusamo Flughafen (KL) und Kuusamo Kiutaköngäs (KK) im Vorfeld der Messungen 1999; Tagesmittel und Extremwerte der Lufttemperatur am Flughafen Kuusamo (KL<sub>1961-90</sub>) (Daten: FMI)

#### 4.2.2 Meteorologische Entwicklung im Vorfeld der Messkampagne 2000

Wie im Jahr zuvor wurden auch im Frühjahr des Jahres 2000 erste Tage mit Mittelwerten über 5 °C annähernd einen Monat früher registriert als im langjährigen Mittel. Danach kam es ebenfalls zu einer Reihe kälterer Tage und zu Frostereignissen, sodass die Temperatursummen bis zum 18.5. gegenüber dem Vorjahr zurückblieben. Anschließend folgten bis Monatsende 13 Tage mit zweistelligen Tagesmitteln, sodass die Temperatursumme am 1.6. etwa 62 K über dem langjährigen Mittel und 63 K über dem Wert des Vorjahres lag. Die Mittelwerte des Folgemonats Juni lagen dagegen mit +0,1 K in Kuusamo und +0,3 K am Kiutaköngäs annähernd im Bereich des langjährigen Mittels. Der Untersuchungsraum wich damit aber von einem fast landesweiten Trend ab, der negative Juniwerte gegenüber dem Zeitraum 1961-1990 aufzeigte. Trotz des abweichenden Trends konnten auch im Untersuchungsgebiet bis weit in den Juni hinein Nachtfröste gemessen werden, von denen die letzten am 18.6. an beiden Stationen auftraten. Im Folgezeitraum stiegen die Temperaturen deutlich an, und am 23.6. überschritten die Tageshöchsttemperaturen in Kuusamo erstmals die 20-°C-Marke. Die Temperatursummen lagen in Kuusamo zu Beginn des Vergleichszeitraums am 25.6. bei 224 K und damit etwas über dem langjährigen Mittel.

Entsprechend gab das FMI für den 28.6. einen Entwicklungsvorsprung der Vegetation von zwei Tagen an (FMI 2000a).

Das erste Halbjahr des Jahres 2000 war landesweit feuchter als im langjährigen Mittel. Am Flughafen Kuusamo wurden von Januar bis Mai etwa 130 % bzw. von April bis Mai 120 % der üblichen Werte gemessen (NCDC 2000). Im Juni fielen in Kuusamo 24 mm mehr Niederschläge als im Durchschnitt, entsprechend etwa 140 % des üblichen Monatsmittels. Im Tal des Oulankajoki wurden 14 mm mehr als üblich bzw. 125 % des langjährigen Mittels gemessen (FMI 2000a).

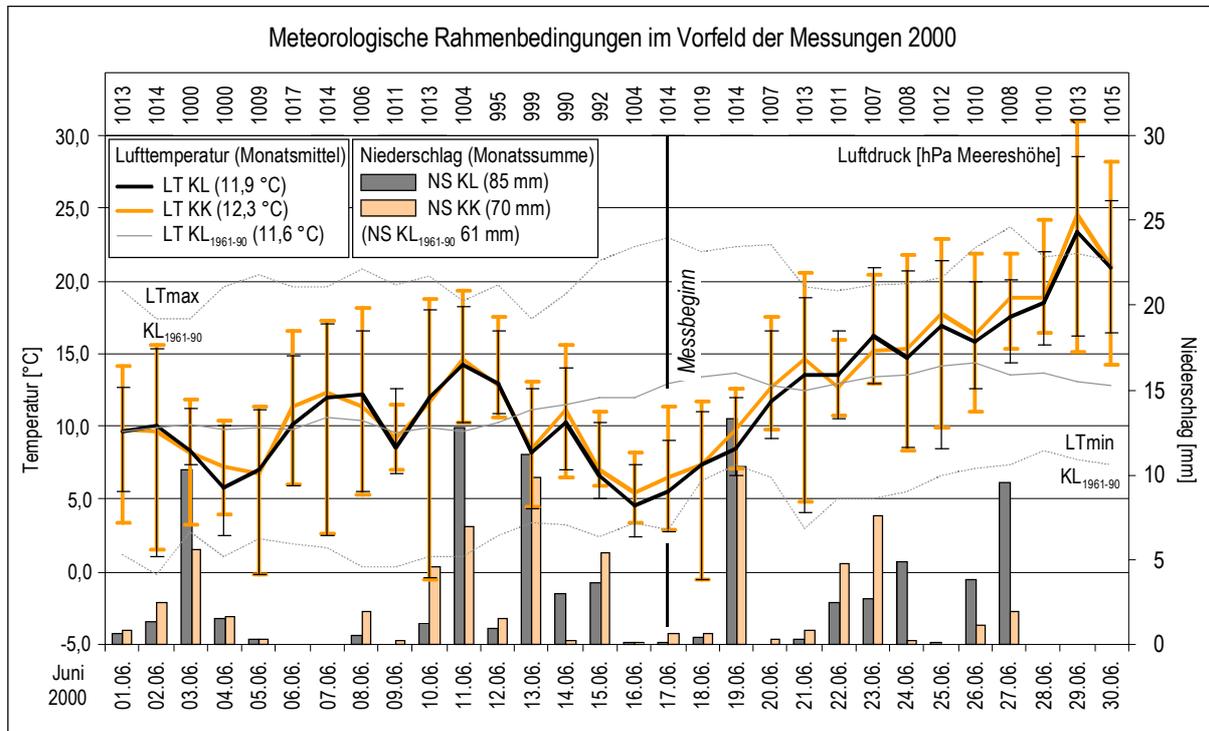


Abb. 27: Tagesmittel- und Extremwerte der Lufttemperatur, Niederschlag und Luftdruck der Stationen Kuusamo Flughafen (KL) und Kuusamo Kiutaköngäs (KK) im Vorfeld der Messungen 2000; Tagesmittel und Extremwerte der Lufttemperatur am Flughafen Kuusamo 1961-90 (KL<sub>1961-90</sub>) (Daten: FMI)

#### 4.2.3 Zusammenfassung der meteorologischen Bedingungen vor den Messkampagnen

Zusammenfassend waren die Zeiträume vor den beiden Messkampagnen durch höhere Temperaturen geprägt als im langjährigen Mittel (Tab. 2). Bis zum Messbeginn waren jeweils höhere Temperatursummen aufgelaufen als üblich, außerdem kam es in beiden Jahren etwa einen Monat früher zu Tagesmittelwerten von über 5 °C.

Tab. 2: Zusammenfassung der meteorologischen Bedingungen bis zum Beginn der Vergleichszeiträume der beiden Messkampagnen

	1999 ( $\Delta$ 1961-1990)	2000 ( $\Delta$ 1961-1990)
LT $\Sigma$ 1.6. [K]	32 (-1)	95 (+62)
LT $\Sigma$ 25.6. [K]	255 (+69)	224 (+38)
LTm Juni [°C] ([K])	14,8 (+3,1)	11,9 (+0,1)
LTmax Juni [°C] ([K])	27,6 (+3,9)	28,6 (+4,9)
LTmin Juni [°C] ([K])	-2,0 (-1,9)	-0,5 (-0,4)
NS 1.6. [mm]	151 (-15)	208 (+42)
NS 25.6. [mm]	210 (-3)	283 (+71)

Temperatursummen (LT $\Sigma$ ) vom 1.1. bis zum 1.6. bzw. bis zum Beginn des Vergleichszeitraums der zwei Messkampagnen sowie Mittel- und Extremwerte der Lufttemperaturen (LTm; LTmax; LTmin) und Niederschlagssummen (NS) am Flughafen Kuusamo im Vergleich zum langjährigen Mittel 1961-1990

An vier Tagen wurden höhere Tagesmaxima registriert als an diesen Tagen im gesamten WMO-Zeitraum 1961-1990. Trotzdem kann davon ausgegangen werden, dass beide Jahre als repräsentativ anzusehen sind, da es zwischen 1961 und 1990 im o. g. Zeitraum eine Reihe von überdurchschnittlich warmen Monaten gab, die sich teilweise durch deutlich höhere Werte auszeichneten.

Im Hinblick auf die Niederschlagsituation war die erste Jahreshälfte 1999 durch geringere und die des Jahres 2000 durch höhere Niederschläge gekennzeichnet. Die Abweichungen vom langjährigen Mittel lagen aber ebenfalls im üblichen Bereich. Zwischen 1961 und 1990 wurden im o. g. Zeitraum in fünf Jahren geringere Niederschläge gemessen als 1999 und in neun Jahren höhere als im Jahr 2000 (FMI 1991).

### 4.3 Meteorologische Rahmenbedingungen während der Messungen

Auch zu Beginn der Messkampagnen 1999 und 2000 setzte sich der Trend zu überdurchschnittlichen Lufttemperaturen aus dem Vorfeld der Messungen fort, wenn auch in unterschiedlicher Ausprägung. Die Niederschlagsverhältnisse unterlagen dagegen einer hohen Variabilität. Auf Grundlage der Referenzstationen Kuusamo Lentoasema (KL) und Kuusamo Kiutaköngäs (KK) fassen die folgenden Kapitel die meteorologischen Bedingungen während der zwei Messkampagnen zusammen.

#### 4.3.1 Meteorologische Situation während der Messkampagne 1999

Wie in Kapitel 4.2.1 bereits angedeutet, war der Beginn der Messkampagne (25.6.) durch ausgesprochen hohe Temperaturen geprägt, die an beiden Referenzstationen über dem langjährigen Mittel lagen (FMI 1999a). In Folge einer Hochdrucklage wurde mit dem 26.6. ein vollständig wolkenloser Tag aufgezeichnet, der im Hinblick auf die Globalstrahlung die Bedingungen einer »Strahlungswetterlage« erfüllte. Zum Ende der Hochdruckwetterlage am 29.6. und 30.6. wurden in Kuusamo Höchsttemperaturen von über 27 °C bei Tagesmitteln von etwas mehr als 20 °C registriert (Abb. 28). Üblich sind in diesem Zeitraum Tageswerte von 13 bis 14 °C. In der Tallage des Oulankajoki lagen die Mittel- und Extremwerte jeweils noch etwa 1,0 bis 1,5 K über den Werten des Flughafens. Die Folgen der hohen Temperaturen waren überdurchschnittliche *Junimittel* an beiden Stationen. Im Verlauf der wenigen Messtage seit dem 25.6. fielen keine nennenswerten Niederschläge, bis ein Gewitter am 30.6. in Kuusamo zu Regenmengen von annähernd 26 mm führte. Diese Menge entspricht 42 % der durchschnittlichen Gesamtniederschläge des Monats Juni. Dieses Einzelereignis ließ den Monat Juni als überdurchschnittlich feuchten Monat in die Statistik der Station Kuusamo Lentoasema eingehen, während die Werte am Kiutaköngäs unter der mittleren Summe blieben.

Die Temperaturen des Monats *Juli* lagen mit +0,2 K in Kuusamo und +0,6 K am Kiutaköngäs ebenfalls über den langjährigen Werten. Zu Beginn des Monats erreichten aus Südwesten mehrere Tiefdruckgebiete den Raum, sodass die Temperaturen zwischen dem 4.7. und 9.7. geringer waren als üblich. Zwischenzeitlich sanken die Tagesmittelwerte auf lediglich etwa 8,8 °C in Kuusamo statt üblicher 14 bis 15 °C und auf 9,4 °C am Kiutaköngäs (Abb. 28). Um den 10. Juli führte Hochdruck aus westlichen Richtungen zu erneut hohen Temperaturen in ganz Finnland. Zweimal wurden in Kuusamo Höchstwerte von über 25 °C (»Sommertage«) registriert und am Kiutaköngäs traten sogar fünf derartige Tage auf. Nach dem 20. Juli wurden Tiefdruckgebiete dominant, sodass sich geringere Werte etablierten. Die Niederschläge lagen im Untersuchungsraum über den mittleren Summen des Zeitraums 1961-1990. In Kuusamo wurden 102 mm statt üblicher 73 mm gemessen, eine Menge, die nur etwa alle zehn Jahre auftritt (FMI 1999b). Am Kiutaköngäs betrug die Niederschlagsmenge 87 mm (1967-1990: 73 mm).

Im Gegensatz zu den Vormonaten war der *August* durch unterdurchschnittliche Temperaturen gekennzeichnet. In Kuusamo lag das Monatsmittel 1,3 K und am Kiutaköngäs 1,5 K unter den üblichen Werten. Zu Beginn des Monats führte Hochdruckeinfluss landesweit zu hohen Temperaturen von über 25 °C (FMI

1999c), jedoch blieben die Werte im Untersuchungsraum mit 21,9 bzw. 22,5 °C darunter (Abb. 28). Unter dem Einfluss von Tiefausläufern zwischen dem 3.8. und 7.8. sanken die Tagesmittel von üblichen 15 °C auf nur noch etwa 8 °C. Zur Monatsmitte erreichte ein schwaches Hoch aus Skandinavien die Region und führte zu überwiegend sonnigem Wetter mit geringen Niederschlägen (FMI 1999c). Im August traten die ersten Nachtfröste des Spätsommers auf, etwa drei Wochen früher als üblich (FMI 1999c). An beiden Referenzstationen wurden sechs »Frosttage« zu Beginn und zum Ende des Monats registriert, die in Kapitel 4.5.2 als »Frostwetterlagen« eingehender behandelt wurden. Da der Monat August im WMO-Zeitraum 1961-1990 bereits kühler war als im Langzeitnormal, welches den Zeitraum seit Beginn der meteorologischen Messungen in Finnland umfasst, stellten die landesweit unterdurchschnittlichen Augusttemperaturen und die hohe Zahl an Frostereignissen 1999 eine ungewöhnliche Situation dar (FMI 1999c). Im Durchschnitt war nur einer von sechs Augustmonaten kühler als der von 1999. Die im Untersuchungsraum gemessenen Niederschläge lagen im August bei lediglich 50-75 % der üblichen Werte. In Kuusamo wurden 47 mm statt 75 mm gemessen, am Kiutaköngäs 46 mm statt 70 mm. Die anhaltende Trockenheit war als Nadelvergilbung in den *Pinus*-Beständen der Aufforstungs- und der Kahlschlagfläche erkennbar.

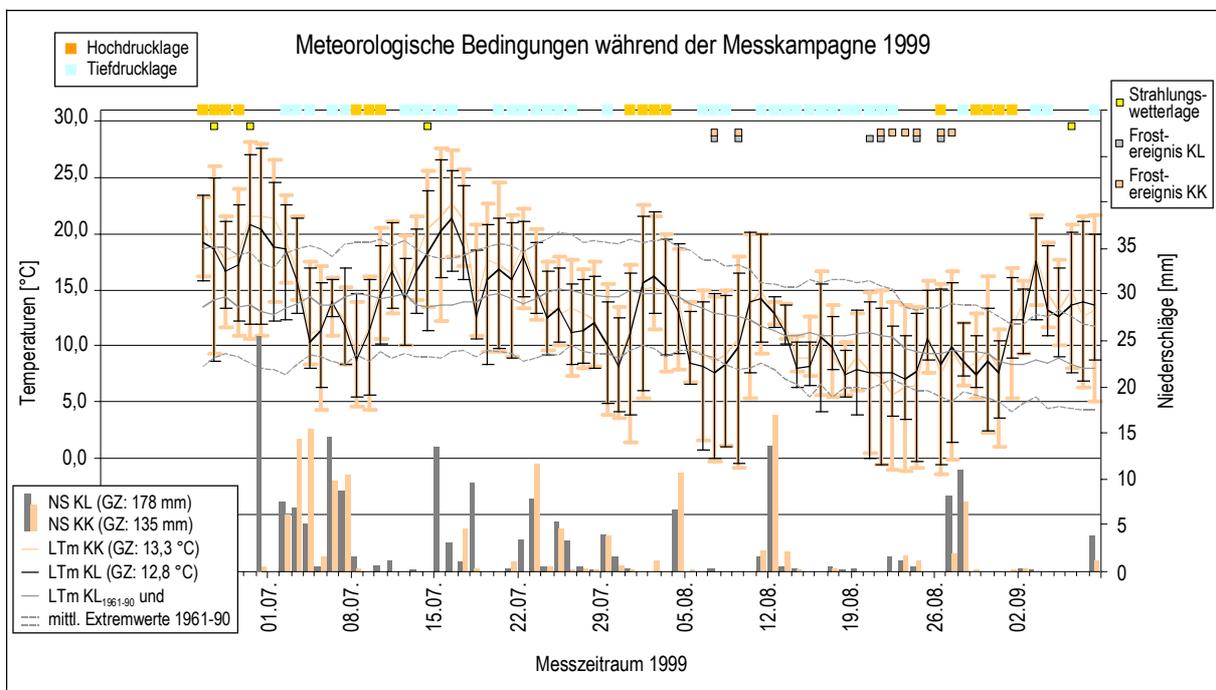


Abb. 28: Tagesmittel- und Extremwerte der Lufttemperaturen und Tagessummen der Niederschläge während der Messkampagne 1999 an den Referenzstationen Kuusamo Lentoasema (KL) und Kuusamo Kiutaköngäs (KK); im Vergleich die Tagesmittel und durchschnittlichen Extremwerte der Lufttemperaturen 1961-1990 (KL)

Der September 1999 war in ganz Finnland wiederum durchgehend wärmer als im langjährigen Mittel. Im Untersuchungsraum lagen die Monatsmittel der Referenzstationen 2,4 K (Kuusamo) bzw. 2,2 K (Kiutaköngäs) über dem Durchschnitt. Der Beginn des Monats war bereits sehr warm, es konnten Tageshöchstwerte von 20 bis 25 °C gemessen werden (Abb. 28). Ursache war ein stabiles Hoch über Nordrussland, welches subtropische Luft aus Mitteleuropa einfließen ließ (FMI 1999d). In Kuusamo zeigte das Thermometer am 3.9. einen Höchstwert von über 21 °C, und nach einigen geringfügig kühleren Tagen stiegen auch vom 6.9. bis 8.9. die Temperaturen wieder über 20 °C. Der 6.9. trat dabei als letzter »Strahlungstag« der Messkampagne 1999 hervor. Am Kiutaköngäs zeigte sich ein vergleichbares Bild, auch hier wurden an den letzten Tagen der Messkampagne Höchstwerte von über 20 °C registriert. Wie schon der August war auch der September deutlich zu trocken. In den meisten Gebieten Finnlands fielen

nur 25 bis 75 % der sonst üblichen Niederschläge. In Kuusamo konnten lediglich 25 mm statt der durchschnittlichen 60 mm und am Kiutaköngäs 32 mm statt durchschnittlicher 61 mm gemessen werden.

#### 4.3.2 Meteorologische Situation während der Messkampagne 2000

Wie bereits in Kapitel 4.2.2 ausgeführt, lagen die *Junitemperaturen* des Untersuchungsraums abweichend vom überwiegenden Teil Finnlands geringfügig über den langjährigen Mitteln. Der Beginn der Messkampagne (17.6.) war jedoch von geringen Temperaturen begleitet, einschließlich des einzigen Frostereignisses der Messkampagne am 18.6.2000 (Abb. 29). Die Tagesmittel überschritten nur geringfügig die 7-°C-Marke statt üblicher 13 °C. Erst zum Sommersolstitium stiegen die Temperaturen deutlich an und überschritten am 21.6. erstmals die 20 °C am Kiutaköngäs und zwei Tage später in Kuusamo. Nur wenige Tage später wurde am Kiutaköngäs mit 31 °C das höchste Tagesmaximum des Jahres registriert (Abb. 29). Die Juniwerte der Niederschläge lagen an beiden Referenzstationen über den langjährigen Durchschnittsmengen (FMI 2000a).

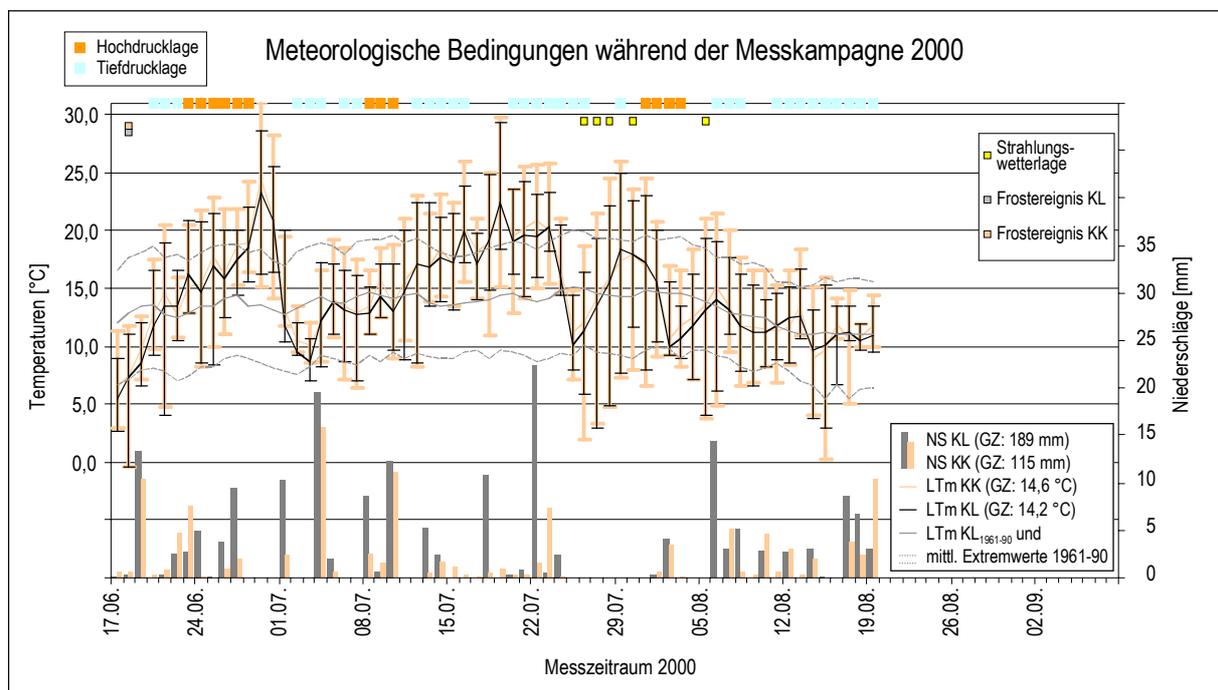


Abb. 29: Tagesmittel- und Extremwerte der Lufttemperaturen und Tagessummen der Niederschläge 2000 während der Messkampagne an den Referenzstationen Kuusamo Lentoasema (KL) und Kuusamo Kiutaköngäs (KK); im Vergleich die Tagesmittel und durchschnittlichen Extremwerte der Lufttemperaturen 1961-1990 (KL)

Der Untersuchungsraum war im *Juli* durch Temperaturen geprägt, die an beiden Referenzstationen 1,4 K über dem langjährigen Mittel lagen. Der größte Teil des Monats zeichnete sich durch den Einfluss einer ganzen Reihe von Tiefdruckgebieten aus, die Luftmassen aus südöstlichen Richtungen heranführten (FMI 2000b). Die Tiefausläufer waren häufig mit Niederschlägen und Gewittern verbunden, zeitweise erfolgte eine Zufuhr warmer Luftmassen aus südlichen Richtungen. Um den 19.7. wurden landesweit die höchsten Temperaturen gemessen, so auch am Flughafen Kuusamo mit 29,3 °C (Abb. 29). Dort traten in diesem Zusammenhang zwei »Sommertage« ( $T_{max} > 25$  °C) auf, am Kiutaköngäs waren es sechs. Im Zuge einer Hochdrucklage konnten vom 26.-28.7. und am 30.7. insgesamt vier Strahlungstage beobachtet werden (vgl. Kap. 4.5.1.1). Die Niederschlagsverhältnisse des Juli wiesen eine hohe räumliche Variabilität auf. Nach Angaben des FMI (2000b) wurden im Osten Finnlands durchschnittliche Mengen registriert, im Norden geringere. In Kuusamo registrierten die Niederschlagssammler 25 mm mehr als üblich, wobei allein 22 mm auf ein Gewitterereignis am 22.7. zurückzuführen waren. Am Kiutaköngäs wurden 23 mm weniger als im langjährigen Monatsmittel gemessen.

Wie die Monate zuvor lagen auch die Lufttemperaturen des *August* über dem langjährigen Mittel beider Referenzstationen (+0,4 K). In den ersten drei Wochen des August war die Wettersituation durch Tiefdruckgebiete dominiert, die niederschlagsreiche Luftmassen aus südwestlichen Richtungen zur Folge hatten (FMI 2000c). An keinem Tag wurden im Untersuchungsraum Temperaturen über 25 °C gemessen. Dennoch trat am 5.8. ein letzter Strahlungstag während der Messkampagne 2000 auf. Bezogen auf die Temperatursummen lag die Vegetationsentwicklung im langjährigen Mittel, zumal im Gegensatz zum Vorjahr keine Nachtfröste registriert wurden. Bei landesweit inhomogener Niederschlagsverteilung war der Untersuchungsraum im August durch geringere Niederschläge geprägt. In Kuusamo wurden 8 mm und am Kiutaköngäs 10 mm weniger als im üblich gemessen.

### 4.3.3 Zusammenfassung der meteorologischen Situation während der Messkampagnen

Waren bereits die Frühsommer, wie in Kapitel 4.2.3 zusammengefasst, wärmer als üblich, so wiesen auch die eigentlichen Messzeiträume überdurchschnittlich hohe Lufttemperaturen auf. Je nach Festlegung des Bezugszeitraums (Tab. 3) lagen die Werte am Flughafen (KL) zwischen 0,2 und 1,1 K über den langjährigen Mittelwerten. Am Ende der Vergleichszeiträume (19.8.) waren entsprechend hohe Temperatursummen aufgelaufen, die 1999 um 10 % und im Jahr 2000 um 14 % über dem langjährigen Mittel von 1961-1990 lagen. Da für die erst seit 1967 existierende Station Kiutaköngäs keine langjährigen Werte auf der Basis von Tagesdaten vorlagen, wurden die Monatsmittel von Juni bis September herangezogen. Gegenüber dem langjährigen Monatsmittel von 1967-1990 wurden an diesem Standort 1999 höhere Werte von 1,2 K und im Jahr 2000 von 0,7 K registriert (Tab. 3).

Tab. 3: Zusammenfassung ausgewählter klimatologischer Parameter der Stationen Kuusamo Lentoasema (KL) und Kuusamo Kiutaköngäs (KK) für die Vergleichs- bzw. Messzeiträume der beiden Messkampagnen sowie den Vergleichswerten des meteorologischen Zeitraums 1961-1990 (1967-1990)

		Kuusamo- Lentoasema 1999	Kuusamo- Kiutaköngäs 1999	Kuusamo- Lentoasema 2000	Kuusamo- Kiutaköngäs 2000	Kuusamo- Lentoasema 1961-90	Kuusamo- Kiutaköngäs 1967-90
Juni-September ( $\Delta$ 1961-90)							
LTm	[°C] ([K])	11,8 (+0,9)	12,2 (+1,2)	11,5 (+0,6)	11,8 (+0,7)	10,9	11,1
NS	[mm]	259 (-10)	211 (-48)	286 (+18)	201 (-58)	268	259
WGm <sub>2m</sub>	[ms <sup>-1</sup> ]	1,3 (-0,8)	n. g.	1,6 (-0,5)	n. g.	2,1	n. g.
Vergleichszeitraum 25.6.-19.8. ( $\Delta$ 1961-90)							
LTm	[°C]	13,7 (+0,2)	14,4 (n. v.)	14,6 (+1,1)	15,0 (n. v.)	13,5	(n. v.)
LT <sub>d</sub> max	[°C]	21,4 (-3,8)	22,7 (n. v.)	23,3 (-1,9)	24,6 (n. v.)	25,2	(n. v.)
LT <sub>d</sub> min	[°C]	7,5 (+2,9)	7,7 (n. v.)	8,7 (+4,1)	9,0 (n. v.)	4,6	(n. v.)
LTmax	[°C]	27,5 (-3,7)	28,1 (n. v.)	29,3 (-1,9)	31,0 (n. v.)	31,2	(n. v.)
LTmin	[°C]	-0,4 (+2,1)	-0,8 (n. v.)	2,9 (+5,4)	0,3 (n. v.)	-2,5	(n. v.)
NS	[mm]	152 (+17)	121 (n. v.)	165 (+31)	90 (n. v.)	134	(n. v.)
Messzeiträume 25.6.-19.8.99/17.6.-19.8.00 ( $\Delta$ 1961-90)							
LTm	[°C]	12,8 (+0,4)	13,4 (n. v.)	14,2 (+0,7)	14,6 (n. v.)	12,4/13,5	(n. v.)
NS	[mm]	179 (-2)	136 (n. v.)	190 (+41)	116 (n. v.)	181/148	(n. v.)
		n. v. - nicht vorhanden		n. g. - nicht gemessen			

Mittelwerte der Lufttemperaturen (LTm), der höchsten bzw. geringsten Tagesmittel (LT<sub>d</sub>max/LT<sub>d</sub>min), der aufgetretenen Extremwerte (LTmax/LTmin), der Niederschlagssummen (NS), und der mittleren Windgeschwindigkeiten bezogen auf 2 m Höhe (WGm)

Die Niederschlagsituation am Flughafen Kuusamo zeigte sich im Verlauf beider Messkampagnen zweigeteilt. Während Juni und Juli feuchter waren als üblich, fielen im August und September geringere

Niederschlagsmengen. Im Vergleichszeitraum des Jahres 1999 lagen die Werte somit etwas über dem Durchschnitt, während der in den Spätsommer reichende Gesamtzeitraum ungefähr durchschnittliche Werte aufwies. Da für die Station Kiutaköngäs keine zurückliegenden Daten auf Tagesbasis vorlagen, bot sich der Vergleich der Werte der vollständigen Monate von Juni bis September an. Abweichend von den zuvor beschriebenen Ergebnissen lag die Niederschlagssumme über die vier Monate hinweg an beiden Stationen geringfügig unter den langjährigen Mitteln (Tab. 3). Im Jahr 2000 ließen sich am Flughafen in den Bezugszeiträumen höhere Niederschlagsmengen beobachten als im Mittel des WMO-Zeitraums 1961-1990, obwohl sich der Spätsommer durch unterdurchschnittliche Werte auszeichnete. Am Kiutaköngäs war der Sommer während der Messkampagne hingegen durchgängig trockener als üblich (Tab. 3).

Die ausschließlich am Flughafen in Kuusamo gemessenen Windgeschwindigkeiten wiesen für beide Messkampagnen geringere mittlere Windgeschwindigkeiten auf als im langjährigen Mittel (Tab. 3).

Zusammenfassend ließen sich die Messzeiträume als repräsentativ für die klimatologischen Bedingungen des Untersuchungsraums einordnen. In Bezug auf die Lufttemperatur konnten überdurchschnittliche, jedoch nicht extreme Werte im Vergleich zum Zeitraum 1961-1990 beobachtet werden. Ausgehend von den Monatsmittelwerten der Referenzstation Kuusamo wurden zwischen 1961 und 1990 fünf Zeiträume (Juni-September) mit höheren Temperaturen registriert und 21 mit geringeren Temperaturen.

Auch die Niederschläge während der zwei Messkampagnen entsprachen am Flughafen Kuusamo den üblichen Verhältnissen für den Untersuchungsraum und die Vegetationsperiode. Zwar zeichnete sich der Zeitraum Juni bis September 1999 durch unterdurchschnittliche Niederschläge aus, jedoch sind zwischen 1961 und 1990 insgesamt 14 Vegetationsperioden mit geringeren Niederschlagssummen dokumentiert. Die Niederschlagswerte des überdurchschnittlich feuchten Sommers 2000 wurden in zwölf Jahren des langjährigen Mittels noch übertroffen. Am Kiutaköngäs waren beide Vegetationsperioden durch geringere Werte als im Referenzzeitraum 1967-1990 gekennzeichnet. Da für diesen Standort keine einzelnen langjährigen Monatssummen vorlagen, sind keine weitergehenden Aussagen über die Niederschlagshistorie möglich.

## 4.4 Bestands- und Referenzmessreihen

Für die Erfassung der mikroklimatologischen Unterschiede der in Kapitel 3.2 beschriebenen Versuchsfelder wurden während der zuvor in den längerfristigen Klimakontext eingeordneten Zeiträume eigene Messdaten erhoben. Neben den Standardparametern Lufttemperatur und Niederschlag ermöglichten entsprechende Messwertgeber die Aufnahme der Strahlungsverhältnisse, der Luftfeuchte, der Temperatur in Bodennähe und im Boden sowie der Windverhältnisse (Abb. 19). Die Auswahl der Flächen entsprach dabei den Anforderungen möglichst raumtypischer Areale in relativ geringer Nähe zueinander, um mikroklimatologische Unterschiede herausarbeiten zu können.

### 4.4.1 Strahlung

Die Strahlung stellt einen der wichtigsten abiotischen Faktoren für den Energiehaushalt einer Fläche dar. Insbesondere die Vegetation unterliegt der Wirkung des Strahlungsregimes, und so stellen Absorption, Transmission und Reflexion die fundamentalen Prozesse in Pflanzenbeständen dar (STONER et al. 1978). Die genannten Prozesse üben darüber hinaus einen direkten Einfluss auf Temperatur, Wärmehaushalt, Evapotranspiration sowie die Photosynthese aus (FLEMMING 1994).

Auf den Versuchsfelder wurden die Strahlungskomponenten Globalstrahlung und Strahlungsbilanz gemessen. Die *Globalstrahlung* als Summe der direkten und der diffusen Einstrahlung gilt dabei als Maß für die potenzielle Produktion fühlbarer Wärme und stellt eine der standortbestimmenden bzw. standortdifferenzierenden Größen des Geländeklimas dar (ALEXANDER et al. 1999, BENDIX 2004). Die direkte

Einstrahlung als überregionaler Faktor hängt primär von den Grundlagen der Himmelsmechanik ab. Die Eigenbewegung der Erde um die Sonne in Verbindung mit der Neigung der Erdachse führt zu jahres- und tageszeitlichen Zyklen der Einstrahlung in Abhängigkeit von der Breitenlage. Für die Messungen innerhalb der Vegetationsperiode bedeutete die nördliche Lage des Untersuchungsraums tägliche Einstrahlungszeiträume von über 23 Stunden im Juni, die im Verlauf der Messkampagnen auf etwa 14 Stunden abnahmen (Abb. 30-31). Der diffuse Anteil setzt sich aus der gestreuten Himmelsstrahlung und der vom Untergrund reflektierten Strahlung zusammen und zeichnet sich durch eine besondere Bedeutung für die Beleuchtungsverhältnisse in Waldbeständen aus (SCHAAB 2000, FLEMMING 1994).

Die kurzweilige Einstrahlung wird teilweise von Erdoberfläche und Vegetation reflektiert (Albedo), während bestimmte Wellenlängen absorbiert werden. Die Summe der Strahlungskomponenten ist definiert als *Strahlungsbilanz* oder -saldo und ist maßgeblich für den einleitend beschriebenen Energiehaushalt einer Fläche verantwortlich (vgl. FLEMMING 1994, HÄCKEL 1999). Der Strahlungsbilanz kommt unter vegetationsklimatologischen Gesichtspunkten im borealen Raum eine besondere Bedeutung zu, da hohe nächtliche Ausstrahlungsbedingungen häufig zu Nachtfrösten während der Vegetationsperiode führen (LUNDMARK & HÄLLGREN 1987, GRANBERG et al. 1993, BLENNOW & LINDKVIST 2000). Daneben steht die Strahlungsbilanz in Zusammenhang mit der jahreszeitlichen Ausbildung der Frosthärte von Jungvegetation (CHRISTERSSON 1978).

Im erweiterten Umfeld des Untersuchungsraums existierte keine Wetterstation des finnischen Wetterdienstes, an der Strahlungswerte erhoben wurden. Aus diesem Grund dienten die Messwertgeber der Kahlschlagfläche als Referenz für die Messungen, zumal im direkten Umfeld des Messmasts keine höhere Vegetation vorhanden war. Einschränkungen mussten lediglich durch Horizontüberhöhungen zwischen 1° und 5° in nordöstlicher bzw. nordwestlicher Richtung hingenommen werden, die in den Morgen- und Abendstunden zu einer längeren Abschattung von maximal zwei Stunden führte (Abb. 21).

#### 4.4.1.1 Globalstrahlung

Die Isoplethendiagramme der Abbildungen 30 und 31 fassen die Messungen der *Globalstrahlung* während der Messkampagnen 1999 und 2000 auf Grundlage der Stundenmittelwerte zusammen. Auf allen Flächen zeigte sich im Verlauf des Messzeitraums die astronomisch bedingte Abnahme der Globalstrahlung nach der Sommersonnenwende als Ergebnis der kürzer werdenden Tageslängen. Wiedergegeben ist darüber hinaus die Reduzierung der Einstrahlung während wolkenreicher Wetterlagen, die sich als unsystematische Schwankung der Werte über Stunden oder Tage auf allen Flächen ausdrückte. Überregionale Faktoren, wie der jahreszeitliche Sonnenstand und Wetterlagen, bestimmten das Auftreten von Extremwerten. Die höchsten Tagesmittel traten 1999 zu Beginn der Messkampagne, wenige Tage nach dem Sommersolstitium auf, während im Jahr 2000 die Messungen früher begannen und direkt am 21.6. die höchsten Tageswerte registriert wurden. Neben den überregionalen Faktoren des Strahlungsregimes zeigten Werte der Flächen bestandsabhängige Unterschiede als Folge der Waldvegetation und deren Kronen- bzw. Stammraum. Während die Werte der Kahlschlagfläche, abgesehen von der bewölkungsabhängigen Variabilität, dem astronomischen Sonnenstand folgten (Abb. 30/31 Mitte), waren in den Beständen zusätzliche systematisch, im Tagesgang wiederkehrende Beschattungen zu beobachten. Die Isoplethendiagramme des Altbestands und der Aufforstung zeigen jeweils zwei ausgeprägte Maxima in den Vor- und Nachmittagsstunden, während sich die geringen Werte in den Mittagsstunden mit einer Abschattung der Geber durch den Kronenraum erklären lassen (Abb. 21). Das Muster dieses Tagesgangs war dabei primär abhängig von der Position der Pyranometer. Über die ungestörten Werte der Kahlschlagfläche ließ sich die Schwächung der Einstrahlung bzw. die Transmissionsrate durch den Kronen- und Stammraum ermitteln (VALES & BUNNELL 1988, OTTOSSON-LÖFVENIUS 1993a).

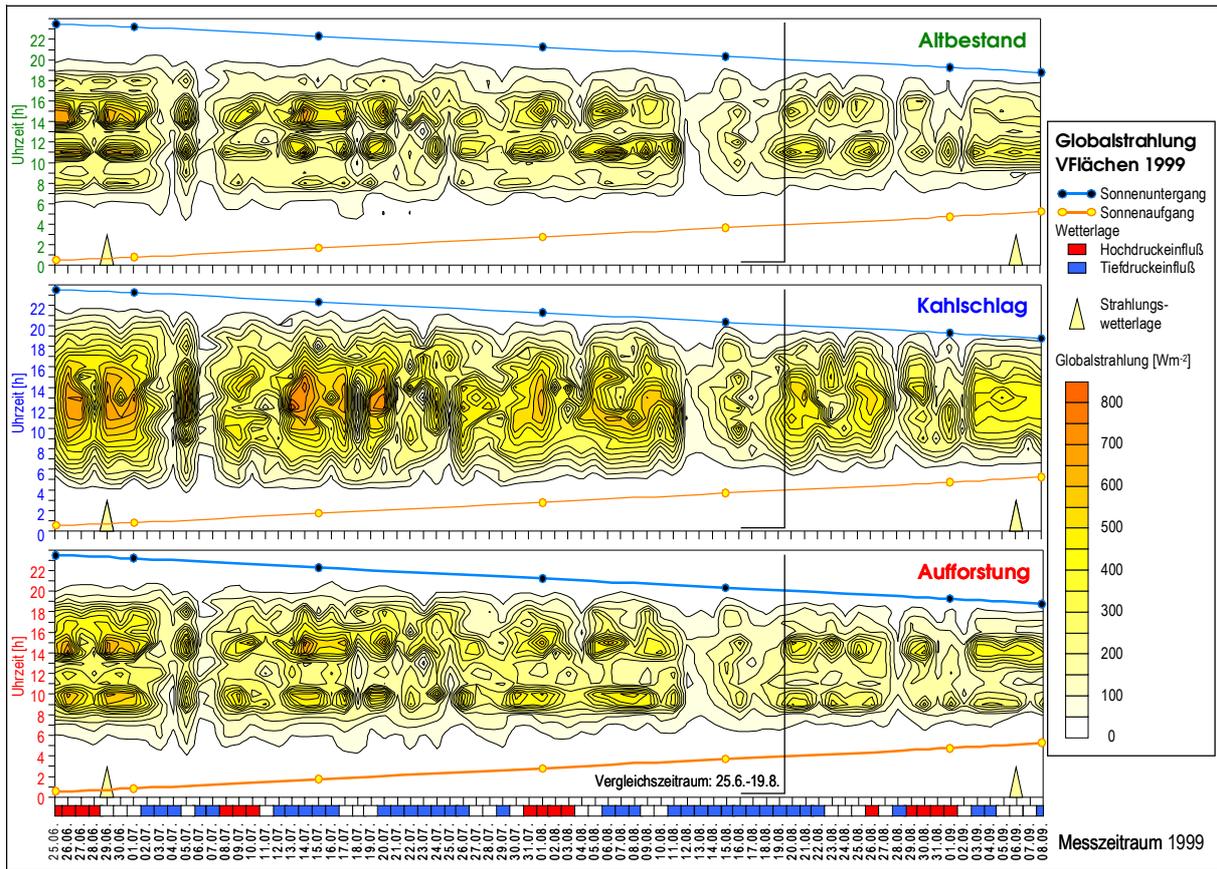


Abb. 30: Stundenmittel der Globalstrahlung auf den Versuchsfächen im gesamten Messzeitraum 1999 (25.6.-8.9.); Tageslängen ohne Berücksichtigung der Horizontüberhöhung

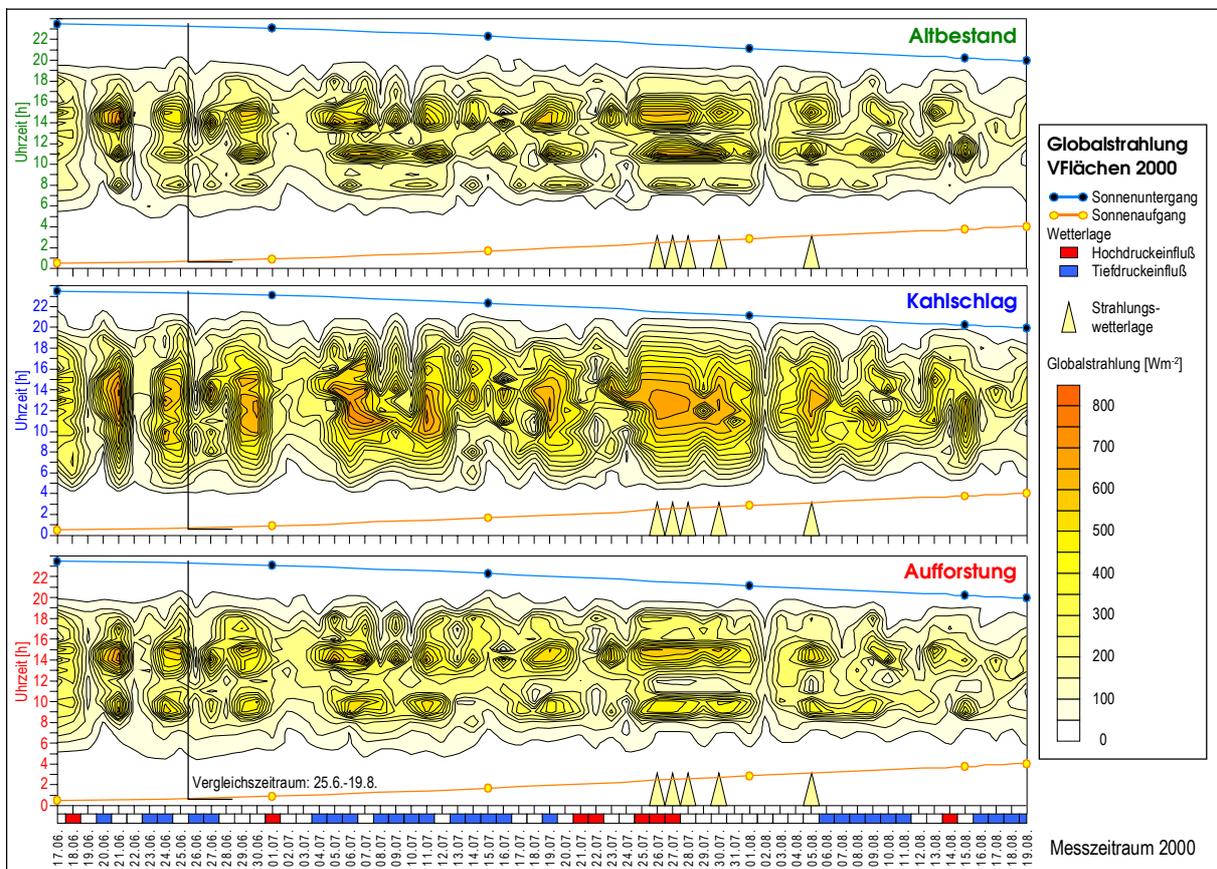


Abb. 31: Stundenmittel der Globalstrahlung auf den Versuchsfächen im gesamten Messzeitraum 2000 (17.6.-19.8.); Tageslängen ohne Berücksichtigung der Horizontüberhöhung

Die Werte der Kahlschlagfläche galten somit als Referenz für die Globalstrahlungswerte »oberhalb« der Bestände. Tabelle 4 fasst die Messwerte für die Bezugszeiträume zusammen.

Tab. 4: Zusammenfassung ausgewählter Werte der Globalstrahlung während der beiden Messkampagnen

Messwerte der Globalstrahlung	Vergleichszeitraum/(Messzeitraum)					
	1999 (25.06.-08.09.)			2000 (17.06.-19.08.)		
	ALT	KAS	AUF	ALT	KAS	AUF
$GS_m$ [ $Wm^{-2}$ ]	105/(96)	180/(168)	128/(117)	104/(104)	177/(176)	118/(119)
$GS\Sigma$ [ $kWhm^{-2}$ ]	141/(176)	242/(306)	172/(213)	140/(160)	238/(270)	158/(183)
$GS_{\text{max}}$ [ $Wm^{-2}$ ]	191/(191)	321/(321)	232/(232)	167/(191)	291/(315)	195/(212)
$GS_{\text{min}}$ [ $Wm^{-2}$ ]	21/(20)	33/(32)	31/(29)	31/(31)	49/(49)	41/(41)
$GS_{\text{max}}$ [ $Wm^{-2}$ ]	911/(911)	1035/(1035)	938/(938)	936/(936)	1084/(1092)	1018/(1018)

Werte der Globalstrahlung ( $GS_m$ ), Globalstrahlungssummen ( $GS\Sigma$ ), höchste und geringste Tagesmittel ( $GS_{\text{max}}$ ;  $GS_{\text{min}}$ ) sowie absolute Maximalwerte ( $GS_{\text{max}}$ )

Für den Standort des Pyranometers im Altbestand ließen sich je nach Bezugszeitraum mittlere Transmissionsraten von 57 bis 60 % ermitteln. Im Aufforstungsbestand war die Reduzierung der Globalstrahlung geringer; hier wurden Transmissionsraten von 70 bis 74 % registriert. Daneben war der Aufforstungsbestand durch höhere Schwankungen der Transmissionsraten über den Zeitraum der Messungen gekennzeichnet (Abb. 32), so lag die Standardabweichung der Tagesmittel im Aufforstungsbestand je nach Bezugszeitraum zwischen 8,7 und 10,8, während sie im Altbestand lediglich Werte zwischen 3,4 und 4,1 annahm. Die Schwankungen der Transmissionsraten waren primär eine Folge der unterschiedlichen Strahlungsbedingungen durch den Einfluss der Bewölkung. An strahlungsreichen Tagen mit einem entsprechend hohen Anteil an direkter Einstrahlung erwies sich die Strahlungsschwächung durch die Kronenräume als besonders effektiv und führte zu geringeren Transmissionsraten, während sich bewölkungsreiche Tage durch vergleichsweise höhere Transmissionsraten auszeichneten (Abb. 32). Die astronomisch bedingt geringer werdenden Sonnenstände im Verlauf der Messkampagnen und die damit verbundene Abnahme der Globalstrahlung führte darüber hinaus zu geringeren Unterschieden zwischen den Beständen.

Die täglichen Einstrahlungszeiträume der unterschiedlichen Flächen wichen nicht in dem Maße voneinander ab, wie es die Ergebnisse der Transmissionsraten vermuten ließen. Bezogen auf die Vergleichszeiträume der zwei Messkampagnen wurden im Altbestand mit durchschnittlich 20,3 h (1999) bzw. 19,8 h (2000) die kürzesten Zeiträume registriert, in denen Globalstrahlung messbar war. Im Aufforstungsbestand registrierte der Geber 1999 lediglich fünf Minuten und im Folgejahr 36 Minuten längere Einstrahlungszeiträume. Selbst auf der Kahlschlagfläche waren die Zeiträume im Durchschnitt nur 29 bzw. 55 Minuten länger.

Das Auftreten der Tageshöchstwerte stand in direktem Zusammenhang mit den scheinbaren Jahres- und Tagesgängen der Sonne, den Wetterbedingungen und der Lage der Messwertgeber innerhalb der Bestände. Die höchsten Werte wurden auf der Kahlschlagfläche entsprechend in zeitlicher Nähe zum Sommer-solstitium an Tagen mit geringer Bewölkung gemessen, an denen sich zum Zeitpunkt des Sonnenhöchststands direkte und durch Wolken reflektierte kurzweilige Einstrahlung addiert. In den Beständen war die temporäre Einstrahlung in den Bodenbereich bzw. in die Messebene der Geber von der Lage der umgebenden Waldvegetation abhängig. Die Tageshöchstwerte des Altbestands erreichten durchschnittlich 83 % und die der Aufforstung 90 % der Werte des Kahlschlags. Die geringeren Maximalwerte waren auf die Beschattung der Geber während der Sonnenhöchststände zurückzuführen (vgl. Abb. 30/31).

Neben den Unterschieden in den Mittel- und Extremwerten wiesen die Messwerte der Bestände, wie bereits beschrieben, deutliche Unterschiede im Tagesgang auf. Die Vegetation der Bestandsflächen führte im Vergleich zur Kahlschlagfläche zu einem langsameren Anstieg der Einstrahlungswerte in den

Morgenstunden und einem früheren bzw. schnelleren Absinken der Werte in den Abendstunden. Im dazwischen liegenden Zeitraum bewirkte die im Umfeld der Messwertgeber stehende Vegetation eine zeitweise, systematisch auftretende Beschattung.

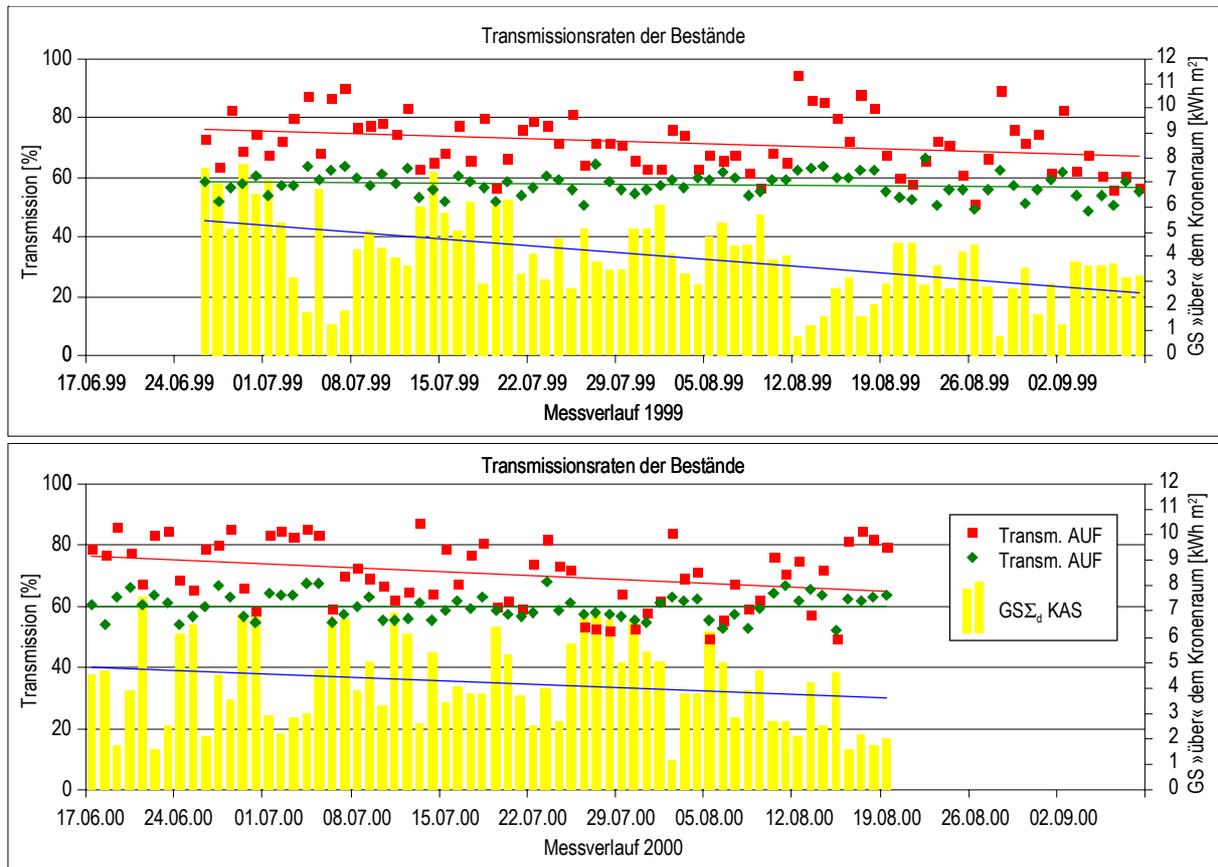


Abb. 32: Transmissionsraten der Bestände während beider Messkampagnen auf Basis der Tagessummen der Globalstrahlung (Angaben als Anteile der Messwerte im Bestand im Vergleich zur Kahlschlagfläche); Übersicht der Tagessummen der Globalstrahlung auf der Kahlschlagfläche

Die Dauer der Einstrahlungs- und Beschattungsphasen änderte sich im Verlauf der Messungen als Folge der jahreszeitlichen Verschiebung der vermeintlichen Sonnenbahn. Im Altbestand waren längere Beschattungen in den Morgen- und Abendstunden zu verzeichnen als auch im Zeitraum höchster Strahlungsintensität während des Zenitdurchgangs der Sonne. In diesen Zeiträumen fielen die Werte im Mittel auf 35 bis 45 % der Einstrahlung auf der Kahlschlagfläche zurück. Im Aufforstungsbestand war vom Vormittag bis in den frühen Nachmittag eine längere Beschattungsphase zu beobachten. Die Wirkung der Abschattung durch Kronenraum und benachbarte Vegetation war hier jedoch etwas geringer, sodass durchschnittlich 43 bis 55 % der Kahlschlagflächenwerte erreicht wurden.

#### Messergebnisse der Globalstrahlung im Kontext früherer Untersuchungen

Die Ergebnisse fügen sich weitgehend ein in das Bild einer relativ geringen Anzahl von vergleichbaren Messungen im borealen Raum. Untersuchungen der Verhältnisse kurzweiliger Einstrahlung in Waldbestände reichen zurück bis in die 40er-Jahre. Beispielsweise haben WELLNER (1948), VÉZINA & PÉCH (1964), ANDERSON (1966) und OKER-BLOM (1986) die Strahlungsbedingungen in Beständen empirisch beschrieben. Später folgten Messungen, die Vergleiche zwischen verschiedenen Waldbeständen oder Freiflächen einbezogen (REIFSNYDER et al. 1971/72, VALES & BUNNELL 1988). Weitere Veröffentlichungen von PERTTU (1970), SLAUGHTER (1983) und OTTOSSON-LÖFVENIUS (1993a, 1993b) setzten sich dann auch mit den Besonderheiten der Strahlungsbedingungen im borealen Raum auseinander.

ODIN & PERTTU (1966) ermittelten für einen im Hinblick auf Bestandsdichte und -höhe nicht näher beschriebenen Fjellwald (*Pinus spec./Betula spec.*) nordwestlich von Gällivare in Schweden (67° 06'N) eine Transmissionsrate von 56 % auf der Basis von Einzelmessungen. Globalstrahlungsmessungen über längere Zeiträume wurden von SLAUGHTER (1983) in Zentralalaska (65° 45'N) auf annähernd der gleichen Breitenlage wie die eigenen Versuchsflächen durchgeführt. In den Jahren 1976 bis 1979 ermittelte er für die vergleichbaren Monate Juli bis August für einen Schwarzfichtenbestand (*Picea mariana*) Transmissionsraten zwischen 37 und 59 %. Die im Vergleich zum Altbestand in Oulanka geringeren Transmissionsraten können dabei im Zusammenhang mit einer geringeren Höhe und einer etwa zehn Prozent höheren Kronenschlussdichte der Flächen in Alaska gesehen werden. Die größere Variabilität der Transmissionsrate dürfte im Zusammenhang mit großen Strahlungsunterschieden im Verlauf von vier Jahren und einer großen Distanz zwischen Bestand und Freifläche stehen, während die 70 km südlichere Lage und der damit verbundene nur etwa ein Grad höhere maximale Sonnenstand als Ursache ausgeschlossen werden kann. Im Rahmen einer Untersuchung der Strahlungskomponenten und der photosynthetisch aktiven Strahlungsanteile haben VALES & BUNNELL (1988) an zwölf Standorten auf Vancouver Island Messungen an strahlungsreichen Tagen durchgeführt. Einer der Standorte entsprach näherungsweise im Hinblick auf Exposition, Neigung und Bestandsdichte dem Altbestand im hier vorgestellten Untersuchungsraum. Die dominante Art waren Douglasien (*Pseudotsuga menziesii*), deren Individuenhabitus der europäischen *Picea abies* nahe kommt. Für einen strahlungsreichen zweitägigen Zeitraum vom 19. bis 20.7.1985 ermittelten die Autoren eine Transmissionsrate von 57 %, dies entsprach dem Wert des Altbestands am Oulanka während einer Strahlungswetterlage vom 26. bis 28.7.2000. Zu berücksichtigen bleibt jedoch die deutlich südlichere Lage von Vancouver-Insel (48° 36'N) und ein damit verbundener etwa 20° höherer maximaler Sonnenstand zum Zeitpunkt der Messungen, sodass bei niedrigerem Sonnenstand mit einer geringeren Rate zu rechnen ist (ANDERSON 1970, HUTCHISON et al. 1980). Durch OTTOSSON-LÖFVENIUS (1993b) wurden Untersuchungen in gänzlich anders strukturierten Wäldern bei Vindeln in Schweden (64° 15'N) durchgeführt. Die Messungen in 20 m hohen, offenen Schutzwäldern (HAGNER 1962) über jeweils zwei Augustwochen der Jahre 1985 und 1986 erbrachten geringere Transmissionsraten im Verhältnis zur Bestandsdichte. Selbst im dichtesten Bestand mit lediglich 138 Stämmen je Hektar lagen die gemessenen Transmissionsraten nur zwischen 53 % an strahlungsreichen Tagen und 64 % an bewölkten Tagen.

### Zusammenfassung der Globalstrahlungsmessungen

Zusammenfassend zeigten die Ergebnisse der Globalstrahlungsmessungen auf den Versuchsflächen in beiden Messreihen reproduzierbare Ergebnisse in Hinblick auf die Strahlungsbedingungen des borealen Raums. Die Messwerte der Kahlschlagfläche und des Altbestands spiegelten Bedingungen wider, wie sie analog in ähnlichen Messungen anderer Untersuchungen festgestellt wurden. Vergleichbare Messungen aus ähnlichen Beständen wie der Aufforstung lagen aus dem borealen Raum nicht vor oder unterschieden sich in der Bestandsart und Zusammensetzung erheblich (vgl. BAUMGARTNER 1952). Davon abgesehen bildeten die Messwerte dieser Fläche jedoch plausible Zusammenhänge zwischen Bestandsstruktur und Strahlungsbedingungen. Tabelle 5 fasst die Einstrahlungsbedingungen der drei Versuchsflächen in generalisierter Form zusammen. Die Abstufung der Symbole entspricht jeweils 0,75 Standardabweichungen der normalisierten Messwerte und wurde auch für alle folgenden generalisierten Tabellen gewählt. Der Strahlungsumsatz im Kronenraum der Bestände führte zu einer Reduzierung der Werte innerhalb der Bestände, wobei die direkte Einstrahlung in höherem Maße reduziert wurde als die diffuse (vgl. auch ANDERSON 1970, VAN EIMERN & HÄCKEL 1984, FLEMMING 1994). Im Verlauf der Messkampagnen wies der dichtere, homogenere aber niedrigere Aufforstungsbestand bei höheren Transmissionsraten größere Schwankungen über die Zeit auf als der Altbestand, was den Schluss nahe legt, dass die diffuse Strahlung besser in den Aufforstungsbestand eindringen konnte als in den Altbestand. Auf allen

Flächen äußerten sich die geringer werdenden Sonnenstände im Verlauf der Messungen durch sinkende Globalstrahlungswerte. In den Beständen führten die flachen Einstrahlungswinkel zu einer Zunahme der beschatteten Flächen durch die umgebende Vegetation. Die Folge war ein Trend zu geringeren Transmissionsraten (Abb. 32), die sich durch die höhere Bestandsdichte auf der Aufforstungsfläche stärker auswirkte als im Altbestand (vgl. auch OTTOSSON-LÖFVENIUS 1993a, b). Mit Abnahme der Sonnenstände und geringeren Tageslängen wurden die Unterschiede in den Tagessummen der Globalstrahlung zwischen den Beständen im Verlauf der Messungen entsprechend kleiner.

Tab. 5: Generalisierte Einstrahlungsbedingungen auf den drei Versuchsfleichen

	Altbestand	Kahlschlag	Aufforstung
Bestandsdichte [Bäume ha <sup>-1</sup> ]	972	152	2588
mittlere Bestandshöhe [m]	7,1	4,7	4,7
mittlerer Kronenschluss [%]	47	9	49
Σ Globalstrahlung (Messebene 2 m)	--	++	-
Transmission direkte Strahlung	--	++	-
Transmission diffuse Strahlung	--	++	+

Die ermittelten Transmissionsraten, die sich nach HALLDIN & GRIP 1979, LEMEUR & ROSENBERG 1979 bzw. PERRIER 1979 als Funktion der »Bestandsdichte«, »-höhe«, »-art« und »Habitus« der Waldvegetation darstellen, zeigten jedoch gleichzeitig die Problematik der repräsentativen Standortauswahl und des Messumfangs. Während sich die Werte des Altbestands in das Bild vorangegangener Untersuchungen einfügten, schienen die höheren Transmissionsraten des Aufforstungsbestands im Widerspruch zu seiner hohen Bestandsdichte zu stehen. Für eine abschließende Bewertung fehlten vergleichbare Messungen aus ähnlichen Jungbeständen im borealen Raum. Es ist zu vermuten, dass die Messwerte der Globalstrahlung im Aufforstungsbestand und die damit verbundenen Transmissionsraten zu hoch und damit nicht repräsentativ für die Fläche waren. Für einen derartigen Messfehler sprach die über dem Messwertgeber erfasste Kronenschlussdichte, die nur etwa 50 % der mittleren Kronenschlussdichte dieser Fläche betrug (Mittel über 30 Niederschlagssammler). Im Altbestand lag der Kronenschluss über dem Pyranometer hingegen bei 66 % des Flächendurchschnitts. Gegen einen hohen Messfehler sprach jedoch eine verminderte Bedeutung der Kronenschlussdichte über dem Geber durch den im Untersuchungsraum geringen Sonnenhöchststand von maximal 47° (Abb. 21). Bei geringerem Sonnenstand steigt die Streuungsrate direkter Einstrahlung, und damit sinkt der Einfluss von Öffnungen im Kronenraum (HUTCHISON & MATT 1976, LINDROTH & PERTTU 1981). Darüber hinaus erreicht ein Großteil der diffusen Strahlung den Boden bzw. den Bestand aus einem Bereich von etwa 10° um die jeweilige Position der Sonne, wodurch die Transmissionsrate in hohem Maße durch Öffnungen im Kronenraum entlang der Sonnenbahn bestimmt wird (HUTCHISON et al. 1980). Vor diesem Hintergrund kann davon ausgegangen werden, dass der direkte Anteil der Globalstrahlung in einer für den Aufforstungsbestand durchschnittlichen Rate durch Beschattungsvorgänge reduziert wurde. Dagegen kam der diffusen Einstrahlung als Folge des geringeren Kronenschlusses über dem Geber eine höhere Bedeutung zu. Durch diesen Zusammenhang waren auch die höheren, wetterlagenabhängigen Schwankungen der Transmissionsraten und ihre stärkere jahreszeitliche Abnahme gegenüber dem Altbestand zu erklären (Abb. 32). Den größten Einfluss hat demnach der Kronen- bzw. Stammraum des umgebenden Bestandes, jedoch steht außer Frage, dass mit einem Messwertgeber je Fläche nur begrenzte Aussagen über den mittleren Strahlungshaushalt möglich sind. Vergleiche von kurzfristigen Ereignissen sind entsprechend mit einem hohen Fehler behaftet, der jedoch mit zunehmender Messdauer geringer wird (REIFSNYDER et al. 1971/1972).

#### 4.4.1.2 Strahlungsbilanz

Die Messungen der *Strahlungsbilanz* sind als Stundenmittelwerte für die drei Versuchsflächen in den Abbildungen 33 und 34 zusammengefasst. Die Isoplethen zeigen die astronomisch bedingte, jahreszeitliche Abnahme der Werte ab der Sommersonnenwende, wie sie in ähnlicher Weise bei den Werten der Globalstrahlung beobachtet werden konnte. Ebenfalls erkennbar ist die wetterlagenabhängige Variabilität der Messwerte im Verlauf der Untersuchungen. Wetterlagen und jahreszeitbedingter Sonnenstand zeigten sich auch verantwortlich für das Auftreten der höchsten bzw. geringsten Tagesmittel (Tab. 6). Entsprechend wurden die höchsten Tagesmittel beider Messkampagnen während wolkenarmer Wetterlagen im Zeitraum um die Sommersonnenwende gemessen, während die geringsten Werte im Spätsommer (August) an Tagen mit hoher Bewölkungsdichte auftraten.

Der Tagesgang der Werte war auf den Flächen durch einen Strahlungsüberschuss während des Tages und ein Defizit in den Nachtstunden geprägt. Mit geringer werdenden Sonnenständen im Verlauf der Messkampagnen nahmen die Zeiträume nächtlicher Ausstrahlung zu, unterlagen dabei jedoch ebenfalls witterungsabhängigen Schwankungen (Abb. 33/34). Im Mittel der Vergleichszeiträume wurden durchschnittlich 6,5 bis 7,0 Stunden negativer Strahlungsbilanz während der Nachtstunden registriert, wobei die Ausstrahlung im Juni täglich sechs bis acht Stunden und im August/September sieben bis zehn Stunden überwog. In Folge der niedrigen Sonnenstände durch die nördliche Breitenlage traten Ausstrahlungszeiträume der o. g. Länge selbst im zeitlichen Umfeld des Sommersolstitiums auf, obwohl zwischen Sonnenuntergang und -aufgang lediglich 60 Minuten lagen.

Die Bilanzunterschiede zwischen den Versuchsflächen waren, ähnlich wie bei den zuvor beschriebenen Werten der Globalstrahlung, durch den Einfluss der Waldvegetation auf den Flächen bzw. durch ihr Fehlen gekennzeichnet. Während sich Beschattungen durch Bewölkung auf allen drei Flächen durch unsystematische Schwankungen äußerten, waren die Einflüsse der umgebenden Vegetation in den Beständen durch ein täglich wiederkehrendes Muster erkennbar.

Die Ähnlichkeit zum Verteilungsmuster der Globalstrahlung bedingt sich in dieser Hinsicht, da diese während des Tages die dominante Komponente der Strahlungsbilanz darstellt (GEIGER 1961). Auf der Kahlschlagfläche war, abgesehen von der geringen östlichen Horizontüberhöhung, keine systematische Beschattung des Strahlungsbilanzgebers zu beobachten.

Der Strahlungsumsatz im Kronen- bzw. Stammraum der Bestandsflächen führte zu reduzierten Bilanzwerten im Vergleich zur Kahlschlagfläche, sodass sich diese durch die höchsten Tagesmittel bzw. -summen auszeichnete. Die Tagesbilanzen der Bestände zeigten ein ähnliches Bild wie die zuvor beschriebenen Transmissionsraten. Im Aufforstungsbestand wurden in der Regel höhere Bilanzwerte in Verbindung mit einer höheren Variabilität gemessen als im Altbestand. Je nach Bezugszeitraum registrierten die Geber im Aufforstungsbestand zwischen 66 und 71 % der Werte der Kahlschlagfläche bei Standardabweichungen zwischen 9,2 und 10,6. Im Altbestand wurden in den Referenzzeiträumen durchschnittlich zwischen 57 und 60 % ( $s = 5,4$  bis  $s = 6,2$ ) der Werte der Kahlschlagfläche gemessen. Die Bilanzsummen der entsprechenden Zeiträume wiesen analoge Verhältnisse auf.

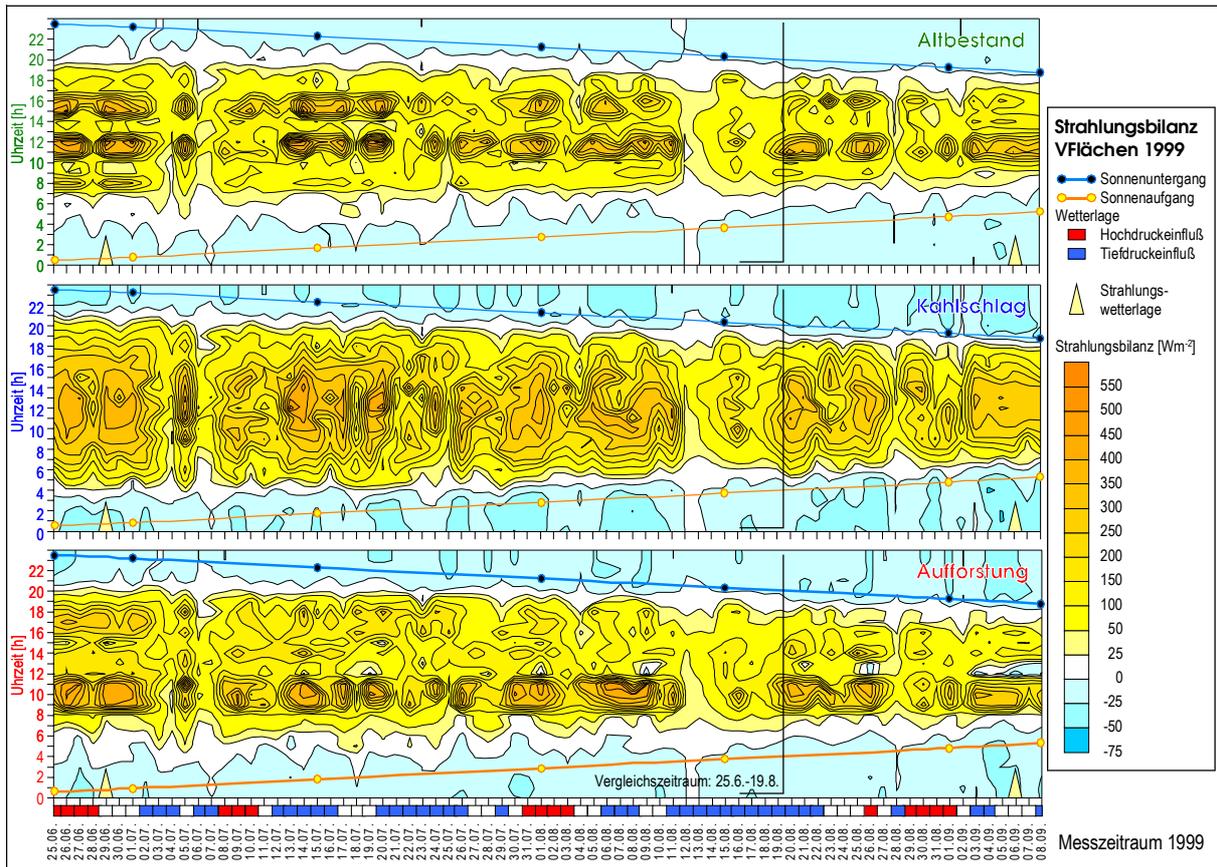


Abb. 33: Stundenmittel der Strahlungsbilanz auf den Versuchsflächen im gesamten Messzeitraum 1999 (25.6.-8.9.); Tageslängen ohne Berücksichtigung der Horizontüberhöhung

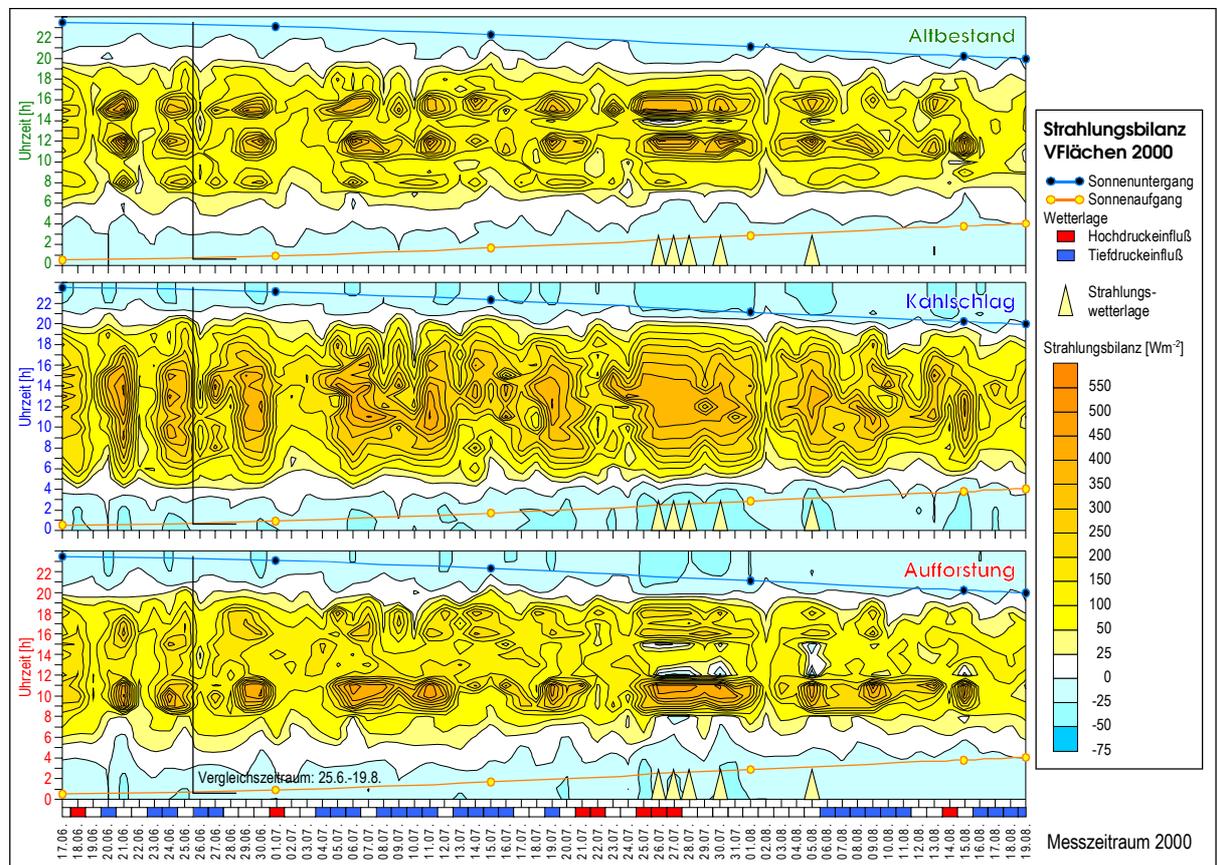


Abb. 34: Stundenmittel der Strahlungsbilanz auf den Versuchsflächen im gesamten Messzeitraum 2000 (17.6.-19.8.); Tageslängen ohne Berücksichtigung der Horizontüberhöhung

Die gegenüber der Globalstrahlung komplexeren Wirkungsbedingungen der Strahlungsbilanz spiegeln sich besonders in den aufgetretenen Extremwerten durch eine höhere Variabilität wider. Zeitpunkte und Beträge der Höchstwerte hingen dabei nicht nur von den bereits beschriebenen Einflussfaktoren des oberen Halbraums ab, sondern auch von den Ausstrahlungskomponenten Albedo und langwellige Rückstrahlung (vgl. auch OTTOSSON-LÖFVENIUS & GRANBERG 1993). Tabelle 6 fasst die Messwerte der Strahlungsbilanz zusammen.

Tab. 6: Zusammenfassung ausgewählter Werte der Strahlungsbilanz während der beiden Messkampagnen

Messwerte der Strahlungsbilanz	Vergleichszeitraum/(Messzeitraum)					
	1999 25.6.-19.8. (25.6.-08.09.)			2000 25.6.-19.8. (17.06.-19.8.)		
	ALT	KAS	AUF	ALT	KAS	AUF
QS'm [Wm <sup>-2</sup> ]	60/(54)	99/(91)	71/(63)	58/(57)	101/(100)	67/(66)
QS'Σ [kWhm <sup>-2</sup> ]	79/(99)	133/(166)	94/(115)	77/(88)	135/(154)	89/(103)
QS'gmax [Wm <sup>-2</sup> ]	114/(114)	177/(177)	126/(126)	105/(123)	172/(185)	115/(131)
QS'gmin [Wm <sup>-2</sup> ]	13/(11)	21/(20)	19/(17)	16/(16)	29/(29)	23/(23)
QS'max [Wm <sup>-2</sup> ]	675/(675)	662/(662)	699/(699)	625/(677)	693/(703)	696/(728)
QS'min [Wm <sup>-2</sup> ]	-53/(-53)	-55/(-60)	-51/(-51)	-33/(-33)	-49/(-49)	-42/(-42)
QSm <sub>Nacht</sub> [Wm <sup>-2</sup> ]	-9/(-11)	-20/(-23)	-12/(-14)	-9/(-9)	-19/(-19)	-12/(-12)
QSm <sub>Tag</sub> [Wm <sup>-2</sup> ]	73/(72)	126/(126)	86/(83)	70/(68)	128/(124)	80/(79)

Mittelwerte der Strahlungsbilanz (QS'm), Strahlungsbilanzsummen (QS'Σ), höchste und geringste aufgetretene Tagesmittel (QS'gmax; QS'gmin), registrierte Maximal- und Minimalwerte (QS'max; QS'min) jeweils unter Berücksichtigung des Auftretens von »Sonnenflecken« (QS'min); mittlere Strahlungsbilanzen von Nacht (QSm<sub>Nacht</sub>) und Tag (QSm<sub>Tag</sub>) auf Grundlage von Stundenwerten zwischen Sonnenauf- und Sonnenuntergang

Zwar war eine direkte Messung des Ausstrahlungsanteils mit dem kombinierten Strahlungsbilanzgeber nicht möglich, jedoch ließ sich seine Wirkung indirekt im Verlauf unterschiedlicher Wetterlagen beobachten. An Tagen mit geschlossener Bewölkung und entsprechend geringem Anteil an direkter Einstrahlung wurden höhere Extremwerte auf der Kahlschlagfläche registriert als in den Beständen. Im Gegensatz dazu blieben die Maximalwerte der Kahlschlagfläche im Verlauf von Strahlungswetterlagen unter denen der Bestände. Ursache war die höhere Albedo des Kahlschlags in Folge der spärlichen Vegetationsdecke (vgl. Kap. 3.2.2), was sich durch Messungen mit mobilen Geräten vor Ort bestätigte (vgl. OTTOSSON-LÖFVENIUS & GRANBERG 1993). Ausnahmen bildeten dagegen Zeiträume, in denen das in Kapitel 3.1.2 beschriebene Phänomen der »Sonnenflecken« in den Beständen wirksam wurde.

Ebenso indirekt wie der Hinweis auf die größere Albedo der Kahlschlagfläche, ließ sich der Einfluss der höheren langwelligen Ausstrahlung über die Messwerte der Strahlungsbilanz ableiten. Gegenüber den Beständen kam es auf der Kahlschlagfläche nach Sonnenuntergang zu einem schnelleren Absinken der Bilanzwerte in den negativen Bereich, was auf eine höhere langwellige Ausstrahlung hindeutet. Dabei ist jedoch zu berücksichtigen, dass der Bilanzgeber der Kahlschlagfläche und die der Bestände unterschiedliche Strahlungsbedingungen erfassen. Der Oberboden des Kahlschlags stellt eine »Strahlungsumsatzfläche« dar, während der Kronenraum der Bestände als »Strahlungsumsatzvolumen« anzusehen ist. Letzteres bewirkt für die Ebene der Strahlungsbilanzgeber (2 m) eine Reduzierung der Einstrahlung und damit einen geringeren Strahlungsumsatz am Boden mit der Folge einer geringeren langwelligen Ausstrahlung aus dem unteren Halbraum des Strahlungsbilanzgebers (vgl. auch FLEMMING 1994). Gegenüber der Kahlschlagfläche erfolgt darüber hinaus eine zusätzliche langwellige Einstrahlung aus dem Kronenraum durch den dortigen Wärmeumsatz, was zu einer Anhebung der Bilanzwerte führt (GRANBERG et al. 1993). Die Wirksamkeit dieses Effektes wurde bereits in der Borealis am Beispiel von Schutzwäldern untersucht (OTTOSSON-LÖFVENIUS & GRANBERG 1993, LANGVALL & ÖRLANDER 2001).

Gemeinsames Merkmal aller Flächen war das Auftreten absoluter Maximalwerte im Verlauf von Tagen, an denen zum Sonnenhöchststand vereinzelt Bewölkung auftrat, sodass zur direkten Einstrahlung zusätzlich gestreute und reflektierte Strahlungsanteile die Bilanz anhoben.

Neben den Divergenzen in den Tagesmittel- und Höchstwerten ließen sich auf der Basis der durchschnittlichen Stunden- bzw. 10-Minuten-Mittelwerte deutliche Unterschiede der Strahlungsbilanzen im Tagesgang der drei Flächen beobachten. Nach der Phase nächtlicher Ausstrahlung wechselten die Bilanzwerte der drei Flächen in den Morgenstunden annähernd zeitgleich in den positiven Bereich. Der geringe Sonnenstand und die damit verbundene wirksame Horizontüberhöhung der Waldvegetation in den Beständen führte hier zu einem geringeren Anstieg der Werte im Vergleich zur Kahlschlagfläche. Dort war eine gleichmäßige Zunahme bis zum Zenit in den Mittagsstunden zu verzeichnen, während in den Beständen der bereits beschriebene Wechsel von Einstrahlungs- und Beschattungsphasen einsetzte. In den Vormittagsstunden kam es, einstrahlungsreiche Wetterbedingungen vorausgesetzt, zu längeren Phasen direkter Einstrahlung in beide Bestände, in denen auch die höchsten Werte des Tages gemessen wurden (Abb. 33/34). Im weiteren Verlauf des Tages folgte ebenfalls in beiden Beständen ein Zeitraum mit häufigen Wechseln zwischen Einstrahlungs- und Beschattungszeiträumen. Am späten Nachmittag erlaubten offene Räume im Kronenraum des Altbestands eine weitere Einstrahlungsphase, während gleiches im Aufforstungsbestand zum Ende des Tages zu beobachten war (Abb. 33/34). Der Wechsel der Werte in den negativen Bereich erfolgte in den Beständen etwas früher als auf der Kahlschlagfläche, war jedoch durch ein langsames Absinken gekennzeichnet. Im Mittel unterschieden sich die Flächen in der Dauer ihrer nächtlichen Ausstrahlungsphase um lediglich 18 Minuten.

In den Nachtstunden konnte analog zu früheren Untersuchungen die Reduzierung der langwelligen Ausstrahlung in den Beständen gegenüber der Kahlschlagfläche beobachtet werden (vgl. auch PERTTU 1970, HOLBO et al. 1987). Durchschnittlich wurden in den »Nachtstunden« (Sonnenstand  $< 0^\circ$ ) im Altbestand je nach Referenzzeitraum zwischen 45 und 49 % und im Aufforstungsbestand zwischen 60 und 64 % der Ausstrahlungswerte der Kahlschlagfläche beobachtet. Auch die nächtlichen Ausstrahlungswerte unterlagen dabei einer wetterlagenabhängigen Variation, die sich auf der Kahlschlagfläche am deutlichsten auswirkte. Entsprechend wurden hier je nach Bezugszeitraum Standardabweichungen zwischen 12,5 und 13,6 ermittelt, während im Altbestand die geringsten Schwankungen ( $s = 5,9$  bis  $s = 6,3$ ) auftraten. Ähnlich wie bei den Einstrahlungswerten des Tages unterlagen die Werte der Strahlungsbilanz im Aufforstungsbestand höheren Schwankungen ( $s = 8,3$  bis  $s = 8,6$ ). Die höchsten nächtlichen Ausstrahlungswerte auf sämtlichen Flächen traten während wolkenloser, fast windstillen Nächte auf und waren teilweise mit Bodenfrösten verbunden, während unter geschlossenen Wolkendecken geringere Strahlungsverluste verzeichnet wurden.

#### Messergebnisse zur Strahlungsbilanz im Kontext früherer Untersuchungen

Der Zusammenhang zwischen nächtlicher Ausstrahlung und bodennaher Temperatur rückte die Strahlungsbilanz bereits zuvor in den Mittelpunkt einer Vielzahl von Untersuchungen. Wie eingangs beschrieben, gilt die sommerliche Bodenfrostdgefahr im borealen Raum als eines der größeren Probleme der Forstwirtschaft (McCAUGHEY 1985, LUNDMARK & HÄLLGREN 1987, GRANBERG et al. 1993). STONER et al. (1978) überprüften theoretische Ansätze zur Gesamtbilanz eines Bestandes mit praktischen Messungen, während TAJCHMAN (1972), McCAUGHEY (1981 u. 1985) und LAFLEUR et al. (1993) Vergleiche von Gesamtbilanzen einzelner Bestände und Freiflächen durchführten. Durch Erfassung der Bilanzwerte über dem Kronenraum wiesen obige Untersuchungen andere Forschungsschwerpunkte auf als die hier vorliegende Arbeit. Daneben wurden theoretische Ansätze zur Strahlungsbilanz sowohl homogener (KNYAZIKHIN et al. 1994, KUCHARIK et al. 1999) als auch inhomogener Bestände vorgestellt (COURBAUD et al. 2003). Die Einordnung der eigenen Messergebnisse in den Kontext vergleichbarer

Geländemessungen gestaltete sich somit problematisch, da nur wenige Veröffentlichungen die Besonderheiten des borealen Raums berücksichtigen. Der Vergleich verschiedener Bestände und Freiflächen durch PERTTU (1970) basierte auf wenigen Einzelmessungen, darüber hinaus wurden, wie in Kapitel 4.4.1.1 angedeutet, keine genauen Angaben zu den Beständen dokumentiert. Für den Fjellwald in Nordschweden wurden während des Tages Strahlungsbilanzen registriert, die etwa 50 % der Werte der Freifläche betragen. Die nächtliche Ausstrahlung lag im Durchschnitt bei 46 % der bestandslosen Fläche, wobei die Werte zwischen lichten Bereichen (67 %) und Punkten in direkter Stammnähe (25 %) variierten. Das Verhältnis von Transmissionsrate zu nächtlicher Ausstrahlung entsprach dabei den Werten des Altbestandes im eigenen Untersuchungsraum. Weitere nächtliche Messungen führte PERTTU (1970) an zwei Standorten etwa 25 km südlich von Stockholm durch (59° 20'N). Der lichtere Bestand (*Pinus spec./Picea spec.*) entsprach im Hinblick auf seine Dichte etwa dem zuvor beschriebenen Fjellwald, war allerdings höher. Genauere Angaben zum Bestand fehlten jedoch. Die Emissionsrate entsprach etwa 65 % einer nahe gelegenen Freifläche, während ein etwas dichterer Mischwald eine Rate von 44 % aufwies. Umfangreiche Messungen zur Strahlungsbilanz wurden von OTTOSSON-LÖFVENIUS (1993b, c) bzw. GRANBERG et al. (1993) in Schutzwaldflächen bei Vindeln in Schweden (64° 15'N) durchgeführt. Die geringe Bestandsdichte und große Höhe der Schutzwaldflächen führten entsprechend zu abweichenden Ergebnissen. In einem dreiwöchigen Zeitraum von Juni bis Juli 1987 wurden mit je 22 Messwertgebern die Bilanzverhältnisse im Schutzwald und einer benachbarten Kahlschlagfläche untersucht, wobei ebenfalls eine hohe wetterlagenbedingte Variabilität der nächtlichen Ausstrahlung registriert wurde. Ähnlich den Ergebnissen der hier vorgestellten Arbeit traten im Verlauf bewölkter Nächte geringe bzw. keine Unterschiede zwischen den verschiedenen Flächen auf. In klaren aber windigen Nächten wurden höhere Ausstrahlungswerte auf der dortigen Kahlschlagfläche gemessen, dagegen registrierten die Geber bei Vindeln in klaren, annähernd windstillen Nächten höhere Ausstrahlungswerte im Schutzwald. GRANBERG et al. (1993) führten die Ergebnisse auf aerodynamische Effekte in Folge konvektiven Wärmetransfers zurück, wie sie auch von YERG (1990) beobachtet wurden. Vergleichbare Zusammenhänge zwischen nächtlicher Ausstrahlung und Windbewegungen konnten in den dichteren Beständen des Untersuchungsraums am Oulanka-Nationalpark nicht festgestellt werden. Hier waren die Ausstrahlungswerte der Kahlschlagfläche in klaren Nächten unabhängig von den Windverhältnissen durchgängig höher als in den Beständen.

#### Zusammenfassung der Strahlungsbilanzmessungen

Zusammenfassend ergaben die Strahlungsbilanzmessungen der zwei Messkampagnen reproduzierbare Ergebnisse, welche einerseits die besonderen astronomischen Bedingungen des borealen Raums und andererseits die vegetationsabhängigen Wirkungsgefüge der Standorte wiedergaben. Die geringen Sonnenstände führten trotz langer Tage mit Einstrahlungszeiten von annähernd 23 Stunden während des Sommersolstitiums zu über sechs Stunden dauernder Phasen, in denen die Ausstrahlung überwog. Die Bilanzwerte unterlagen dabei einer hohen wetterlagenabhängigen Variabilität. Die Messergebnisse gaben das Wirkungsgefüge der Strahlungsbilanz sowohl auf der Kahlschlagfläche als auch in den Beständen wieder und bestätigten sowohl allgemein gültige Beschreibungen (vgl. GEIGER 1961, FLEMMING 1994), als auch frühere Messergebnisse aus dem borealen Raum (vgl. PERTTU 1970, OTTOSSON-LÖFVENIUS 1993c). Das primäre Unterscheidungsmerkmal der drei Flächen im Hinblick auf die Strahlungsbilanz war der Einfluss der Waldvegetation bzw. ihr Fehlen auf der Kahlschlagfläche. Der Kronenraum der Bestände bewirkte sowohl eine Reduzierung der Einstrahlung während des Tages als auch eine geringere Ausstrahlung in den Nachtstunden, entsprechend unterlagen die Tagesmittel der Kahlschlagfläche einer höheren wetterlagenbedingten Variabilität. Die Strahlungsbilanzwerte korrelierten prinzipbedingt mit den Globalstrahlungswerten, allerdings führte die höhere Albedo der Kahlschlagfläche zu nicht ganz so ausgeprägt höheren Tagesmittelwerten im Vergleich zu den Beständen. Der Vergleich der Bestände untereinander fügte sich ebenfalls in das bereits beschriebene Bild der Globalstrahlungswerte

ein. Der dichtere, aber weniger hohe Aufforstungsbestand wies gegenüber dem Altbestand höhere und variabelere Werte auf, sowohl im Hinblick auf die positiven Bilanzwerte des Tages als auch für die nächtlichen Ausstrahlungswerte. Tabelle 7 fasst die Strahlungsbilanzverhältnisse der drei Versuchsflächen generalisiert zusammen.

Analog zu den Messungen der Globalstrahlung stellte sich das Problem einer repräsentativen Standortauswahl und des Messumfangs. Die Kronenschlussdichte über den Bilanzgebern beider Flächen war geringfügig höher als über den Globalstrahlungsgebern, allerdings lag sie ebenfalls unterhalb des Mittelwerts der Flächen (Mittelwert über 30 Niederschlagssammler). Während sich die Bedeutung der Öffnungsgröße direkt über dem Geber in Bezug zur Einstrahlung relativierte (vgl. Kap. 4.4.1.1), ist wahrscheinlich mit einem größeren Fehler bei der Messung der langwelligen Ausstrahlung des Bodens zu rechnen, da diese senkrecht von der Bodenoberfläche bzw. parallel von der Stammoberfläche ausgeht (FLEMMING 1994).

Tab. 7: Generalisierte Strahlungsbilanzverhältnisse auf den drei Versuchsflächen

	Altbestand	Kahlschlag	Aufforstung
Bestandsdichte [Bäume ha <sup>-1</sup> ]	972	152	2588
mittlere Bestandshöhe [m]	7,1	4,7	4,7
mittlerer Kronenschluss [%]	47	9	49
Strahlungsbilanz (Messebene 2 m)	--	++	-
nächtliche Strahlungsbilanz	++	--	+

#### 4.4.2 Temperaturen

Die Temperaturbedingungen stellen in der borealen Landschaftszone eine der Determinanten für die Vegetationsprozesse und damit das Waldwachstum dar (MacIVER 1986, KUBIN & KEMPPAINEN 1991, 1994). Wenn auch nicht als einziger, so doch als primärer Faktor bestimmt der Temperaturhaushalt sowohl die polare als auch die alpine Waldgrenze (HOLTMEIER 1985). Als Maß für die meisten Vegetationsprozesse dient die Temperatursumme über 5 °C und die daraus resultierende Vegetationsperiode (SARVAS 1970, TVEITO 2001).

Im Zusammenhang mit der forstwirtschaftlichen Nutzung des borealen Raums stellen die Temperaturbedingungen eine große Herausforderung für jede Form von Waldregenerationsmaßnahmen dar (KUBIN & KEMPPAINEN 1991). Dabei sind geringe Temperaturen während der Vegetationsperiode neben Wasser- und Nährstoffmangel der wesentliche limitierende Faktor (LINDKVIST & CHEN 1997). Die große Bedeutung der Temperaturen zeigt sich in der Vielzahl der Untersuchungen, die bis in das 19. Jahrhundert zurückreichen. Bereits KIHLMAN (1893), HOMÉN (1896), KERÄNEN (1920) und LUKKALA (1946) führten Bodentemperaturmessungen in Waldbeständen und auf Freiflächen durch. KAUTTU (1952) und YLI-VAKKURI (1963) erweiterten die Messungen um Lufttemperaturen in Beständen, und VAARTAJA (1954) analysierte Erdoberflächentemperaturen in Waldarealen. In der Folgezeit rückten die forstwirtschaftlichen Regenerationsprobleme von Kahlschlägen immer stärker in den Mittelpunkt der Untersuchungen. Besonders die Wirkungen der im borealen bzw. subarktischen Raum häufig auftretenden Nachtfroste und ihre Wirkungen auf die Vegetation wurden eingehender beleuchtet (EICHE 1966, LEIKOLA & PYLKKÖ 1969, SWANSON 1986). Die umfangreichsten Messungen zur Regenerationsproblematik führten vermutlich TOLVANEN & KUBIN (1990) und KUBIN & KEMPPAINEN (1991) unter Berücksichtigung der Luft-, Erdoberflächen- und Bodentemperaturen durch. Ein weiterer Schwerpunkt von Temperaturmessungen war die Validierung von Untersuchungen, die das Ziel hatten, die zuvor genannten Nachtfroste zu reduzieren. Dabei wurden einerseits die Folgen von Bodenmeliorationsmaßnahmen untersucht (TOLVANEN & KUBIN 1990, KUBIN & KEMPPAINEN 1994,

LANGVALL et al. 2001) und andererseits die Frost reduzierende Wirkung von Schutzwäldern verifiziert (HAGNER 1962, OTTOSSON-LÖFVENIUS 1987, LANGVALL & ÖRLANDER 2001).

Auf den Versuchsflächen der hier vorliegenden Untersuchung wurden neben den Lufttemperaturen (+2 m) die Werte der Erdoberflächen- bzw. bodennahen Temperaturen (+0,05 m) und die der Bodentemperaturen (-0,05 m) registriert (vgl. Kap. 3.1.1). Die Lufttemperaturen ermöglichten als meteorologischer Standardparameter über die Differenzierung der Versuchsflächen hinaus einen Vergleich mit den Werten der FMI-Wetterstationen Kuusamo Flughafen (Kuusamo-Lentoasema; KL) und Kuusamo-Kiutaköngäs (KK). Wie einleitend beschrieben, stellen geringe Temperaturen während der Wachstumsphase einen limitierenden Parameter für die Vegetation dar. Das Auftreten von Nachtfrösten in den Sommermonaten gilt unter vielen Autoren als einer der wichtigsten Faktoren für die Vegetationsverteilung und -sterblichkeit in kalten Klimaten, da die Pflanzen in diesen Zeiträumen nur eine minimale Frosthärte ausbilden (LI & SAKAI 1981, SAKAI & LARCHER 1987, LINDKVIST & CHEN 1997). Für europäische Nadelbaumbestände ohne ausgebildete Frosthärte wurden Schwellenwerte von -3 bis -4 °C für das Auftreten sichtbarer Frostschäden ermittelt (GLERUM 1985, CHRISTERSSON & von FIRCKS 1988, LANGVALL et al. 2001). Ein derartiges Phänomen konnte beispielweise im Sommer 1984 in Teilen Finnlands beobachtet werden, als nach einer Phase hoher Temperaturen und weit fortgeschrittener Vegetationsentwicklung Fröste auftraten und es großflächig zu Bestandsschädigungen kam (RAITIO 2000). Von besonderer Bedeutung sind ferner die Dauer der Frosteinwirkung, da die Gewebetemperaturen auf das genannte Maß zurückfallen müssen, und die Geschwindigkeit der Abkühlungsphase (ANDERSSON 1968, BURKE et al. 1976, LEVITT 1980). Hohe Abkühlungsraten von 4 K h<sup>-1</sup> bis 6 K h<sup>-1</sup> können die Bildung von Eiskristallen im Zellsystem der Pflanzen bewirken, die für die Schädigung der Pflanzen verantwortlich sind (ASAHINA 1956, CHRISTERSSON 1971). Auch bei weniger strengen Frostwerten können physiologische Schäden am Photosynthese-System nachgewiesen werden, die jedoch in der Regel nicht sichtbar sind (LUNDMARK & HÄLLGREN 1987, ÖRLANDER 1993, BINDER & FIELDER 1996a, 1996b).

Für die ebenfalls gemessenen Erdoberflächentemperaturen gelten die genannten Phänomene gleichermaßen, jedoch sind die Effekte besonders für Jungbestände aufgrund ihrer geringeren Höhe stärker ausgeprägt (BERGMAN 1968, STRAND & LUNDMARK 1987). Nachtfröste sind häufig mit windstillen Wetterlagen verbunden, in denen die kühlere Luft in Bodennähe zu finden ist, sodass hier die geringsten Temperaturen gemessen werden (LEIKOLA & PYLKKÖ 1969, KUBIN & KEMPPAINEN 1991, OTTOSSON-LÖFVENIUS 1993b).

Ein in den Sommermonaten seltener anzutreffendes, jedoch nicht minder relevantes Problem stellen Frostwerte im Boden dar. In früheren Untersuchungen konnte nachgewiesen werden, dass Kältestress analoge Erscheinungsformen zur Trockenheit erzeugen (TRANQUILLINI 1979, FUCHINOUE 1982, LINDKVIST & CHEN 1997). Werte unterhalb von 0 °C führten in *Pinus*-Beständen zu Frostverletzungen im Wurzelbereich mit der Folge von Trockenerscheinungen und einem Aussetzen des Wurzelwachstums (KULLMAN & HÖGBERG 1989, VENN & SOLHEIM 1990).

#### 4.4.2.1 Lufttemperaturen

Ausgangspunkt des Vergleichs der in zwei Meter Höhe gemessenen Lufttemperaturen zwischen den Versuchsflächen und den Referenzstationen des FMI war die Kahlschlagfläche, deren Messumfeld den Bedingungen einer genormten Wetterstationen ähnlich war. Die Messwerte offenbarten in der Regel geringe Unterschiede zwischen den Standorten. Je nach Bezugszeitraum lagen die Differenzen zwischen höchstem und geringstem Mittelwert zwischen 0,6 bis 0,7 K. Der Verlauf der Tagesmittelwerte und der Temperatursummen der Kahlschlagfläche zeigte größere Analogien zu den Werten der etwa gleich hoch gelegenen Station des Flughafens Kuusamo als zu denen der 136 m tiefer gelegenen Station Kiutaköngäs.

Wie in den Sommermonaten üblich registrierte die Wetterstation in der Tallage des Oulankajoki höhere Durchschnittstemperaturen als im Hochland (vgl. KOUTANIEMI 1983, TOLVANEN & KUBIN 1990). Darüber hinaus traten hier in der Mehrzahl der Tage die größeren Tagesamplituden auf. Die gemessenen Extremwerte zeigten zwar ein weniger einheitliches, in hohem Maße wetterlagenabhängiges Bild, jedoch wurden im Verlauf der Messungen die jeweils höchsten und die geringsten Lufttemperaturen ebenfalls am Kiutaköngäs registriert (Tab. 8).

Tab. 8: Zusammenfassung ausgewählter Mittel- und Extremwerte der Lufttemperatur der Versuchsflächen und der Stationen Kuusamo Lentoasema (KL) und Kuusamo Kiutaköngäs (KK) für die Vergleichs- und Messzeiträume der beiden Messkampagnen

Messwerte der Lufttemperatur	Vergleichszeitraum/(Messzeitraum)									
	1999 (25.06.-08.09.)					2000 (17.06.-19.08.)				
	ALT	KAS	AUF	KL	KK	ALT	KAS	AUF	KL	KK
LT <sub>m</sub> [°C]	13,9/(13,0)	13,7/(12,8)	13,7/(12,8)	13,7/(12,8)	14,4/(13,4)	14,8/(14,3)	14,4/(13,9)	14,4/(14,0)	14,6/(14,2)	15,0/(14,6)
LT <sub>d</sub> max [°C]	22,3/(22,3)	22,2/(22,2)	22,6/(22,6)	21,4/(21,4)	22,7/(22,7)	24,5/(24,5)	24,2/(24,2)	24,6/(24,6)	23,3/(23,3)	24,6/(24,6)
LT <sub>d</sub> min [°C]	6,9/(6,9)	6,2/(6,2)	6,7/(6,0)	7,5/(7,0)	7,7/(5,6)	9,2/(5,5)	8,3/(4,8)	8,4/(5,2)	8,7/(5,5)	9,0/(6,5)
ΔLT <sub>d</sub> [K]	10,1/(10,1)	9,2/(9,2)	12,2/(12,3)	9,3/(9,5)	10,4/(10,8)	10,5/(10,4)	9,3/(9,2)	13,3/(13,1)	8,5/(8,5)	10,5/(10,4)
ΔLT <sub>d</sub> max [K]	15,9/(15,9)	14,3/(14,3)	20,5/(20,5)	16,9/(16,9)	18,8/(18,8)	17,9/(17,9)	17,4/(17,4)	22,2/(22,2)	17,3/(17,3)	19,8/(19,8)
ΔLT <sub>d</sub> min [K]	2,6/(2,6)	2,2/(2,2)	3,0/(3,0)	2,6/(2,6)	2,0/(2,0)	2,7/(2,7)	2,6/(2,6)	3,3/(3,3)	2,2/(2,2)	1,9/(1,9)
LTmax [°C]	29,7/(29,7)	27,8/(27,8)	30,1/(30,1)	27,5/(27,5)	28,1/(28,1)	32,4/(32,4)	30,6/(30,6)	33,7/(33,7)	29,3/(29,3)	31,0/(31,0)
LTmin [°C]	2,7/(1,3)	2,5/(1,3)	0,0/(-1,3)	-0,4/(-0,6)	-0,8/(-1,4)	2,9/(1,4)	2,9/(1,1)	-0,4/(-1,0)	2,9/(2,9)	0,3/(0,3)
# LT Frosttage	0/(0)	0/(0)	1/(7)	2/(6)	2/(8)	0/(0)	0/(0)	1/(3)	0/(1)	0/(1)
# LTmin < 5 °C	13/(22)	12/(21)	15/(26)	9/(18)	10/(19)	3/(5)	2/(4)	8/(11)	5/(8)	7/(10)
# LTmax ≥ 25 °C	8/(8)	8/(8)	11/(11)	5/(5)	8/(8)	9/(9)	7/(7)	14/(14)	4/(4)	8/(8)
# LTmax ≥ 30 °C	0/(0)	0/(0)	1/(1)	0/(0)	0/(0)	2/(2)	1/(1)	2/(2)	0/(0)	1/(1)

Mittelwerte, höchste und geringste Tagesmittel (LT<sub>m</sub>; LT<sub>d</sub>max; LT<sub>d</sub>min), mittlere, höchste und geringste Tagesamplituden (ΔLT<sub>d</sub>; ΔLT<sub>d</sub>max; ΔLT<sub>d</sub>min), aufgetretene Extremwerte (LTmax; LTmin) und Anzahl verschiedener meteorologisch bedeutsamer Ereignisse im Vergleichs- und im Messzeitraum (in Klammern)

Zwischen der Station Kiutaköngäs und den Versuchsflächen wurde im Vergleichszeitraum des Jahres 1999 ein Temperaturgradient von -0,54 K je 100 m registriert, der im Verbund mit geringeren Durchschnittstemperaturen etwas deutlicher ausgeprägt war als im Jahr 2000 mit -0,49 K je 100 m. Ein Vergleich der beiden Referenzstationen untereinander offenbarte mit -0,68 K bzw. -0,41 K je 100 m etwas größere Unterschiede zwischen beiden Messjahren. Der höhere Gradient des Vergleichszeitraums 1999 basierte hier auf großen Temperaturunterschieden zwischen dem Untersuchungsgebiet und dem Flughafen Kuusamo während einer Hochdrucklage im Juli (vgl. Kap. 4.3.1) und deutet auf einen relativ großen distanzabhängigen Fehler hin. Gemeinsames Merkmal beider Messkampagnen waren die höheren Beträge als die -0,22 bzw. -0,20 K je 100 m der langjährigen Mittel 1967-1980 bzw. 1967-1990 (KOUTANIEMI 1983, FMI 1991). Damit deuten die Messwerte der Messkampagnen und die langjährigen Mittel auf Werte hin, die im unteren Bereich der Spanne des geometrischen Temperaturgradienten zwischen -0,5 und -0,8 K je 100 m liegen (HUOVILA 1970, WEISCHET 1991). Auch KUBIN & KEMPPAINEN (1991) ermittelten in ihren Untersuchungen nahe Kajaani, etwa 250 km südsüdwestlich des Untersuchungsraums geringere Werte. Analysen jüngerer Datums, welche die jahreszeitlichen Besonderheiten stärker berücksichtigen, geben für die Monate Juni bis September Werte zwischen -0,52 und -0,58 K je 100 m (MACHENHAUER et al. 1998) bzw. -0,61 und -0,63 K je 100 m (TVEITO et al. 2000) an und unterstützen die These.

Die Unterschiede zwischen den drei Versuchsflächen waren ebenfalls gering und erreichten kaum die Messgenauigkeit der eingesetzten Geber. Unter dem Vorbehalt dieser geringen Differenzen lag das Temperaturniveau im Altbestand je nach Bezugszeitraum zwischen 0,2 K und 0,4 K über den nahezu identischen Werten der beiden anderen Flächen (Tab. 8). Die während der Messungen angefallenen Temperatursummen zeigten ebenfalls die geringen Unterschiede zwischen den Flächen. Am Ende der 75 Tage

währenden Messkampagne 1999 betrug die Differenz zwischen höchster und geringster Temperatursumme lediglich 20 K. Im Folgejahr lag der Unterschied nach 63 Tagen bei 25,5 K (Abb. 35).

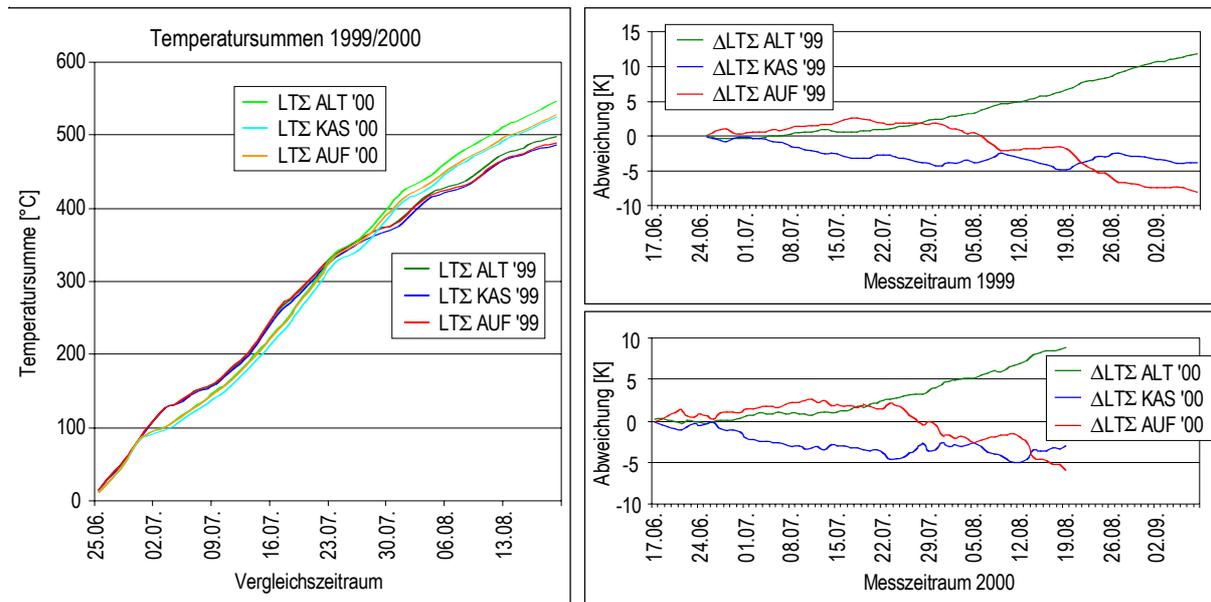


Abb. 35: Summen der Lufttemperatur der Versuchsfächen und Abweichungen der Temperatursummen vom gemeinsamen Mittel während der beiden Messkampagnen

Ähnlich geringe Differenzen zwischen Kahlschlägen und Altbeständen wurden in den Untersuchungen von TOLVANEN & KUBIN (1990) bzw. KUBIN & KEMPPAINEN (1991) registriert und bestätigten den geringen Einfluss des Strahlungshaushalts auf die Temperaturen in 2 m Höhe. Trotz der geringen Unterschiede war eine windabhängige Systematik in der Höhe der Tagesmittelwerte erkennbar. An warmen, strahlungsreichen Tagen, an denen die Unterschiede etwas stärker akzentuiert waren, konnte beobachtet werden, dass bei höheren Windgeschwindigkeiten geringere Werte auf der Kahlschlagfläche zu beobachten waren, während sie an windarmen Tagen über denen der Bestände lag.

Größere Unterschiede zwischen den Flächen konnten dagegen in den Tagesamplituden und den Extremwerten beobachtet werden. Die Spannweite zwischen mittlerem Tagesmaximum und -minimum war entgegen den Ergebnissen früherer Untersuchungen in den Beständen höher als auf der Kahlschlagfläche (ODIN 1979, TOLVANEN & KUBIN 1990, KUBIN & KEMPPAINEN 1991). Die größten Gegensätze ließen sich in der Regel im Aufforstungsbestand registrieren, was sich dort sowohl durch die höchsten Tagesmaxima als auch die geringsten Minimalwerte ausdrückte. Auch der Altbestand verzeichnete in der Regel höhere Tagesamplituden als die Kahlschlagfläche, jedoch entstanden diese fast ausschließlich durch höhere Tagesmaxima, während das nächtliche Temperaturminimum an beiden Standorten annähernd gleich war.

Abweichungen von den beschriebenen Verhältnissen traten während bewölkter Tage mit insgesamt geringen Unterschieden und an nahezu windstillen Strahlungstagen auf. In derartigen Situationen wurden höhere Tagesmaxima auf der Kahlschlagfläche gemessen, wie sie auch ODIN (1979) dokumentierte.

Die genannten geringen Unterschiede in den Minimalwerten zwischen Altbestand und der Kahlschlagfläche entsprachen substantiell den Ergebnissen früherer Untersuchungen (SIRÉN 1955, LEIKOLA & PYLKKÖ 1969, TOLVANEN & KUBIN 1990). Ergebnisse aus vergleichbaren Beständen wie der Aufforstungsfläche fehlten hingegen. Die auf dieser Fläche systematisch auftretenden geringsten Minimalwerte stehen vermutlich im Zusammenhang mit der sehr hohen Bestandsdichte bei gleichmäßig geringer Höhe. Verhältnismäßig hohe Ausstrahlungswerte waren verbunden mit annähernd durchgehender Windstille und damit geringen Temperaturen bis in den Bereich des Messwertgebers. So kam es ausschließlich

im Aufforstungsbestand zu Frostwerten (Tab. 8). In den Vergleichszeiträumen trat je ein Tag mit Frostwerten auf, während es in den Gesamtmesszeiträumen sieben Tage (1999) bzw. drei Tage (2000) waren. Zu keinem Zeitpunkt wurden jedoch in zwei Meter Höhe Werte registriert, die zu den einleitend beschriebenen Schädigungen der Vegetation führen konnten.

Die gleichermaßen für die Vegetationsentwicklung und Bildung der Temperatursumme bedeutsame Tagesmitteltemperatur von 5 °C wurde nur an einem Tag der Messungen 1999 auf der Kahlschlagfläche unterschritten.

### Zusammenfassung der Lufttemperaturmessungen

Das Umfeld der Versuchsfelder ließ sich über die Messwerte der Kahlschlagfläche dem Hochland-Klima zuordnen, welches sich in den Sommermonaten gegenüber der Tallage des Oulankajoki durch geringere Lufttemperaturen auszeichnete (KOUTANIEMI 1983). Tabelle 9 fasst die Lufttemperaturverhältnisse der drei Versuchsfelder in generalisierter Form zusammen.

Tab. 9: Generalisierte Lufttemperaturverhältnisse auf den Versuchsfeldern

	Altbestand	Kahlschlag	Aufforstung
Bestandsdichte [Bäume ha <sup>-1</sup> ]	972	152	2588
mittlere Bestandshöhe [m]	7,1	4,7	4,7
mittlerer Kronenschluss [%]	47	9	49
Tagesamplitude	-	--	++
max. Tagesamplitude	-	--	++
max. Lufttemperatur	+	--	++
min. Lufttemperatur	++	+	--
Windeinfluss auf LT (Zeit)	-	++	--
Frosteinfluss (Zeit)	-	-	++

Die Unterschiede zwischen den Standorten waren im Hinblick auf die Mittelwerte gering. Die im Tal gelegene Station Kiutaköngäs registrierte darüber hinaus höhere Maximal- und geringere Minimaltemperaturen und verzeichnete in der Regel größere Tagesamplituden.

Der Temperaturgradient zwischen Tallage und Hochland lag über dem langjährigen Mittel, jedoch im Rahmen des für die Region üblichen Bereichs.

Die zwischen den Versuchsfeldern gemessenen Unterschiede in den Mittelwerten lagen an der Grenze der Messgenauigkeit der Geber. Demgegenüber zeigten sich stärker akzentuierte Unterschiede in den Tagesamplituden und den Extremwerten.

- Die größten Gegensätze traten meist im Aufforstungsbestand auf. Hier wurden sowohl die höchsten Tagesmaxima als auch die geringsten Minimalwerte gemessen.
- Die Kahlschlagfläche wies in Folge des Windeinflusses geringere Tagesamplituden als die Bestände auf. Die höheren Gegensätze des Altbestands basierten auf höheren Tagesmaxima, aber ungefähr gleichen nächtlichen Minimalwerten.
- Unter bewölkten Bedingungen oder während windstillen Wetterlagen wurden hingegen die höchsten Maximalwerte auf der Kahlschlagfläche registriert.

Im Verlauf der Messkampagnen wurden in einer Höhe von zwei Metern nur im Aufforstungsbestand Frostwerte registriert, die jedoch im Hinblick auf ihre Beträge und Dauer keine schädigende Wirkung auf die Vegetation hatten.

#### 4.4.2.2 Erdoberflächentemperaturen

Eine Analyse der *Erdoberflächentemperaturen* war in vollem Umfang nur zwischen den drei Versuchsfeldern möglich. An den Referenzstationen erhebt das FMI bodennahe Temperaturen ausschließlich die bis 6 Uhr (UTC) aufgetretenen Minimalwerte (FMI 2002).

Die durchschnittlichen nächtlichen Minima der Erdoberflächentemperaturen zeigten analog zu den mittleren Minima der Lufttemperaturen ein Temperaturgefälle zwischen der Tallage am Kiutaköngäs und der Kahlschlagfläche. Je nach Bezugszeitraum lagen die Hochlandwerte 0,5 bis 0,9 K unter denen der Station Kiutaköngäs (Tab. 10). Das Auftreten der absoluten Minima war dagegen in hohem Maße von der überregionalen Wetterlage abhängig. Faktoren waren neben dem obligatorischen Einfluss kalter Luftmassen und hoher Ausstrahlungswerte die Windverhältnisse. Sofern Windrichtungen quer zur Talausrichtung auftraten, konnten hier geringere Werte registriert werden, da es vermutlich zu einer stabileren Schichtung oder einem Kaltluftabfluss in die Talsenke kam. Sofern Calmen auch im Hochland dominierten oder geringe Windgeschwindigkeiten längs zur Talausrichtung (WNW) des Oulankajoki auftraten, registrierten die Geber der Kahlschlagfläche geringere Werte. Das lässt den Schluss zu, dass es zu einer Kanalisierung des Windes in der Tallage und damit zu entsprechend höheren Werten als im Hochland kam (GEIGER 1961, EGGER 1983).

Tab. 10: Zusammenfassung ausgewählter Mittel- und Extremwerte der Erdoberflächentemperaturen der Versuchsfelder sowie der Minimalwerte der Stationen Kuusamo Lentoasema (KL) und Kuusamo Kiutaköngäs (KK) für die Vergleichs- und Messzeiträume der beiden Messkampagnen

Messwerte der Erdoberflächentemperatur	Vergleichszeitraum/(Messzeitraum)									
	1999 (25.06.-08.09.)					2000 (17.06.-19.08.)				
	ALT	KAS	AUF	KL	KK	ALT	KAS	AUF	KL	KK
EOT <sub>m</sub> [°C]	13,4/(12,4)	14,4/(13,4)	13,1/(12,1)	n.v./(n.v.)	n.v./(n.v.)	14,2/(13,8)	14,8/(14,3)	13,6/(13,2)	n.v./(n.v.)	n.v./(n.v.)
EOT <sub>d</sub> max [°C]	22,2/(21,4)	24,1/(22,9)	21,2/(20,5)	n.v./(n.v.)	n.v./(n.v.)	22,2/(22,2)	24,1/(24,1)	21,2/(21,2)	n.v./(n.v.)	n.v./(n.v.)
EOT <sub>d</sub> min [°C]	5,8/(5,9)	6,4/(7,1)	5,8/(5,2)	n.v./(n.v.)	n.v./(n.v.)	8,5/(5,8)	8,8/(6,4)	8,0/(5,8)	n.v./(n.v.)	n.v./(n.v.)
EOT <sub>gn</sub> min [°C]	7,1/(6,2)	7,7/(6,7)	6,9/(5,9)	7,5/(6,5)	8,4/(7,2)	8,3/(7,9)	8,1/(7,7)	7,9/(7,5)	n.v./(n.v.)	9,1/(8,8)
ΔEOT <sub>d</sub> [K]	16,4/(15,8)	16,5/(16,4)	18,2/(18,4)	n.v./(n.v.)	n.v./(n.v.)	15,3/(15,2)	16,8/(16,4)	16,4/(16,1)	n.v./(n.v.)	n.v./(n.v.)
ΔEOT <sub>d</sub> max [K]	27,6/(27,6)	27,5/(27,5)	30,3/(30,3)	n.v./(n.v.)	n.v./(n.v.)	26,9/(26,9)	28,7/(28,7)	27,0/(27,0)	n.v./(n.v.)	n.v./(n.v.)
EOTmax [°C]	36,1/(36,1)	35,3/(35,3)	38,2/(38,2)	n.v./(n.v.)	n.v./(n.v.)	36,8/(36,8)	35,5/(35,5)	36,3/(36,3)	n.v./(n.v.)	n.v./(n.v.)
EOTmin [°C]	-0,1/(-1,3)	-0,8/(-2,0)	-0,5/(-1,4)	-1,5/(-1,6)	-1,1/(-2,0)	0,4/(-0,3)	-0,6/(-1,5)	-0,1/(-0,9)	n.v./(n.v.)	0,3/(-1,2)
# EOT Frosttage	1/(7)	2/(8)	2/(9)	4/(9)	2/(9)	0/(1)	2/(3)	1/(2)	n.v./(n.v.)	0/(1)
# EOTmin < 5 °C	17/(28)	14/(24)	16/(28)	15/(26)	14/(25)	9/(13)	13/(16)	12/(16)	n.v./(n.v.)	8/(11)

Mittelwerte, höchste und geringste Tagesmittel sowie durchschnittliche Tagesminima (EOT<sub>m</sub>; EOT<sub>d</sub>max; EOT<sub>d</sub>min, EOT<sub>gn</sub>min). Mittlere und höchste Tagesamplituden (ΔEOT<sub>d</sub>; ΔEOT<sub>d</sub>max), aufgetretene Extremwerte (EOTmax; EOTmin) und Tage mit bodennahen Frösten sowie Minimalwerte unter 5 °C im Vergleichs- und im Messzeitraum (in Klammern)

Zwischen der Station Kiutaköngäs und dem Flughafen Kuusamo bestand, bei Abweichungen von 0,2 K, etwa das gleiche Temperaturgefälle wie zur Kahlschlagfläche. Entsprechend lagen die Werte des Flughafens unter denen der Station Kiutaköngäs (Tab. 10). Im Hinblick auf die absoluten Minima zeigte sich ein zweigeteiltes Bild. Während des stärker auf die Sommermonate bezogenen Vergleichszeitraums wurden die geringsten Werte im Hochland registriert, dagegen traten am Ende der Messungen zunehmend Tage auf, in denen es geringere Minima in der Tallage gab. Hier wurden schließlich während einer Frostwetterlage zum Ende des August 1999 die geringsten Erdoberflächentemperaturen der Messkampagne gemessen (Tab. 10). Möglicherweise setzte bereits in diesem Zeitraum der auch für die Lufttemperaturen wirksame Wechsel der höheren sommerlichen Werte der Tallage zu winterlichen Temperaturinversionen ein (HUOVILA 1987, KOUTANIEMI 1983).

Die Unterschiede zwischen den Versuchsfeldern waren im Hinblick auf die Erdoberflächentemperaturen erwartungsgemäß deutlicher ausgeprägt als bei den Lufttemperaturen. Fünf Zentimeter über dem

Untergrund bestand ein deutlich höherer Einfluss des Bodens als Hauptumsatzfläche der Strahlung, was zu größeren strahlungsabhängigen Temperaturschwankungen führte (vgl. ODIN 1979, OTTOSSON-LÖFVENIUS 1993b). Die höchsten Durchschnittswerte der Bezugszeiträume wurden auf der Kahlschlagfläche registriert, deren Werte zwischen 0,5 und 1,0 K über den Werten des Altbestands sowie 1,1 und 1,3 K über denen der Aufforstungsfläche lagen (Tab. 10). Aus diesen Werten ergab sich ein Temperaturprofil, welches sich deutlich von dem der Bestände abhob. Auf der Kahlschlagfläche bildete sich eine Temperaturinversion von 0,4 bis 0,7 K gegenüber den Lufttemperaturen in zwei Meter Höhe aus, während die Erdoberflächentemperaturen in den Beständen 0,5 bis 0,6 K (Altbestand) bzw. 0,6 bis 0,8 K (Aufforstung) unter den Werten der zugehörigen Lufttemperaturen lagen (Abb. 36).

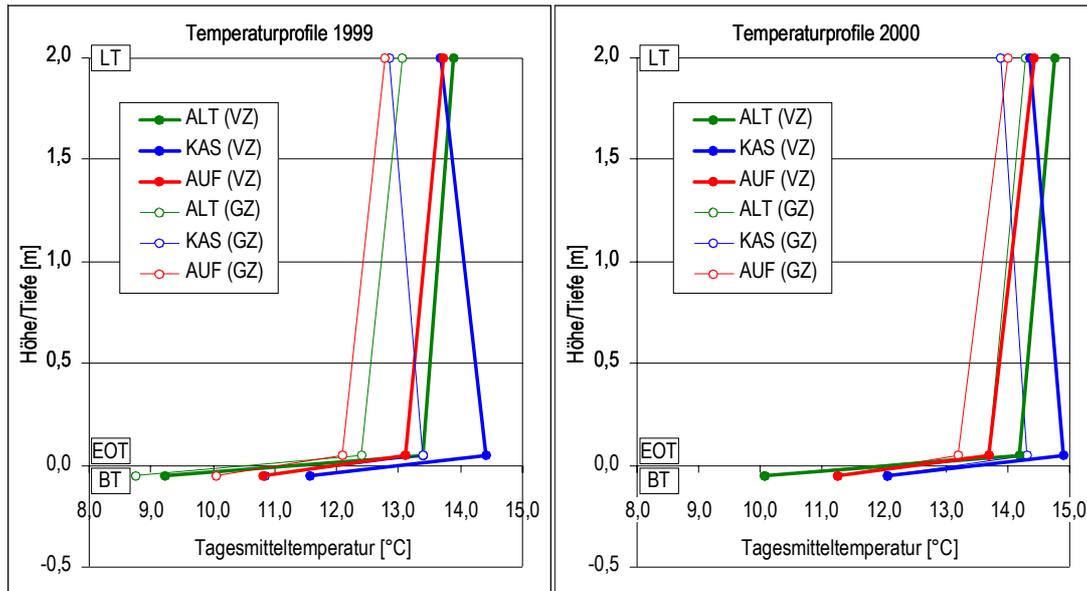


Abb. 36: Temperaturprofile der Versuchsflächen unter Berücksichtigung der Mittelwerte der Luft-, Erdoberflächen- und Bodentemperaturen während der Vergleichs- und Gesamtzeiträume der beiden Messkampagnen

Die im Verlauf der Messungen registrierten Extremwerte zeigten ein komplexes Wirkungsgefüge, in dem Strahlung und Wind als Einflussfaktoren wirksam wurden. Wie einleitend genannt, war ein gemeinsames Merkmal aller Flächen der größere Gegensatz der Extremwerte in Bodennähe, verglichen mit den Werten der Lufttemperatur in zwei Meter Höhe. Während des Tages lag das bodennahe Temperaturniveau der Kahlschlagfläche in der Regel über dem der Bestände. Ausnahmen bildeten Phasen, in denen es in den Beständen zu direkter Einstrahlung (»Sonnenflecken«, vgl. Kap. 3.1.2) kam. Obwohl so höhere bodennahe Temperaturen in den Beständen meist nur von kurzer Dauer waren, bewirkte der Effekt, dass im Verlauf der Messungen die höchsten Maximalwerte in den Beständen auftraten (Tab. 10). Zu einer weiteren Anhebung der bodennahen Temperaturmaxima in den Beständen dürfte die Reduzierung der ohnehin geringen Windgeschwindigkeiten in den Beständen durch die dichte Krautschicht geführt haben. Im Zusammenhang mit ähnlichen Temperaturwerten wurden durch VAARTAJA (1954) deutliche Unterschiede in den Gradienten der Windgeschwindigkeiten eines *Pinus*-Altbestands und einer jungen Brandfläche festgestellt. In Messhöhen von 0,4 m und 0,2 m erreichte die Windgeschwindigkeit im Bestand 41 % bzw. 37 % der Werte in 1,8 m, während es auf der Brandfläche noch 67 % bzw. 55 % waren.

Auch die nächtlichen Minima zeigten sich abhängig von den Strahlungs- und Windbedingungen. In der Regel traten die geringsten Minima im Aufforstungsbestand auf, während auf der Kahlschlagfläche die höchsten nächtlichen Werte gemessen wurden. Die Vermutung, dass die ungehinderte Ein- und Ausstrahlung zu den höchsten Gegensätzen auf der Kahlschlagfläche führen würde, konnte lediglich während wolkenloser Bedingungen festgestellt werden, in denen auf allen Flächen die gleichen windarmen

Bedingungen herrschten (vgl. TOLVANEN & KUBIN 1990, KUBIN & KEMPPAINEN 1991, OTTOSON-LÖFVENIUS 1993b).

Im Verlauf der Messungen konnten auf sämtlichen Versuchsflächen Frostwerte in Bodennähe registriert werden, die mit den zuvor beschriebenen windarmen Strahlungswetterlagen in Zusammenhang standen. Die Frostphasen waren zwar auf Einzelnächte beschränkt (Tab. 10), dauerten jedoch im Altbestand und auf der Kahlschlagfläche bis zu 5,5 Stunden und im Aufforstungsbestand bis zu 6,5 Stunden. Unabhängig vom Bezugszeitraum traten die jeweils geringsten Minimalwerte auf der Kahlschlagfläche auf (Tab. 10). Der in diesem Zusammenhang beobachtete absolute Minimalwert von  $-2,0\text{ °C}$  während der Messkampagne 1999 dürfte jedoch selbst bei Jungpflanzen ohne ausgebildete Frosthärte nicht zu dauerhaften Schädigungen geführt haben (CHRISTERSSON 1971, GILLIES & BINDER 1997). Sichtbare frostbedingte Schäden konnten zu keinem Zeitpunkt beobachtet werden, daneben sprachen maximale Abkühlungsraten von höchstens  $0,6\text{ K h}^{-1}$  gegen eine Bildung schädlicher Eiskristalle im Zellraum der Pflanzen (CHRISTERSSON 1971). Daneben ist anzunehmen, dass zum Zeitpunkt des Auftretens der absoluten Minimalwerte in der zweiten Augushälfte bereits ein gewisses Maß an Frosthärte durch die Vegetation ausgebildet war (LANGVALL 2000). Nicht sichtbare Schäden, wie sie auch bei Frostwerten über der einleitend genannten Schwelle auftreten, konnten dagegen nicht ausgeschlossen werden (SAKAI & LARCHER 1987, HÄLLGREN et al. 1990, LANGVALL & ÖRLANDER 2001). In diesem Zusammenhang waren weniger die absoluten Temperaturwerte als die Frostdauer und Frostsummen von Bedeutung (LANGVALL & ÖRLANDER 2001). Ebenfalls aufgetreten sind hohe Einstrahlungsraten nach Frostereignissen, die nach Ergebnissen verschiedener Untersuchungen Ursache für Schäden am Photosynthesystem junger Bäume sein können (STRAND & LUNDMARK 1987, LANGVALL & ÖRLANDER 2001).

#### Zusammenfassung der Messungen der Erdoberflächentemperaturen

Hinsichtlich des bodennahen Temperaturregimes konnte eine größere Ähnlichkeit mit den Werten des Flughafens als mit denen der Talstation am Kiutaköngäs beobachtet werden. Dieser Hintergrund bestätigte die thermalen Gegensätze zwischen beiden Relieftypen, wie es im Fall der Lufttemperatur in zwei Meter Höhe bereits erkennbar war (vgl. KOUTANIEMI 1983). Gegenüber der Tallage konnte in der Regel ein entsprechendes Temperaturgefälle beobachtet werden. Besondere Wetterlagen hoben diese Gefälle jedoch auf, wobei Windgeschwindigkeit und -richtung die Haupteinflussfaktoren darstellten.

Die Unterschiede zwischen den Versuchsflächen waren deutlicher ausgeprägt als die der Lufttemperaturen. Die höchsten Tagesmittel wurden meist auf der Kahlschlagfläche gemessen, während das Auftreten der Extremwerte in hohem Maße strahlungs- und windabhängig war:

- Hohe Einstrahlung führte in den Beständen zu »Sonnenflecken«, sodass trotz kurzzeitiger Einwirkung höhere Tagesmaxima der Erdoberflächentemperaturen auftraten als auf der Kahlschlagfläche.
- Die Windbremsung der Bestände führte dort meist zu geringeren nächtlichen Minima als auf der Kahlschlagfläche.
- Die zuvor genannten Punkte bedingten rein numerisch höhere Tagesamplituden.
- Je ausgeprägter die Bedingungen einer Strahlungswetterlage gegeben waren, auch zeitweise, desto stärker sanken die nächtlichen Temperaturen auf der Kahlschlagfläche im Vergleich zu den Beständen, was eine höhere Frostgefährdung bedeutete.
- Die jeweils geringsten absoluten Minimalwerte traten entsprechend auf der Kahlschlagfläche auf.

Im Verlauf der zwei Messkampagnen kam es lediglich zu kurzen, wenig intensiven Frostphasen, sodass keine sichtbaren Schädigungen an der Vegetation auftraten. Eine höhere Anzahl von Frostereignissen auf der Kahlschlagfläche gegenüber den Beständen, wie sie von TOLVANEN & KUBIN (1990) bzw. KUBIN & KEMPPAINEN (1991) registriert wurden, konnte während der Messkampagnen nur im Jahr 2000, nicht aber 1999 festgestellt werden. Die für die Vegetationsentwicklung bedeutsame Tagesmitteltemperatur von 5 °C wurde in Bodennähe an keinem Tag der Messungen unterschritten. Tabelle 11 fasst die Erdoberflächentemperaturverhältnisse der drei Versuchsfelder generalisiert zusammen.

Tab. 11: Generalisierte Erdoberflächentemperaturverhältnisse auf den Versuchsfeldern

	Altbestand	Kahlschlag	Aufforstung
Bestandsdichte [Bäume ha <sup>-1</sup> ]	972	152	2588
mittlere Bestandshöhe [m]	7,1	4,7	4,7
mittlerer Kronenschluss [%]	47	9	49
mittl. Erdoberflächentemperatur	-	++	--
max. Erdoberflächentemperatur	+	--	++
min. Erdoberflächentemperatur	++	--	+
Windeinfluss (Zeit)	-	++	--
Frosteinwirkung (Zeit)	--	0	++

#### 4.4.2.3 Bodentemperaturen

Werte der *Bodentemperaturen* lagen ausschließlich von den Versuchsfeldern vor, da sie nicht zum Standardprogramm offizieller Wettermessungen gehören. Aus diesem Grund waren keine Vergleiche zwischen Hochland und Tallage sowie zwischen Referenzstationen und den Versuchsfeldern möglich.

Im Verlauf der Messungen wurden auf der Kahlschlagfläche höhere Durchschnittswerte als in den Beständen registriert. Je nach Bezugszeitraum lagen sie 2,0 bis 2,4 K über den Werten des Altbestandes und 0,7 bis 0,8 K über denen der Aufforstungsfläche (Tab. 12). Die ungehinderte Ein- und Ausstrahlung führte durch den fehlenden Kronenraum und die geringmächtige Krautschicht darüber hinaus zu höheren Tagesamplituden. Kurzfristige Einstrahlungsereignisse in den Beständen (»Sonnenflecken«) hatten aufgrund der kompakten Krautschicht und des geringen Bodenwärmestroms keinen messbaren Einfluss auf die Bodentemperaturen.

Abgesehen von wenigen Tagen im Frühsommer 2000 traten auf der Kahlschlagfläche die höchsten Tagesmaxima auf, während die geringsten Werte meist im Altbestand gemessen wurden, dessen Temperaturmittel ebenfalls geringer war. Während wolkenarmer bzw. wolkenloser Wetterlagen sanken die nächtlichen Temperaturminima der Kahlschlagfläche jedoch unter das Niveau der Bestände. Im Hinblick auf die aufgetretenen Minimalwerte schienen sich die Verhältnisse zwischen den Versuchsfeldern in den beiden Messkampagnen zu widersprechen (Tab. 12). Die für den Messzeitraum 2000 ausgewiesenen absoluten Minimalwerte waren in den Beständen geringer als auf der Kahlschlagfläche, während es in den anderen Referenzzeiträumen umgekehrt war. Ursache war die jahreszeitliche Entwicklung der Bodentemperaturen im Übergang zwischen Winter und Sommer. In den ersten Tagen der Messkampagne 2000 konnte noch die langsamere Erwärmung des Bodens in den Beständen beobachtet werden, während 1999 dieser Prozess bereits abgeschlossen war.

Gegenüber den Erdoberflächen- und Lufttemperaturen zeichneten sich die Bodentemperaturen der drei Versuchsfelder durch geringere Mittelwerte und Tagesamplituden aus. Darüber hinaus führten Bodenwärmestrom und Isolation der Krautschicht zu einer zeitlichen Verzögerung des Tagesgangs. Die Vorgänge der Bodenerwärmung und -auskühlung waren gegenüber den an der Luft gemessenen Werten durch eine mehrstündige Verzögerung gekennzeichnet. Auf der Kahlschlagfläche wurden die Maximal- und

Minimalwerte etwa zwei Stunden nach den entsprechenden Werten der Erdoberflächentemperatur erreicht. Im Altbestand lag die Diskrepanz der Tageshöchstwerte bei zwei bis drei Stunden und im Aufforstungsbestand bei drei bis vier Stunden. Die Minimalwerte traten in beiden Beständen sogar erst etwa vier Stunden nach den nächtlichen Minima der Erdoberflächentemperaturen auf.

Tab. 12: Zusammenfassung ausgewählter Mittel- und Extremwerte der Bodentemperaturen der Versuchsfächen während der Vergleichs- und Messzeiträume der beiden Messkampagnen

Messwerte der Bodentemperaturen	Vergleichszeitraum/(Messzeitraum)					
	1999 (25.06.-08.09.)			2000 (17.06.-19.08.)		
	ALT	KAS	AUF	ALT	KAS	AUF
BT <sub>m</sub> [°C]	9,2/(8,8)	11,6/(10,8)	10,2/(9,7)	10,5/(10,1)	12,7/(12,1)	11,8/(11,3)
BT <sub>d</sub> max [°C]	11,4/(11,4)	15,5/(15,5)	12,8/(12,8)	13,4/(13,4)	16,3/(16,3)	14,9/(14,9)
BT <sub>d</sub> min [°C]	7,5/(6,4)	8,4/(7,2)	8,2/(6,7)	8,5/(5,5)	9,4/(6,2)	8,8/(6,4)
ΔBT <sub>d</sub> [K]	1,9/(1,9)	6,6/(6,4)	1,6/(1,7)	3,0/(3,0)	6,4/(5,9)	2,4/(2,4)
ΔBT <sub>d</sub> max [K]	2,9/(2,9)	11,9/(11,9)	2,7/(2,7)	5,2/(5,2)	11,4/(11,4)	3,9/(3,9)
ΔBT <sub>d</sub> min [K]	0,8/(0,8)	1,9/(1,9)	0,5/(0,5)	1,1/(1,1)	2,2/(0,5)	1,1/(1,1)
BT <sub>max</sub> [°C]	12,6/(12,6)	20,8/(20,8)	13,9/(13,9)	16,1/(16,1)	20,5/(20,5)	16,5/(16,5)
BT <sub>min</sub> [°C]	6,3/(5,1)	4,6/(3,8)	7,1/(5,7)	6,8/(4,1)	6,0/(5,5)	7,4/(5,2)

Mittel-, Tagesmaximal- und Tagesminimalwerte der Bodentemperaturen (BT<sub>m</sub>; BT<sub>d</sub>max; BT<sub>d</sub>min), mittlere, höchste und geringste Tagesamplituden (ΔBT<sub>d</sub>; ΔBT<sub>d</sub>max; ΔBT<sub>d</sub>min) sowie aufgetretene Extremwerte (BT<sub>max</sub>; BT<sub>min</sub>) im Vergleichs- und im Messzeitraum (in Klammern)

Im Zusammenhang mit den beobachteten Frostwetterlagen war auf der Kahlschlagfläche ebenfalls ein deutliches Absinken der Bodentemperaturen messbar, jedoch kam es nicht zu Frostwerten im Boden. Darüber hinaus blieben die Tagesmittelwerte während der gesamten Messkampagnen oberhalb von 5 °C. Frostschäden am Wurzelsystem, wie sie von KULLMAN & HÖGBERG (1989) bzw. VENN & SOLHEIM (1990) beschrieben wurden, konnten somit ausgeschlossen werden. Umgekehrt ließen sich während der Messungen aber auch nur in wenigen Ausnahmefällen Bodentemperaturen von 20 bis 30 °C messen, wie sie für eine optimale Wurzelentwicklung nötig sind (SÖDERSTRÖM 1974, 1975). Bereits TOLVANEN & KUBIN (1990) hielten diesen Aspekt des Untersuchungsraums auf ihren allerdings etwas höher gelegenen Versuchsfächen fest.

#### Zusammenfassung der Bodentemperaturmessungen

Die Ergebnisse der Bodentemperaturen zeigten wenig spektakulär das Bild früherer Untersuchungen. Höhere mittlere Bodentemperaturen nach Kahlschlägen wurden z. B. auch durch ODIN (1979) oder TOLVANEN & KUBIN 1990 beobachtet. Bezogen auf den Zeitraum der Monate Juni bis August entsprachen die Differenzen zwischen Kahlschlag und Altbestand, bei Abweichungen von ein bis sechs Prozent, den Ergebnissen von KUBIN & KEMPPAINEN (1991) aus den Jahren 1974 bis 1985.

Auch höhere Tagesamplituden in Folge der ungehinderten Ein- und Ausstrahlung auf der Kahlschlagfläche sind zuvor durch BJOR (1971) und KUBIN & KEMPPAINEN (1994) dokumentiert wurden. Weitere Merkmale der Kahlschlagfläche waren in der Regel höhere Tagesmaxima sowie geringste Tagesminima bei Strahlungswetterlagen. Demgegenüber zeichnete sich der Altbestand abseits extremer Wetterlagen durch die jeweils geringsten Minima aus, auch blieben die Tagesmittelwerte durchgehend unter denen der anderen Flächen. Tabelle 13 fasst die Bodentemperaturverhältnisse der drei Versuchsfächen schematisch zusammen.

Tab. 13: Generalisierte Bodentemperaturverhältnisse auf den Versuchsf lächen

	Altbestand	Kahlschlag	Aufforstung
Bestandsdichte [Bäume ha <sup>-1</sup> ]	972	152	2588
mittlere Bestandshöhe [m]	7,1	4,7	4,7
mittlerer Kronenschluss [%]	47	9	49
mittl. Bodentemperatur	--	++	+
mittl. Tagesamplitude	-	++	--
max. Tagesamplitude	-	++	-
max. Bodentemperatur	--	++	-
min. Bodentemperatur	--	-	++

#### 4.4.3 Niederschlags- und Feuchteverhältnisse

Die Niederschläge als Teil des Wasserkreislaufs bilden die Hauptzufuhr für die Wasserbilanz von Waldgesellschaften (SIRÉN 1955). Gleichzeitig üben ausgedehnte Waldflächen aufgrund ihrer Oberflächenrauigkeit einen Einfluss auf Luftmassen und damit das Niederschlagsregime aus. Die Reduzierung der Windgeschwindigkeiten bei gleichzeitiger Turbulenzbildung führt in der Regel vermehrt zu aufsteigenden Luftmassen, ihrer Abkühlung, Wolkenbildung und damit zu höheren Niederschlägen (SHIKLOMANOV & KRESTOVSKI 1988). Auf regionaler bzw. lokaler Ebene reduzieren Waldbereiche dagegen den Zufluss in den Wasserhaushalt eines Einzugsgebiets, da gegenüber Freiflächen ein Teil der Niederschläge als Interzeptionsverlust für Oberflächen-, Quell-, Grundwasserspeisung und Bestandstranspiration verloren geht (KITREDGE 1948, BARNER 1961, DVWK 1986). Vor diesem Hintergrund führen Waldnutzungen in Form von Kahlschlägen oder Ausdünnungen meist zu Veränderungen im lokalen Gewässerhaushalt (HIBBERT 1967, ROSÉN 1984, SOKOLLEK 1985, VENZKE 1990, LAGERGREN et al. 2001).

Die systematische Erfassung von Niederschlägen, Evaporationswerten und Abflussmessungen wurde in Finnland seit Gründung des Hydrologischen Amtes 1908 durchgeführt, obwohl vereinzelte Messungen bis in die Mitte der 1850er-Jahre dokumentiert sind (HEIKURAINEN 1967). Untersuchungen innerhalb von Beständen wurden in der gesamten europäischen Borealis meist im Rahmen einzelner Forschungsprojekte durchgeführt. In Finnland führte HEIKINHEIMO (1912) bereits 1912 Niederschlagsmessungen in verschiedenen Beständen durch; seinen Untersuchungen folgten Messungen von LUKKALA (1942; 1946), TEIVAINEN (1952) und SIRÉN (1955). Darüber hinaus verweist HEIKURAINEN (1967) auf 37 Untersuchungen aus dem Zeitraum zwischen 1957 und 1962. Spätere Forschungsprojekte setzten sich, wie die oben genannten, mit den Folgen der Waldnutzung oder mit den Teilaspekten von Evaporation, Transpiration oder der Messmethodik von Interzeptionsverlusten auseinander (GRELLE et al. 1996, CIENCIALA et al. 1997, KLAASSEN et al. 1998). Im Untersuchungsraum spielten Niederschlagsmessungen in früheren Untersuchungen eine untergeordnete Rolle und bezogen sich meist auf die Angaben der Referenzstationen Kuusamo und Kiutaköngäs (KOUTANIEMI 1983, WYSZKOWSKI 1987, TOLVANEN & KUBIN 1990).

Im langjährigen Mittel fallen während der Vegetationsperiode etwa 50 % der Jahresniederschläge des Untersuchungsraums (vgl. Abb. 16). Gleichzeitig treten in diesem Zeitraum temperaturbedingt die höchsten Evaporationsraten auf, sodass beide Parameter bedeutende Größen für den Wasserhaushalt einer Fläche darstellen. Wie in Kapitel 3.1.1 bereits erläutert, gestaltet sich die Messung von Niederschlägen bis heute problematisch, da prinzipbedingt mit hohen Fehlern gerechnet werden muss. Infolgedessen müssen absolute Messwerte unter diesem Vorbehalt betrachtet werden, zumal Niederschläge darüber hinaus einer hohen räumlichen und zeitlichen Variabilität unterliegen (HEINO 1994, RICHTER 1995). Vergleiche zwischen den Referenzstationen als Grundlage für Angaben zum Hochland- bzw. Talklima gestalten sich

somit als überaus problematisch, da die Distanz zwischen den Stationen recht groß ist. Die Messwerte der Jahre 1999 und 2000 unterliegen damit einer höheren Wahrscheinlichkeit, »Einzelereignisse« zu sein, als die Werte anderer Messparameter.

#### 4.4.3.1 Niederschlag

Wie einleitend in Kapitel 4.3 bereits beschrieben, konnte während der beiden Vegetationsperioden 1999 und 2000 die hohe Variabilität der Niederschläge beobachtet werden. Analog zum langjährigen Mittel wurden während beider Messkampagnen am Flughafen Kuusamo (KL) höhere Niederschläge registriert als am Kiutaköngäs (KK). Die Differenzen zwischen den zwei Stationen waren jedoch erheblich größer als üblich. So registrierten die Niederschlagssammler im Zeitraum Juni-September 1999 Unterschiede von 48 mm und im Jahr 2000 sogar von 85 mm statt der durchschnittlichen Differenz von 9 mm. Innerhalb der Vergleichszeiträume betrug die aufgezeichneten Unterschiede 30 mm bzw. 70 mm. Tabelle 14 fasst die wichtigsten Werte der Messungen 1999 und 2000 zusammen.

Tab. 14: Zusammenfassung ausgewählter Niederschlagswerte der Versuchsfelder sowie der Stationen Kuusamo Lentoasema (KL) und Kuusamo Kiutaköngäs (KK) für die Vergleichs- und Messzeiträume der beiden Messkampagnen

Messwerte des Niederschlags	Vergleichszeitraum/(Messzeitraum)									
	1999 (25.06.-08.09.)					2000 (17.06.-19.08.)				
	ALT	KAS	AUF	KL	KK	ALT	KAS	AUF	KL	KK
NS [mm]	103/(116)	120/(137)	123/(137)	152/(179)	121/(136)	99/(116)	119/(141)	98/(118)	165/(190)	90/(116)
NS <sub>d</sub> max [mm]	14/(14)	16/(16)	20/(20)	26/(26)	17/(17)	17/(17)	20/(20)	16/(16)	22/(22)	16/(16)
NS <sub>h</sub> max [mm]	6/(6)	6/(6)	6/(6)	n.v./(n.v.)	n.v./(n.v.)	7/(7)	11/(11)	5/(5)	n.v./(n.v.)	n.v./(n.v.)
# NS <sub>d</sub> ≥ 0,1 mm	28/(33)	27/(34)	30/(36)	35/(43)	28/(36)	34/(40)	32/(40)	32/(40)	29/(36)	34/(42)
# NS <sub>d</sub> ≥ 1,0 mm	18/(21)	19/(22)	17/(20)	21/(26)	16/(21)	20/(23)	21/(24)	22/(25)	22/(26)	20/(23)
# NS <sub>d</sub> ≥ 10,0 mm	4/(4)	5/(5)	5/(5)	4/(5)	6/(6)	3/(3)	4/(5)	3/(4)	6/(7)	3/(4)

Niederschlagssummen (NS), Tageshöchstwerte (NS<sub>d</sub>max), Stundenmaxima (NS<sub>h</sub>max) sowie der Zahl der Tage mit Niederschlägen von mindestens 0,1 mm, 1 mm und 10 mm im Vergleichszeitraum und im Messzeitraum (in Klammern)

Entgegen den Temperaturverhältnissen zeigte das Niederschlagsregime der Versuchsfelder auf Grundlage der Kahlschlagwerte eine höhere Affinität zu den Werten der näher liegenden Referenzstation Kiutaköngäs. Im Verlauf der Messreihe 1999 waren die Werte nahezu identisch, und im Folgejahr wurden etwas höhere Mengen registriert als am Kiutaköngäs. In beiden Vegetationsperioden lagen die Niederschläge jedoch deutlich unter den Werten des Flughafens Kuusamo. Die Betrachtung der aufgetretenen Niederschlagsereignisse anhand einer linearen Einfachkorrelation verweist ebenfalls auf eine größere Ähnlichkeit zwischen den näher gelegenen Messpunkten (Abb. 37).

Zwischen den Niederschlagsreihen der Kahlschlagfläche und beiden Referenzstationen bestand darüber hinaus im Sommer 1999 eine höhere Ähnlichkeit in Form höherer Korrelationskoeffizienten als im Folgejahr.

In Erweiterung zu den standardisierten Methoden erfolgte auf den Versuchsfelder eine zusätzliche Erfassung der Niederschläge über 30 nicht normierte Niederschlagssammler je Fläche (vgl. Kap. 3.1.1). Hintergrund dieser Maßnahme war die Eingrenzung des Problems der Standortauswahl in den Beständen und die Ermittlung von Durchschnittswerten für die Versuchsfelder. Trotz der abweichenden Bauweise der Sammler zeigten sich bemerkenswert geringe Abweichungen von den Summen der automatischen HELLMANN-Sammler, sodass sich die dort dokumentierten Messwerte bestätigten. Je nach Bezugszeitraum lagen die mittleren Niederschlagssummen im Altbestand maximal um vier Prozent über den Werten des HELLMANN-Sammlers, während im Aufforstungsbestand drei bis acht Prozent geringere Durchschnittssummen auftraten. Da auf der Kahlschlagfläche Abtropfvorgänge ausgeschlossen werden konnten

und so ausschließlich Verluste - durch Wind und möglicherweise durch Verdunstung aus den Gebern - auftraten, war der mittlere Fehlbetrag gegenüber dem automatischen Sammler auf der Kahlschlagfläche mit Werten zwischen fünf und zwölf Prozent am größten.

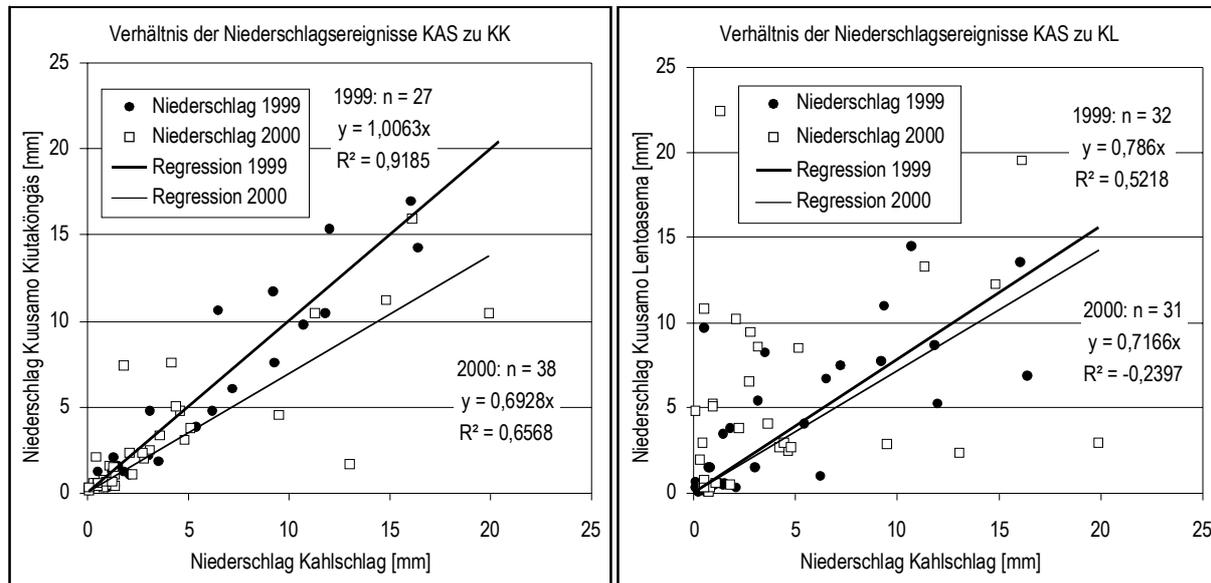


Abb. 37: Verhältnis der Niederschlagsmengen zwischen der Kahlschlagfläche (KAS) und den Referenzstationen Kiutaköngäs (KK) und Lentoasema (KL) während der beiden Messkampagnen

Im Vergleich mit den automatisch erhobenen Daten der HELLMANN-Sammler (Tab. 14) ergaben sich etwas geringere Unterschiede zwischen den Flächenmitteln, jedoch bestätigten auch die Werte der nicht normierten Sammler die Niederschlagscharakteristika der zwei Messkampagnen.

Die zur Bildung der Flächenmittel herangezogenen Einzelwerte unterlagen in Abhängigkeit von der Bestandsstruktur (Baumarten, Kronenschlussdichte, Höhe, Bestandsschichtung) großen Unterschieden. Interzeptionsverluste oder Abtropfvorgänge aus dem Kronenraum führten folgerichtig in den Beständen zu drei- bis fünffach höheren Standardabweichungen als auf der Kahlschlagfläche (Abb. 38). Dabei zeigte sich die Aufforstungsfläche in Form etwas höherer Standardabweichungen der Niederschlagswerte heterogener als der Altbestand und korrelierte so mit der ebenfalls etwas höheren Standardabweichung der Kronenschlussdichte über den Sammlern. Als weiteres Maß für die Heterogenität der Bestände wies der Variationskoeffizient (Quotient aus Standardabweichung und arithmetischem Mittel der Einzelmessungen) mit 15-18 % ebenfalls geringfügig höhere Werte auf als der Altbestand (11-15 %).

Der Vergleich der Versuchsflächen offenbarte während der beiden Messkampagnen ein hohes Maß an Variabilität selbst für die in unmittelbarer Nähe zueinander gelegenen Versuchsflächen. Im Messzeitraum 1999 registrierten die automatischen Niederschlagssammler der Kahlschlagfläche und des Aufforstungsbestands etwa gleiche Mengen, während im Altbestand nur etwa 85 % der Werte der zwei anderen Flächen gemessen wurden. Unter Berücksichtigung der 30 bodennahen Sammler wurden jedoch 94 % der Niederschläge der beiden anderen Flächen erreicht. Im Folgejahr zeigte sich ein anderes Bild. Hier wurden in den beiden Waldbeständen nur geringe Mengenunterschiede gemessen, die jedoch nur etwa 83 % (bzw. 90 % im Flächenmittel) der Summen der Kahlschlagfläche erreichten (Tab. 14, Abb. 38). Während der Vergleichszeiträume waren die Verhältnisse zwischen den Flächen annähernd identisch.

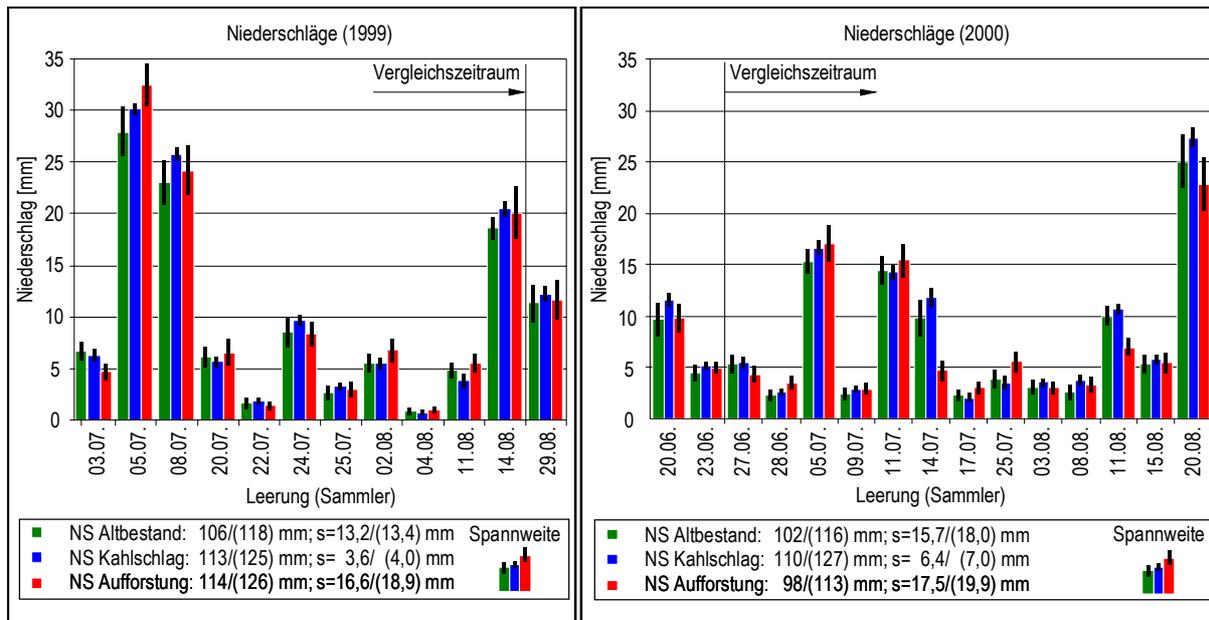


Abb. 38: Mittelwerte der Niederschlagssummen sowie ihre Standardabweichungen aus jeweils 30 Niederschlagssammlern je Versuchsfläche in den Vergleichs- und Messzeiträumen (in Klammern)

Die Ursachen für die unterschiedlichen Verhältnisse während der beiden Messkampagnen waren vermutlich in der Herkunft und der zeitlichen Verteilung der Niederschläge begründet. Während der Messkampagne 1999 dominierten südwestliche Windrichtungen während des Auftretens von Niederschlägen, dagegen waren im Jahr 2000 südöstliche Strömungen bestimmend (Abb. 39 und 40). Daraus ergab sich ein Zusammenhang zwischen der Windrichtung (Windbedingungen oberhalb der Bestände) und der Bestandsstruktur, d. h. der Lage von Öffnungen im Kronenraum und damit der registrierten Niederschlagsmenge. Als schwer einschätzbar muss die Wirkung der geringfügig höheren Windgeschwindigkeiten während der Niederschlagsereignisse des Sommers 1999 angesehen werden, die in den Beständen zwischen  $0,0 \text{ ms}^{-1}$  und  $0,3 \text{ ms}^{-1}$  über denen des Folgejahrs lagen. Außerhalb der Bestände wurden mittlere Unterschiede von  $0,2\text{-}0,4 \text{ ms}^{-1}$  registriert. Da im Raum oberhalb der Bestände in der Regel höhere Windgeschwindigkeiten herrschen, dürfte der Anteil von »herausgeschüttelten« Interzeptionsniederschlägen 1999 größer gewesen sein als im Jahr 2000. Ebenfalls schwer einzugrenzen war die Bedeutung der unterschiedlichen Verteilung der Niederschläge während der Messkampagnen. Im Vergleichszeitraum des Jahres 1999 wurden weniger Niederschlagsereignisse gezählt als im Folgejahr, jedoch war die durchschnittliche Ereignisdauer länger und die Niederschlagsmenge größer. Die Ermittlung der Interzeptionsverluste ließ jedoch den Schluss zu, dass unter den Verhältnissen der Vegetationsperiode 1999, besonders im Aufforstungsbestand, mehr Niederschläge bis in den Bodenbereich vordringen konnten als im Folgejahr. Offenbar führte im Sommer 2000 die Kombination aus Herkunft, etwas geringeren Windgeschwindigkeiten und dem Zusammenhang, dass ein höherer Anteil an Niederschlägen mit geringen Werten den Interzeptionsverlust erhöht (SHIKLOMANOV & KRESTOVSKI 1988), zu höheren Interzeptionsraten.

#### 4.4.3.2 Interzeption

Die Bestimmung des Interzeptionsverlustes erfolgte über den einfachen Vergleich der Freilandniederschläge (Kahlschlag) mit den Werten der Bestände (LEYTON et al. 1967, RUTTER et al. 1971, VENZKE 1990), auch wenn dieses Verfahren verhältnismäßig große Fehler birgt (KLAASSEN et al. 1998). Eine Zusammenfassung der in den Vergleichszeiträumen registrierten Niederschläge findet sich in den Abbildungen 39 und 40.

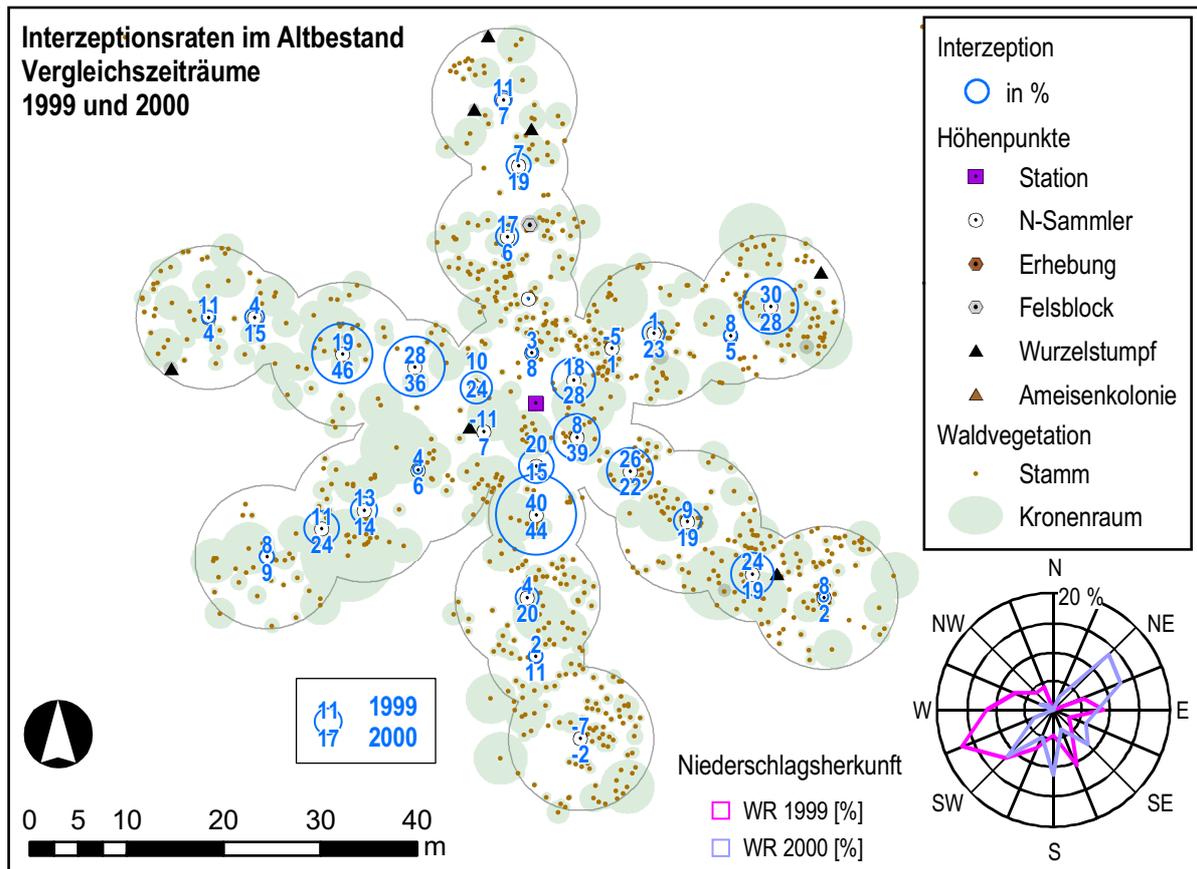


Abb. 39: Interzeptionsverluste im Bereich der 30 Sammler im Altbestand sowie primäre Windrichtungen während der Niederschlagsereignisse in den Vergleichszeiträumen 1999 und 2000

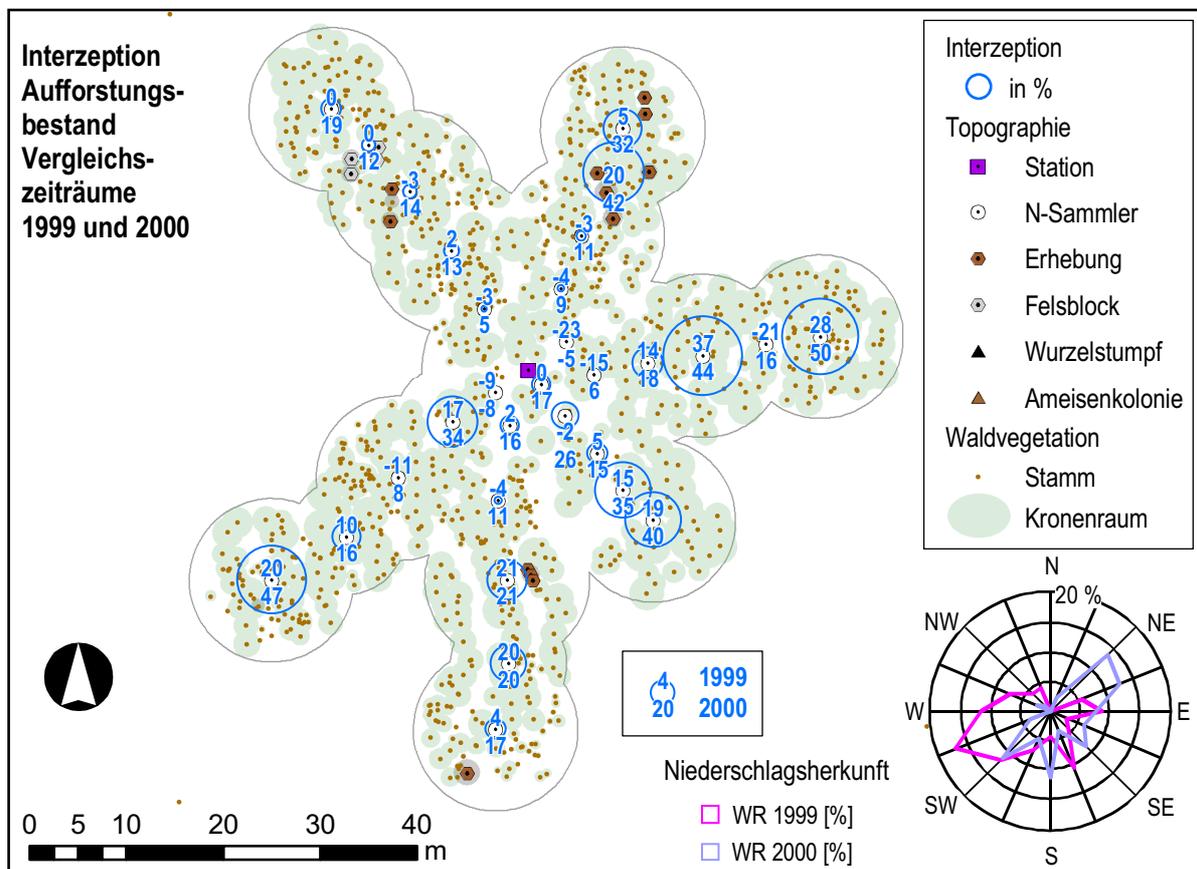


Abb. 40: Interzeptionsverluste im Bereich der 30 Sammler im Aufforstungsbestand sowie primäre Windrichtungen während der Niederschlagsereignisse in den Vergleichszeiträumen 1999 und 2000

Auf Grundlage der automatischen Sammler war für die Bezugszeiträume 1999 lediglich für den Altbestand eine Bestimmung der Interzeptionsraten (14-15 %) möglich, da im Aufforstungsbestand gleiche bzw. höhere Niederschläge registriert wurden als auf der Kahlschlagfläche. Im Sommer 2000 lagen die Interzeptionsraten beider Bestände mit 17-18 % (Altbestand) bzw. 16-18 % (Aufforstung) deutlich über den Werten des Vorjahrs. Auch die Berücksichtigung der jeweils 30 bodennahen Niederschlagssammler bestätigte die erheblichen Unterschiede zwischen den beiden Messkampagnen, ermöglichte jedoch eine Bestimmung der Interzeptionsraten in beiden Jahren. Die Flächenmittel der Niederschläge offenbarten je nach Bezugszeitraum des Jahres 1999 Interzeptionsverluste von elf bis zwölf Prozent für den Altbestand und von vier bis sechs Prozent für den Aufforstungsbestand. Im Jahr 2000 lagen die Raten mit 17 % im Altbestand und 20 % im Aufforstungsbestand wiederum deutlich höher. Die Mittelwerte beider Messkampagnen ergaben so durchschnittliche Raten von etwa 14 % für den Altbestand und 13 % für die Aufforstungsfläche, zeigten jedoch eine hohe Abhängigkeit von Niederschlagsmenge, Anzahl der Ereignisse und Herkunft der Niederschläge.

Der Vergleich aller Niederschlagsereignisse während der beiden Messkampagnen mit Hilfe linearer Regressionen verwies ebenfalls auf etwas höhere Interzeptionsraten im Altbestand im Vergleich zum Aufforstungsbestand. Dabei war es unerheblich, ob die Analyse auf der Grundlage der einzelnen HELLMANN-Sammler mit hoher zeitlicher Auflösung (= hohe Anzahl von Niederschlagsereignissen) oder auf Grundlage aller Sammler, jedoch mit geringerer zeitlicher Auflösung (= Anzahl der Leerungen) durchgeführt wurde (Abb. 41). Im zuletzt genannten Fall zeigte sich analog zur reinen Betrachtung der Niederschläge eine geringere Differenz zwischen den Beständen. Auffällig waren die geringeren Korrelationskoeffizienten der Niederschlagsreihen des Aufforstungsbestands, deren Ursache vermutlich in der größeren Distanz zur Kahlschlagfläche im Vergleich zum Altbestand lag. Die These wird gestützt durch mehrere Einzelereignisse mit größeren Niederschlagsmengen, die von den Werten der Kahlschlagfläche und damit der Regressionsgeraden deutlich abwichen (vgl. Abb. 41).

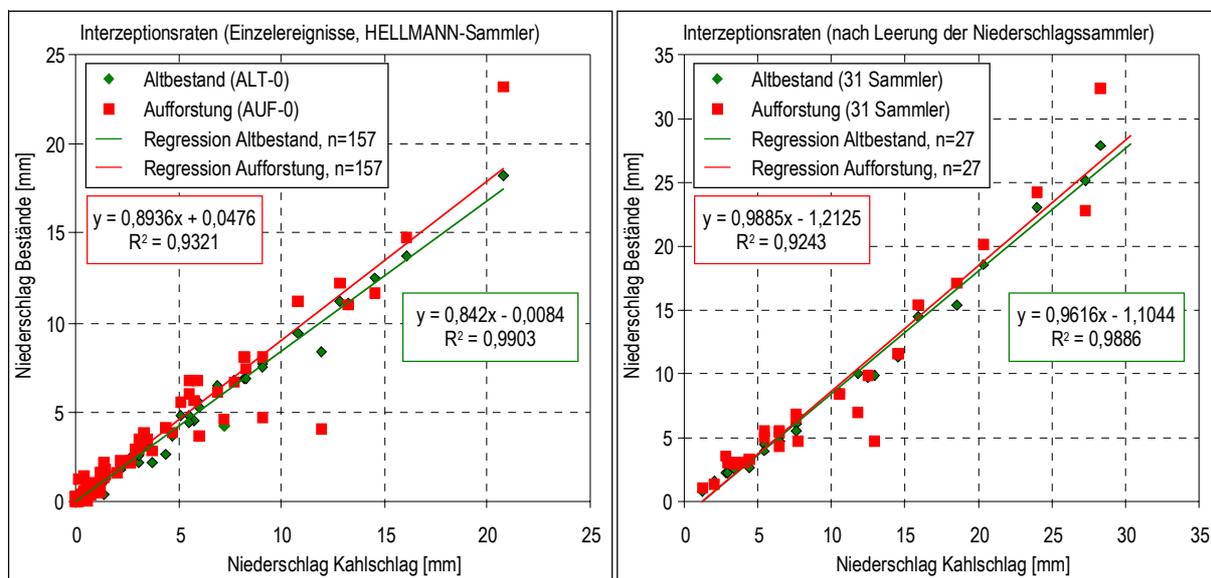


Abb. 41: Interzeptionsraten der Bestände in beiden Messkampagnen (links auf Basis der HELLMANN-Sammler und aller aufgetretenen Niederschlagsereignisse; rechts auf Basis der HELLMANN-Sammler und der 30 Niederschlagssammler unter Maßgabe der Leerungsintervalle)

Die ermittelten Interzeptionsraten lagen im Rahmen der Ergebnisse früherer Untersuchungen, jedoch verwiesen sowohl die eigenen Ergebnisse als auch die Zusammenstellung älterer Messwerte auf ein hohes Maß an Variabilität. SIRÉN (1955) registrierte für einen *Picea*-Bestand in Pelkosenniemi (Nordfinland) Interzeptionsraten zwischen 15 % und 18 %, und PERTTU et al. (1980) ermittelten für einen 60 Jahre alten *Pinus*-Bestand von vergleichbarer Höhe und Dichte wie der Altbestand Interzeptionsraten von 20 %.

SHIKLOMANOV & KRESTOVSKI (1988) zitieren Untersuchungen von KRESTOVSKY (1969) und KRESTOVSKY & SOKOLOVA (1980), in denen für Bestände mit etwa 40 % mittlerer Kronenschlussdichte Interzeptionsraten zwischen 20 % (*Picea*) und 10 % (*Pinus*) bzw. 15 % für Mischbestände angegeben wurden. VENZKE (1990) ermittelte für einen gemischten *Pinus*-/*Picea*-Bestand in Mittelschweden mit Kronenschlussdichten zwischen 50 % und 80 % Raten von 17-20 %. Weitere Waldareale mit höherem Kronenschluss wiesen folgerichtig höhere Interzeptionsverluste auf. Gleiches gilt für die ebenfalls höheren und dichteren Bestände des nördlichen Russlands, in denen Raten von 29-46 % für *Picea*- und 25-30 % für *Pinus*-Bestände dokumentiert sind (BRATSEV & BRATSEV 1979).

#### 4.4.3.3 Potenzielle Evaporation

Ergänzend zur Messung der Niederschlagsverhältnisse wurde auf Grundlage der an den Klimamessstationen erhobenen Parameter die potenzielle Evaporation nach WENDLING et al. (1991) ermittelt (vgl. Kap. 3.1.1). Als Teilaspekt für den Wasserhaushalt einer Fläche stellt die Evaporation neben Niederschlag und dem - nicht erfassten - Abfluss eine quantitativ bedeutsame Größe dar (BAUMGARTNER 1979). Im Rahmen der Untersuchung diente die potenzielle Evaporation jedoch lediglich als Kenngröße für den bodennahen Bereich, da sich die ermittelten Werte auf die Höhe der Messwertgeber bezogen. Diese lag in den Beständen unterhalb des Kronenraums und der mittleren Bestandshöhe, die als Grenzschicht zwischen Wald und Atmosphäre gilt (BAUMGARTNER 1979). Unterhalb dieser Grenzschicht ist generell von einer Reduktion der Evaporation auszugehen, da gegenüber Freiflächen eine deutliche Verminderung der Windgeschwindigkeit verzeichnet werden kann (ODIN 1976). Somit gaben die Werte der potenziellen Evaporation im Altbestand und der Aufforstung nicht die Raten der gesamten Bestände wieder, deren Summe aus Evaporation und Transpiration größer ist als die von Freiflächen mit geringer Vegetation oder Agrarflächen (BAUMGARTNER 1967, SOLANTIE & JOUKOLA 2001). Darüber hinaus liegt die tatsächliche Evaporationsrate in Abhängigkeit von begrenzenden Faktoren wie dem Bodenwasserhaushalt oder der Vegetationsbenetzung in der Regel unter den Werten der potenziellen Evaporation (BAUMGARTNER 1979).

Unter Berücksichtigung der zuvor beschriebenen Zusammenhänge wurden - wenig überraschend - auf der Kahlschlagfläche höhere Evaporationsraten registriert als in den Beständen. Je nach Bezugszeitraum lagen die potenziellen Evaporationsraten der Kahlschlagfläche 63-65 % über den Werten des Altbestands und 45-55 % über denen der Aufforstungsfläche (Abb. 42). Wie in Kapitel 3.1.1 eingehender beschrieben, führte der etwa einwöchige Ausfall des Windgebers im Aufforstungsbestand nur zu geringen Fehleraten und verdeutlichte damit die geringe Windwirkung innerhalb des Bestands (vgl. ODIN 1976). Die Bildung der Bilanzen mit den registrierten Niederschlägen ergab für die Kahlschlagfläche deutlich negative Werte für sämtliche Bezugszeiträume, während in den Beständen je nach Zeitraum entweder geringfügig negative oder minimal positive Verhältnisse zu beobachten waren (Abb. 42). Zwischen den Beständen traten nur geringe Unterschiede auf. Die höhere Rate der potenziellen Evaporation im Aufforstungsbestand wurde durch die größere, den Boden erreichende Niederschlagsmenge überkompensiert, sodass die Bilanzsumme etwas über der des Altbestands lag.

Vergleichbare Untersuchungen zur Evaporation wurden nur in Einzelfällen durchgeführt. In den meisten Fällen erfolgten weitaus detailliertere Analysen zur Erfassung der Evaporation für ganze Waldareale, um deren Gesamtevaporation bzw. -evapotranspiration zu untersuchen (z. B. BRINGFELT 1982, GRELLÉ et al. 1996). Daneben gab es jedoch Messungen mit ähnlichem Ansatz und Messaufbau sowie analogen Ergebnissen, wie den hier vorgestellten. VAARTAJA (1954) führte Messungen zur Evaporation im bodennahen Bereich in Höhen zwischen 0,01 m und 0,4 m durch. Dabei registrierte er ebenfalls höhere Evaporationsraten auf Freiflächen (Flugfeld, alte Brandfläche), die 85-110 % über den Werten eines ausgewachsenen *Picea*-Bestandes lagen. TOLVANEN & KUBIN (1990) ermittelten in einer zweijährigen

Messkampagne bodennahe Evaporationswerte, die im Bestand etwa 50 % der Niederschlagswerte erreichen, während auf einer Kahlschlagfläche eine Rate von 90 % registriert wurde.

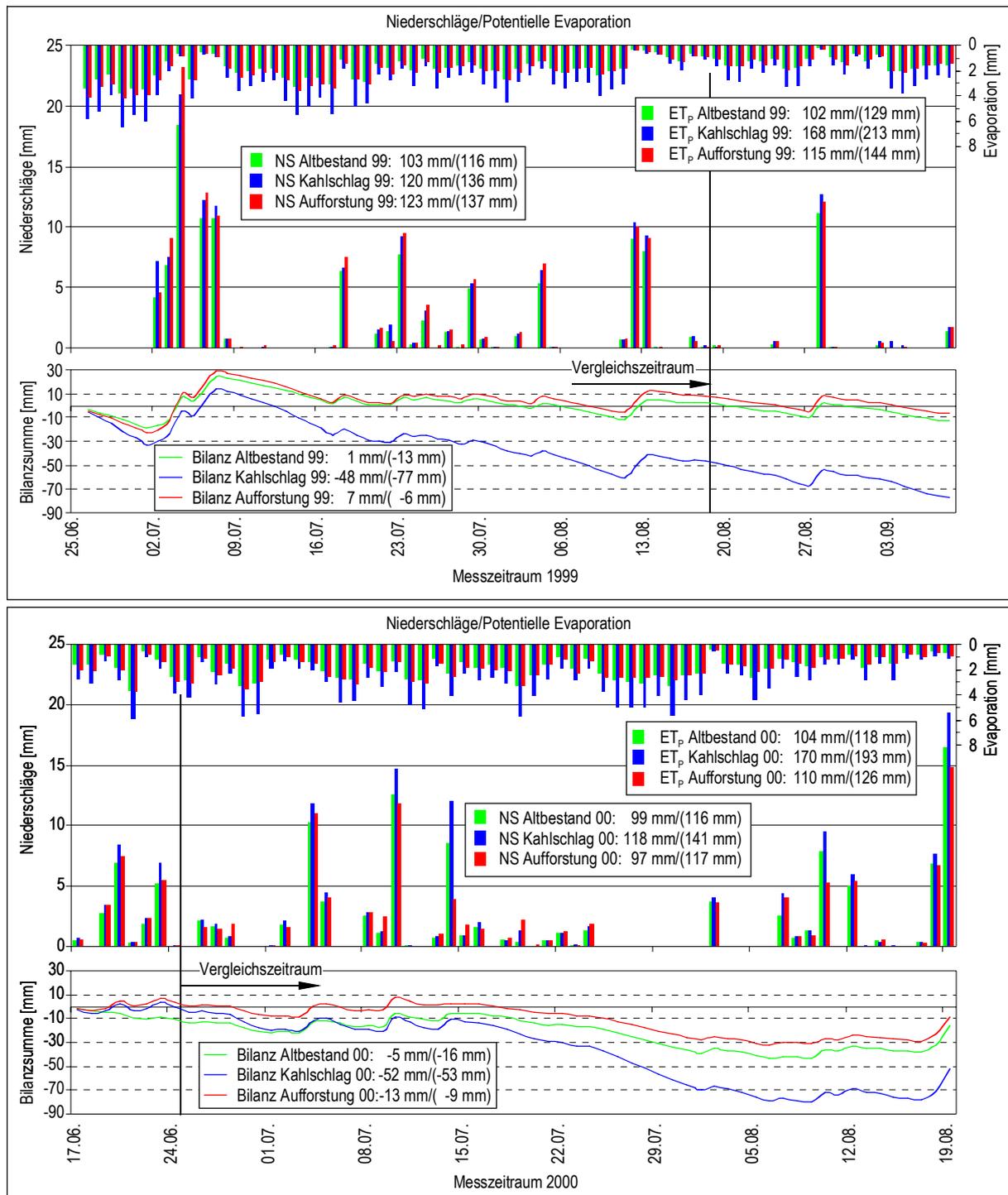


Abb. 42: Niederschläge, potenzielle Verdunstung und Bilanz auf den Versuchsfeldern während der beiden Messkampagnen; Angaben der Legenden in Bezug auf die Vergleichs- und Gesamtzeiträume (in Klammern)

Im zweiten Jahr trat an dieser Stelle eine Evaporationsrate von etwas über 100 % auf und bildete eine negative Bilanz. Der Vergleich der Beträge mit den Ergebnissen dieser Untersuchung ist insofern problematisch, als dass der längere Zeitraum der Messungen von TOLVANEN & KUBIN (1990) das Frühjahr und den Herbst stärker berücksichtigt, in denen die Evaporationsraten geringer sind. In Anlehnung an Ergebnisse von ODIN (1976) verwies auch die Untersuchung von VENZKE (1990) auf Evaporationsraten, die in Beständen etwa 60 % der Freilandwerte entsprachen. Die Tagessummen im zuvor erwähnten

Bestand (vgl. Kap. 4.4.3.2) lagen dabei geringfügig unter den Werten der hier vorgestellten Versuchsbestände, jedoch ist in diesem Zusammenhang auf die unterschiedlichen Messmethoden hinzuweisen (VENZKE 1990).

### Zusammenfassung der Niederschlags- und Feuchteverhältnisse

Zusammenfassend bestätigte die Auswertung der Niederschlagsverhältnisse beider Messkampagnen die Ergebnisse früherer, zum Teil wesentlich detaillierterer Untersuchungen zur Dynamik des Wasserkreislaufs in borealen Waldbereichen und Freiflächen. Der anthropogene Einfluss offenbarte sich in deutlichen Unterschieden der Niederschlagsverteilung, des Interzeptionsverhaltens und der Evaporationswerte der Versuchsflächen. Daneben spiegelten die Werte jedoch auch die nach wie vor bestehende räumliche und zeitliche Problematik von Niederschlagsmessungen wider, sowohl im Hinblick auf den Vergleich mit den Referenzstationen des finnischen Wetterdienstes als auch in der Gegenüberstellung der Versuchsflächen.

Die Unterschiede zwischen den Niederschlagsverteilungen der Versuchsflächen und damit zwischen den Sukzessionsstadien ließen sich mit Hilfe der Niederschlagswerte der beiden Messkampagnen nachvollziehen. Der Wechsel vom Stadium des Altbestands zur Kahlschlagfläche war durch eine Zunahme der den Boden erreichenden Niederschläge von 12 % bis 22 % je nach Messzeitraum und Anzahl der berücksichtigten Messpunkte gekennzeichnet. Durch den fehlenden Kronenraum kam es zu einer Homogenisierung der Niederschlagsverteilung, da Interzeptionsverluste und Abtropfvorgänge entfielen. Für die Einzugsbereiche von Gewässern bedeuten sowohl Einschläge als auch die Ausdünnung von Beständen eine Steigerung der Abflussraten, da diese eine Funktion des Niederschlags, der Evapotranspiration und der Wasserspeicherfähigkeit des Bodens darstellt (ROSÉN 1984, LAGERGREN et al. 2001). Im Gegensatz zum Altbestand können Starkregenereignisse ungehindert bis auf den Oberboden vordringen und im Zusammenhang mit der fehlenden bzw. geringen Bodenvegetation zu Erosionserscheinungen führen, welche die weitere Sukzession zusätzlich verlangsamen. Selbst auf der bereits sieben Jahre alten Kahlschlagfläche des Untersuchungsraums ließen sich derartige Vorgänge an mehreren Stellen beobachten. Längere Trockenphasen können durch die höheren Evaporationsraten einer Kahlschlagfläche ein Gefährdungspotenzial für den Wasserhaushalt einer Fläche darstellen, wenn diese keine ausreichende Bodenwasserversorgung aufweist (NILSSON & ÖRLANDER 1995). Dieser Effekt kann durch eine Reduzierung des Wassertransports von tieferen in höhere Bodenschichten und einer Reduzierung der Bodenfeuchte verstärkt werden (SÖDERSTRÖM 1976). Geeignete Bodenmeliorationsverfahren wirken diesen Effekten jedoch entgegen (vgl. NILSSON & ÖRLANDER 1995, SÖDERSTRÖM 1976, SUTTON 1993). Der Aufforstungsbestand als typische Sekundärform nach einem Einschlag sah sich in seiner aktuellen Altersstruktur von etwa 20 Jahren trotz homogener Bestandsstruktur größeren Schwankungen in der Niederschlagsdynamik unterworfen als der Altbestand. Das galt sowohl für den räumlichen Aspekt in Form höherer Standardabweichungen in der Niederschlagsverteilung als auch einer höheren zeitlichen Variabilität in der Bestandsinterzeption. In den Mittelwerten waren die Unterschiede zum Altbestand hingegen gering.

Die Kombination aus hoher Variabilität von Niederschlägen, ihrer fehlerträchtigen Messung sowie der nur indirekten Messbarkeit weiterer Wasserhaushaltskomponenten wie der Evaporation, Transpiration oder des Abflusses stellen nach wie vor ein großes Problem in der Bestimmung der Wasserbilanz von Flächen dar (vgl. VENZKE 1990). Im Zusammenhang mit dem Einfluss verschiedener Waldsukzessionsstadien mit unterschiedlicher Bestandsart und -dichte sowie ausgesprochen inhomogener Niederschlagsverteilung selbst in homogenen Jungbestandsstrukturen von Aufforstungen erscheint eine flächenhafte Quantifizierung des Wasserhaushalts auf Grundlage kurzzeitiger Messungen wie den hier vorgestellten kaum möglich.

#### 4.4.4 Windverhältnisse

Die *Windverhältnisse* gelten als bedeutende mikroklimatologische Größe für eine Reihe abiotischer Faktoren im Ökosystem. Neben der Grundlage für den Wärmetransport (GEIGER 1961) zeichnen sich die Windverhältnisse für den Transport, Austausch und die Verteilung von Nährstoffen, Pollen, biotischen Materialien sowie Wasser und Gasen verantwortlich (LEE 2000). Darüber hinaus stellen die Windverhältnisse Gefährdungspotenziale in Form von Windbruch oder punktueller Erosion durch hohe Windgeschwindigkeiten dar, die für die Forstwirtschaft hohe Kosten zur Folge haben (TALKKARI et al. 2000). Im Zeitraum von 1975 bis 1985 betrug die Ernteverluste durch Windwurf in Finnland etwa elf Millionen Kubikmeter an einschlagfähigem Holz (LAIHO 1987). Der Betrag relativiert sich im Vergleich zu den Folgen der Ausfälle in Mitteleuropa, wo allein während der Stürme »Lothar« und »Vivian« in den Jahren 1990 und 1999 etwa 120 respektive 180 Millionen Kubikmeter verloren gingen (DOLL 1991a, 1991b zit. in TALKKARI et al. 2000, LÄSSIG & SCHÖNEBERGER 2000). Dass jedoch auch in weit nördlicheren Breiten Sturmereignisse auftreten können, zeigte der Fall des Orkantiefs »Erwin« im Januar 2005. In Schweden wurden Waldbereiche mit ca. 75 Millionen Kubikmeter Nutzholz zerstört, was etwa der Jahresernte des gesamten Landes entspricht (SKOGSSTYRELSEN 2005).

Trotz der vermeintlich geringen absoluten Verlustbeträge stellt sich Windbruch nach Frost und Pilzbefall als substanzieller Schädigungsfaktor für Waldbestände in Finnland dar. Innerhalb Finnlands nimmt seine Bedeutung unter den Gefährdungsdeterminanten nach Norden hin zu (JALKANEN & MATTILA 2000). Entwurzelte bzw. gebrochene Bäume bieten u. U. neue Bruträume für baumschädigende Insekten, die in der Folge zu weiteren Schäden führen können (RAVN 1985, SCHROEDER & EIDMANN 1993). Weiterhin sind die winterlichen Windbedingungen von ökologischer Bedeutung für die Waldbestände in borealen Bereichen, da die mittleren Windgeschwindigkeiten in direktem Zusammenhang mit den winterlichen Schneelasten stehen (SZEICZ et al. 1979, PELTOLA et al. 1997).

Ein Vergleich der Windverhältnisse von Hochland und Tallage war im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich, da von Seiten des finnischen Wetterdienstes keine Winddaten am Oulankajoki erhoben wurden. Möglich war hingegen ein Vergleich der Daten des Flughafens Kuusamo mit den Werten der Versuchsflächen, wobei aus Gründen der Repräsentanz erneut der Kahlschlag als Vergleichsfläche herangezogen wurde. In beiden Messkampagnen lagen die mittleren Windgeschwindigkeiten im Untersuchungsgebiet über den Werten des Flughafens, wobei die Unterschiede im Jahr 1999 deutlicher ausgeprägt waren als im Jahr 2000 (Tab. 15).

Tab. 15: Zusammenfassung ausgewählter Messwerte der Windgeschwindigkeit und -richtung der Versuchsflächen und der Stationen Kuusamo Lentoasema (KL) für die Vergleichs- und Messzeiträume der beiden Messkampagnen

Messwerte der Windgeschwindigkeit und -richtung	Vergleichszeitraum/(Messzeitraum)							
	1999 (25.06.-08.09.)				2000 (17.06.-19.08.)			
	ALT	KAS	AUF	KL	ALT	KAS	AUF	KL
WG [ $\text{ms}^{-1}$ ]	0,7/(0,8)	2,0/(2,1)	0,4/(0,4)	1,2/(1,3)	0,5/(0,6)	1,6/(1,7)	0,3/(0,3)	1,5/(1,6)
WG <sub>max</sub> [ $\text{ms}^{-1}$ ]	3,9/(5,0)	8,3/(10,8)	3,0/(4,0)	n.v./(n.v.)	3,9/(3,9)	7,0/(7,8)	3,1/(3,3)	n.v./(n.v.)
WG <sub>dmax</sub> [ $\text{ms}^{-1}$ ]	1,6/(2,8)	3,4/(5,9)	1,0/(1,9)	2,4/(3,7)	1,1/(1,7)	2,7/(3,6)	0,7/(0,9)	3,9/(3,9)
WG < 0,5 $\text{ms}^{-1}$ [%]	36/(35)	4/(4)	67/(65)	9/(2)	48/(46)	10/(9)	69/(66)	11/(10)
WR <sub>prim</sub> [°]	n.g./(n.g.)	SW/(SW)	SW/(SW)	W/(W)	n.g./(n.g.)	NE/(ENE)	SSW/(SSW)	E/(E)
WR <sub>sek</sub> [°]	n.g./(n.g.)	WSW/(WSW)	SSW/(SSW)	WSW/(SW)	n.g./(n.g.)	ENE/(NE)	SSE/(S)	ENE/(ENE)

Mittlere Windgeschwindigkeiten (WG), absolute Maxima (WG<sub>max</sub>), höchste Tagesmittel (WG<sub>dmax</sub>), Anteil der Calmen (WG < 0,5  $\text{ms}^{-1}$ ) sowie der primären (WR<sub>prim</sub>) und sekundären Windrichtungen (WR<sub>sek</sub>) im Vergleichszeitraum und im Messzeitraum (in Klammern)

Für die Tage mit den höchsten absoluten Windgeschwindigkeiten lagen keine Werte des Flughafens vor, sodass an dieser Stelle kein Vergleich möglich war. Bemerkenswert sind jedoch auch die Unterschiede in den Mittelwerten der beiden Messkampagnen. Während auf den drei Versuchsflächen im Jahr 2000 geringere Werte als im Vorjahr gemessen wurden, waren die Verhältnisse am Flughafen umgekehrt. Diese Tatsache ist auch deshalb ungewöhnlich, da der Anteil an Calmen im Jahr 2000 an beiden Standorten größer war als 1999.

Wie bereits im Zusammenhang mit den Niederschlägen ausgeführt, unterschieden sich die beiden Messkampagnen erheblich in der Herkunft der Luftströmungen. Gegenüber dem Sommer 1999 waren die Hauptwindrichtungen während des Folgejahrs diametral entgegengesetzt. Während im Messzeitraum des Jahres 1999 westliche bis südwestliche Windrichtungen dominant waren, herrschten im Jahr 2000 primär östliche bzw. nordöstliche Winde vor (Abb. 43).

In beiden Messreihen waren die Hauptwindrichtungen der Kahlschlagfläche etwa  $20^\circ$  bis  $40^\circ$  gegenüber den Werten der des Flughafens verschoben, sodass 1999 auf dem Flughafen primär westliche und auf der Kahlschlagfläche stärker südwestliche Winde dominierten und im Jahr 2000 statt eines östlichen Maximums ein nordöstliches bis ostnordöstliches auftrat (Vgl. Abb. 43 bzw. Abb. 74). Die Unterschiede zwischen Vergleichs- und Gesamtzeiträumen waren marginal.

Die Unterschiede zwischen den Versuchsflächen waren primär durch Unterschiede in den Windgeschwindigkeiten als Folge der Windbremsung der Bestände bestimmt (vgl. NÄGELI 1954, ODIN 1976). Im Altbestand erfolgte eine Reduzierung der mittleren Windgeschwindigkeiten je nach Bezugszeitraum auf etwa 31 % bis 38 % und im Aufforstungsbestand auf 18 % bis 20 % der Kahlschlagwerte. Die größere Bestandsdichte und die geringere Höhe, verbunden mit dem tiefer reichenden Kronenraum führten offensichtlich im Aufforstungsbestand zu einer derart effektiven Windreduktion, dass in 65 % bis 69 % der jeweiligen Bezugszeiträume keine oder nur geringe Windgeschwindigkeiten (Calmen  $< 0,5 \text{ ms}^{-1}$ ) gemessen wurden. Im lichterem und heterogenerem Altbestand waren noch 35 % bis 48 % der Zeiträume nahezu windstill, während auf der Kahlschlagfläche lediglich in vier bis zehn Prozent der Zeiträume Calmen zu verzeichnen waren.

Die bereits zuvor beschriebenen Gegensätze in den Windverhältnissen der beiden Messkampagnen wirkten sich auch auf die Unterschiede zwischen den Flächen aus. So war die Abnahme der Windgeschwindigkeiten zwischen den Vergleichszeiträumen im Hinblick auf die absoluten Beträge auf der Kahlschlagfläche größer als in den Beständen (Tab. 15). Eine Folge der geringeren Werte war ein Anstieg der Zeiträume mit Calmen um 169 % auf der Kahlschlagfläche, während im ohnehin abgeschirmten Aufforstungsbestand nur ein minimaler Zuwachs von 3,3 % verzeichnet wurde. Im Altbestand stieg der Calmenanteil um 32 %. Ein bemerkenswerter Einfluss der Bestandsstruktur auf die Windgeschwindigkeiten in Abhängigkeit von der Windrichtung im Aufforstungsbestand zu beobachten. Die geringeren Windgeschwindigkeiten der Messkampagne 2000 verbunden mit den primär nordöstlichen Windrichtungen ließen sich nur auf der Kahlschlagfläche messen, nicht jedoch im dichten Bestand der Aufforstungsfläche. Hier wurden während dieser Zeiträume Calmen registriert, sodass sich in der Summe der Messungen in diesem Bestand ein südsüdwestliches Maximum zeigte. Einen vergleichbaren Effekt offenbarten auch die Werte des Altbestandes, obwohl vor Ort kein Windrichtungsgeber installiert war.

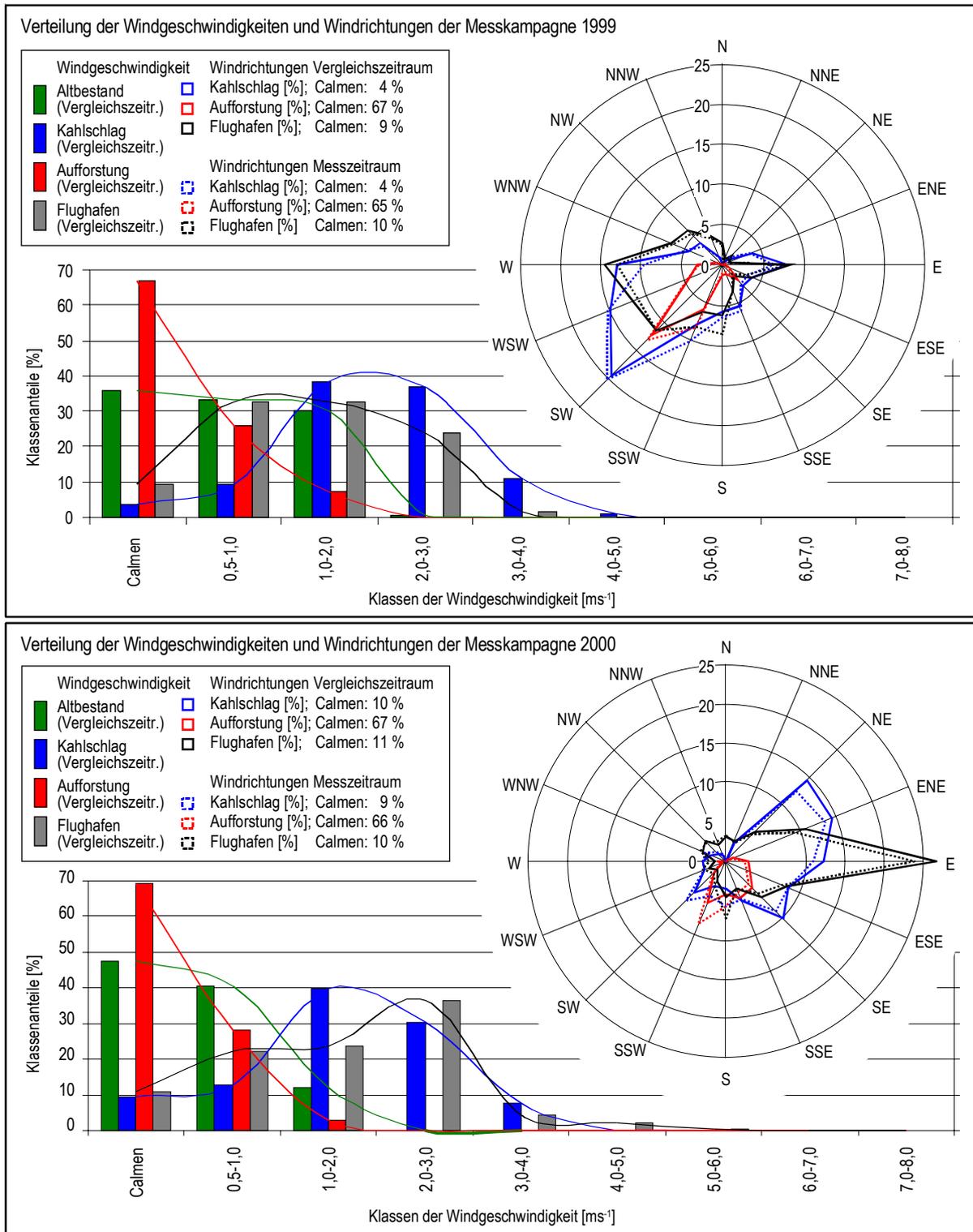


Abb. 43: Verteilung der Windgeschwindigkeiten auf den Versuchsfächen und der Referenzstation Kuusamo Lentoasema (KL) (umgerechnet auf 2 m Höhe) während der Vergleichszeiträume sowie die Verteilung der Windrichtungen auf den Versuchsfächen Kahl Schlag, Aufforstung und der Referenzstation Kuusamo Lentoasema während der Vergleichszeiträume und der Gesamtzeiträume

Ein Vergleich der Verteilungen der Windgeschwindigkeitswerte auf Basis einer linearen Regression zeigte zwei unterschiedliche Beziehungen der Windgeschwindigkeiten im Altbestand gegenüber den Werten der Kahl Schlagfläche, die besonders während der Messkampagne des Jahres 2000 hervortraten (Abb. 44).

Tatsächlich traten bei jeweils gleichen Windgeschwindigkeiten auf der Kahl Schlagfläche im Fall westlicher bis südöstlicher Lagen höhere Werte im Bestand auf als unter nördlichen bis östlichen

Windrichtungen. Dass die primären nordöstlichen Strömungen im Sommer 2000 weniger dominant waren als die westlichen im Vorjahr, spiegelte sich entsprechend in einem geringeren Korrelationskoeffizienten zwischen den Windgeschwindigkeiten der Kahlschlagfläche und der Bestände wider. Besonders für die Verhältnisse des Altbestands zeigte die Regressionsgerade keine sinnvolle Entsprechung für die Verhältnisse (Abb. 44).

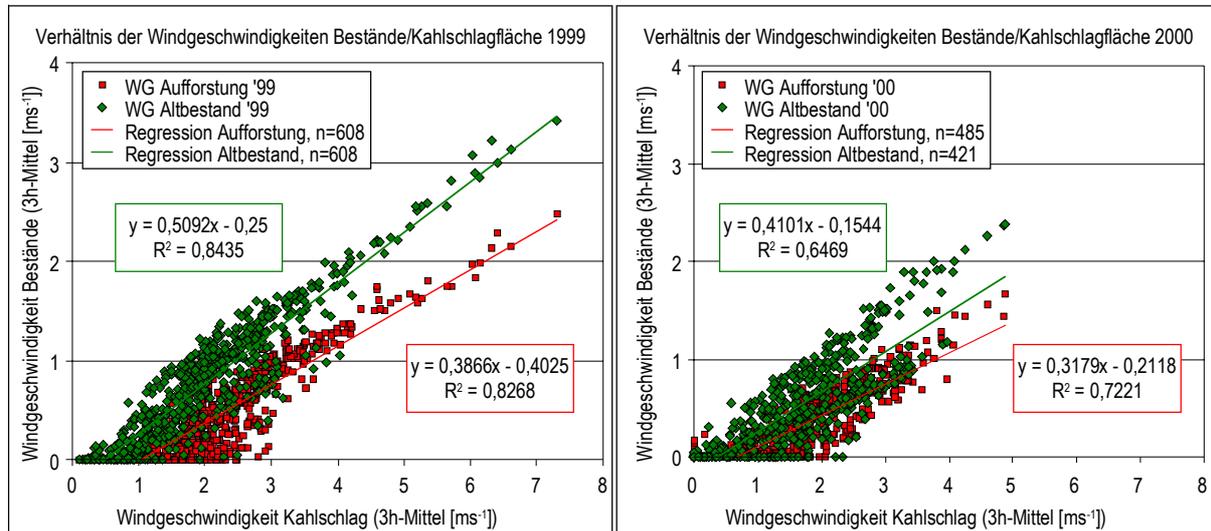


Abb. 44: Verhältnis der Windgeschwindigkeiten in den Beständen zu denen der Kahlschlagfläche während der beiden Messkampagnen (lineare Regressionen)

### Zusammenfassung der Windverhältnisse

Zusammenfassend bestätigten die beobachteten Windverhältnisse und die Unterschiede zwischen den Versuchsflächen die Befunde früherer Untersuchungen. Bemerkenswerterweise sind für die Region sogar vergleichbare Gegensätze zwischen den primären Windrichtungen in zwei aufeinander folgenden Jahren dokumentiert. In den bereits zuvor zitierten Untersuchungen von SIRÉN (1955) im Norden Finnlands wurden 1950 Windrichtungen aus östlichen, südlichen und südwestlichen Richtungen in 70 % des Messzeitraums registriert, während im Folgejahr Winde aus Südosten, Süden und Westen dominierten. Die Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit in Beständen von deren Struktur und der primären Windrichtung wurde darüber hinaus von SZEICZ et al. (1979) festgestellt.

Beide in dieser Arbeit vorgestellten Messkampagnen waren, wie einleitend beschrieben, durch relativ geringe Windgeschwindigkeiten geprägt. Die stärksten während der Messkampagnen registrierten Böen von  $10,8 \text{ ms}^{-1}$  blieben unterhalb der Werte von  $14\text{--}15 \text{ ms}^{-1}$ , die zu Schäden wie Windbruch oder Windwurf führen können (RAITIO 2000, TALKKARI et al. 2000). Entsprechende Schäden, wie sie besonders an exponierten Waldrändern z. B. an Kahlschlagflächen auftreten, wurden folgerichtig nicht beobachtet. Ältere Messwerte des Flughafens Kuusamo zeigen jedoch, dass auch im Untersuchungsraum mit derartigen Werten gerechnet werden muss (HEINO & HELLSTEIN 1983, KOUTANIEMI 1983, NCDC 2000). Bezogen auf einen Standort treten in Finnland etwa alle zehn Jahre schädigende Windgeschwindigkeiten während der frostfreien Zeit auf (SOLANTIE 1998). Eine weitere Gefährdung durch Wind ist in Form von Erosion auf Freiflächen ohne oder mit nur spärlicher Vegetation denkbar. Ausgehend von dem auf den Versuchsflächen anstehenden Mineralboden ist bei fehlender Krautschicht und längerer Trockenheit ab Windgeschwindigkeiten von etwa  $4,0 \text{ ms}^{-1}$  bis  $4,5 \text{ ms}^{-1}$  Winderosion denkbar (vgl. THIERMANN 2000, KÜNKEL et al. 2001). Entsprechend hohe Windgeschwindigkeiten wurden 1999 auf der Kahlschlagfläche während 107 Stunden (Stundenmittel) und im Jahr 2000 im Zeitraum von 23 Stunden gemessen. Derartige Werte traten jedoch nicht während längerer Trockenphasen auf, sodass Winderosionsvorgänge nicht zu beobachten waren. In den Beständen wurden vergleichbare Windgeschwindigkeiten nur in einzelnen

Böen erreicht, darüber hinaus war im Altbestand eine geschlossene und im Aufforstungsbestand eine verbreitete Krautschicht vorhanden.

Letztendlich äußerten sich die Wirkungen von Windgeschwindigkeit und -richtung weniger durch die einleitend beschriebenen Gefährdungspotenziale als vielmehr durch ihren Einfluss auf andere Klimaparameter, was sich in der häufigen Nennung in den vorhergehenden Kapiteln widerspiegelt. Ohne erneut auf die Einzelheiten einzugehen, sei in diesem Zusammenhang der überregionale Einfluss von Luftströmungen auf die Minimalwerte der bodennahen Temperaturen in Tal- oder Höhenlagen und auf die Niederschlagsverteilung während der Messkampagnen verwiesen. Mikroklimatologisch waren die Windgeschwindigkeiten wirksam über ihren Einfluss auf das Interzeptionsverhalten der Bestände und die potenzielle Evaporation sowie - besonders bedeutsam - durch ihr Fehlen und somit auf die Ausbildung von Nachtfrösten. Das Zusammenspiel strahlungsreicher, windarmer Wetterlagen und den in der Regel in den Nacht- und Morgenstunden auftretenden Windminima war eine wesentliche Grundlage für Frostbedingungen. Um den Wärmetransport über Luftbewegungen in Bodennähe soweit zu reduzieren, dass Frostbedingungen auftreten konnten, durften auf der Kahlschlagfläche in einer Höhe von zwei Metern Windgeschwindigkeiten von  $1,0 \text{ ms}^{-1}$  nicht überschritten werden. In den Beständen waren Frostwetterlagen mit noch geringeren mittleren nächtlichen Windgeschwindigkeiten verbunden. In Frostnächten traten höchstens  $0,7 \text{ ms}^{-1}$  im Altbestand auf, und in der Aufforstung wurden in keinem Fall Windbewegungen registriert. Abbildung 45 fasst die mittleren nächtlichen Windgeschwindigkeiten (Sonnenstand  $\leq 0^\circ$ ) der Messkampagnen zusammen.

Die während der Messkampagnen beobachteten Unterschiede der Windgeschwindigkeiten zwischen den Versuchsflächen folgten ebenfalls den Ergebnissen analoger Untersuchungen früherer Jahre, jedoch hingen die Beträge von der Größe der Flächen sowie der Dichte, Höhe und Zusammensetzung der Bestände ab. Der Anstieg der mittleren Windgeschwindigkeiten nach einem Einschlag hier repräsentiert durch den Unterschied zwischen Altbestand und Kahlschlag um den Faktor 3,2 bis 3,8 lag im Rahmen des von ODIN (1979) dokumentierten Anstiegs der Werte um den Faktor zwei bis sechs. Im Zusammenhang mit der großen Bestandsdichte der Aufforstung erscheinen die je nach Bezugszeitraum 5,8 bis 6,8fach geringeren Mittelwerte gegenüber der Kahlschlagfläche ebenfalls plausibel. Die von TOLVANEN & KUBIN (1990) gemessenen, bis zu zehnfach höheren Werte einer Kahlschlagfläche dürften auf die deutlich größeren Versuchsflächen zurückzuführen sein. Selbst in 30 m Entfernung zum Referenzbestand traten dort noch sechs bis siebenfach höhere Werte auf. Tabelle 16 fasst die Windverhältnisse der drei Versuchsflächen generalisiert zusammen.

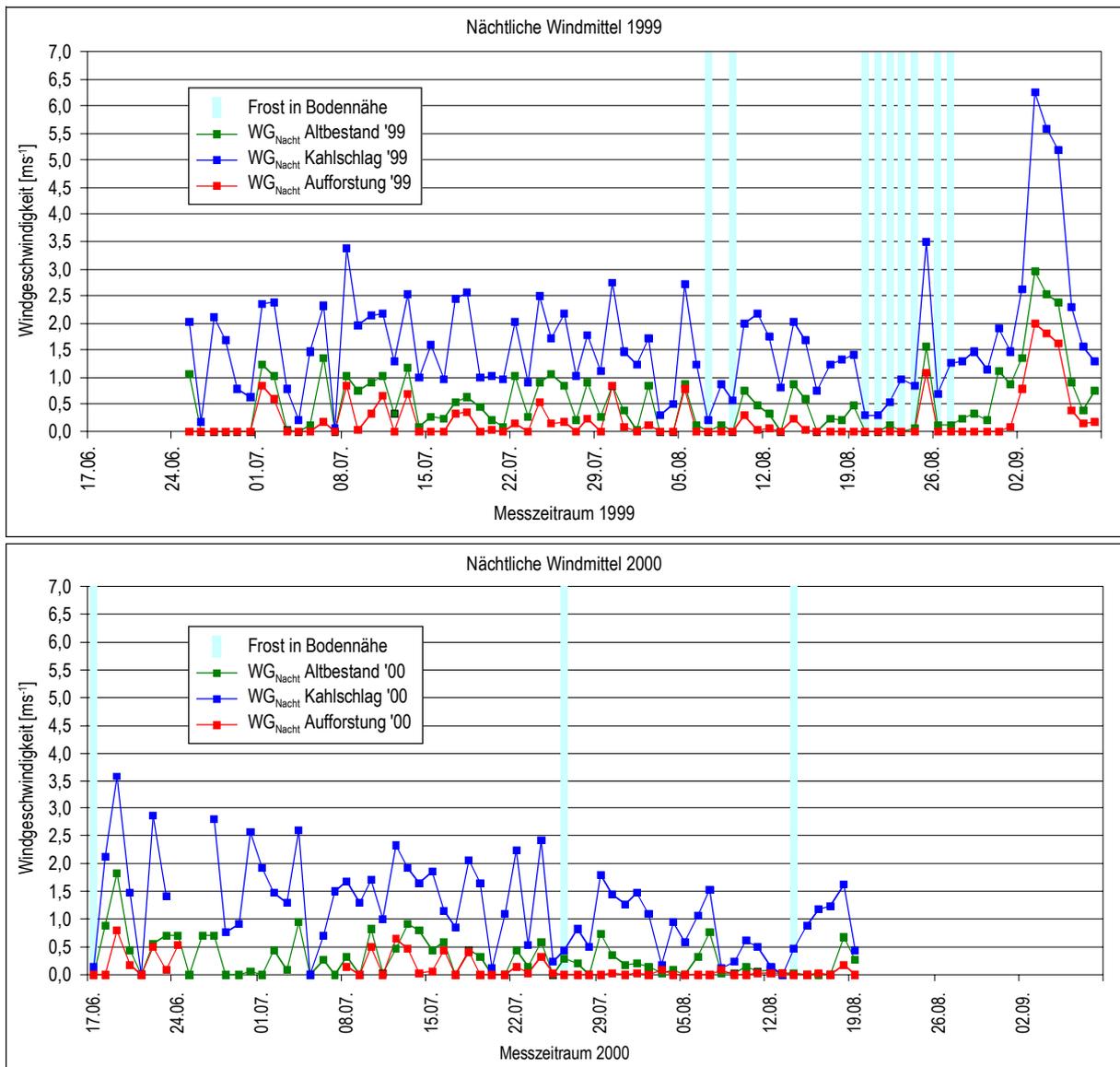


Abb. 45: Mittlere nächtliche Windgeschwindigkeiten auf den Versuchsflächen und aufgetretene Frostwetterlagen während der beiden Messkampagnen; Darstellung der Frostwetterlagen in Bezug auf das Auftreten von Frost auf mindestens einer der Flächen

Tab. 16: Generalisierte Windverhältnisse auf den Versuchsflächen

	Altbestand	Kahlschlag	Aufforstung
Bestandsdichte [Bäume ha <sup>-1</sup> ]	972	152	2588
mittlere Bestandshöhe [m]	7,1	4,7	4,7
mittlerer Kronenschluss [%]	47	9	49
mittl. Windgeschwindigkeit	-	++	--
max. Windgeschwindigkeit	-	++	--
Tagesmax. der WG	-	++	--
Einfluss d. WR auf d. WG	+	--	+

## 4.5 Ausgewählte Wetterlagen

Zur weiteren mikroklimatologischen Differenzierung der Versuchsflächen wurden neben den saisonalen Unterschieden die Eigenschaften während besonderer Wetterlagen untersucht. Unter besonderen Wetterlagen sind hier austauscharme, strahlungsreiche Bedingungen zu verstehen, in deren Verlauf mikroklimatologische Unterschiede besonders hervortreten (vgl. GROSS 1985, DUTTMANN & MOSIMANN

1994, KÖNIG 1995). Wie bereits beschrieben, bilden derartige Wetterlagen im Zusammenhang mit kalten Luftmassen häufig die Grundlage für Frostbedingungen während der Vegetationsperiode (OTTOSON-LÖFVENIUS & GRANBERG 1993).

Frostwetterlagen in Verbindung mit durchgehenden Ein- bzw. Ausstrahlungsbedingungen wurden im Verlauf der Messungen lediglich an einem Tag beobachtet, jedoch traten sämtliche bodennahe Fröste unter Bedingungen auf, die näherungsweise einer Strahlungswetterlage entsprachen. Abbildung 46 zeigt eine Übersicht der aufgetretenen Strahlungs- und Frostwetterlagen zusammen.

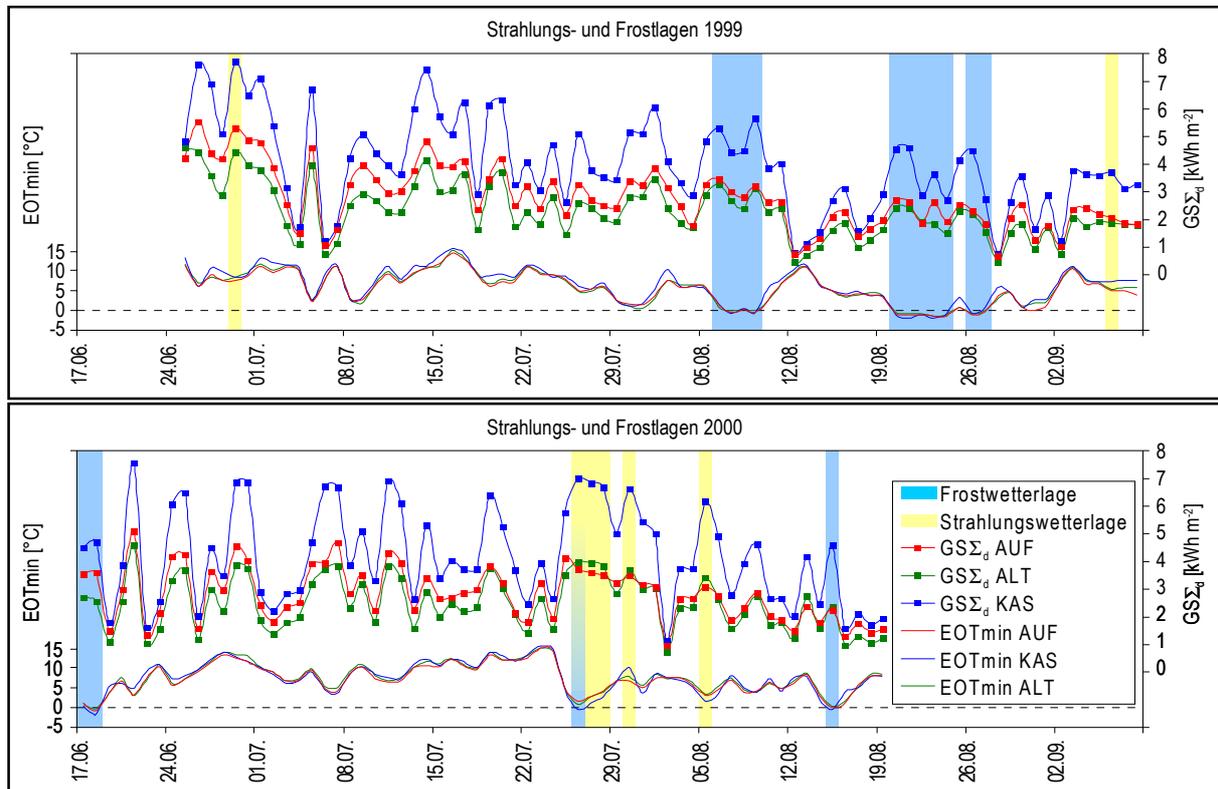


Abb. 46: Strahlungswetterlagen und Frostlagen während der Messungen 1999 und 2000 sowie Tagessummen der Globalstrahlung ( $GS\Sigma_d$ ) und Minimalwerte der Erdoberflächentemperatur (EOTmin)

#### 4.5.1 Strahlungswetterlagen

Strahlungswetterlagen in »idealer« Ausprägung weisen neben einem bewölkungsfreien Himmel einen durch Calmen geprägten Tagesverlauf auf (GEIGER 1961, KÖNIG 1995). Im Verlauf der Messkampagnen konnten im Jahr 1999 immerhin an zwei Tagen und im Folgejahr an vier Tagen ununterbrochen wolkenlose Bedingungen registriert werden, jedoch lagen die Windgeschwindigkeiten an keinem der Tage durchgehend unter  $0,5 \text{ ms}^{-1}$ . Die Auswahl der folgenden Strahlungswetterlagen ergab sich somit aus den Tagen mit den geringsten mittleren Windgeschwindigkeiten und der Strahlungswetterlage vom 26.7. bis 28.7.2000, in der bodennahe Frostbedingungen gemessen wurden.

##### 4.5.1.1 Strahlungswetterlage vom 26.7 bis 28.7.2000

Ein Hochdruckgebiet über Nord- und Mittelskandinavien (Abb. 47) führte vom 26.7. bis 28.7. in Lappland und den südlich angrenzenden Gebieten zu wolkenlosem Himmel (DWD 2000a, 2000c). Die Hochdruckbedingungen hielten bei stetig abnehmendem Luftdruck bis zum 30.7. an, wobei die idealen Strahlungsbedingungen am 29.7. durch Quellbewölkung unterbrochen wurden.

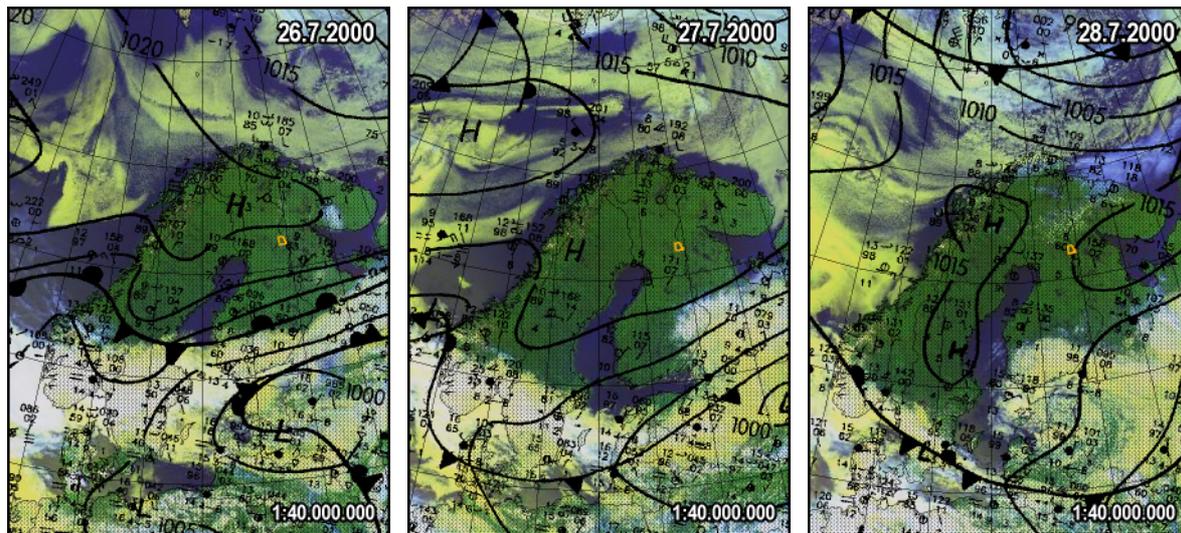


Abb. 47: Ausschnitte der Bodenwetterkarten 26.-28.7.2000 (DWD 2000a, b, c; verändert) und Verteilung der Bewölkung: AVHRR-Falschfarbszenen vom 26.-28.7.2000 (DUNDEE SATELLITE RECEIVING STATION 2000a, b, c; verändert); Untersuchungsraum orangefarben abgegrenzt.

### Strahlungsverhältnisse vom 26.7 bis 28.7.2000

Einer Strahlungswetterlage gerecht werdend, registrierten die Pyranometer auf den drei Versuchstandorten überdurchschnittlich hohe tägliche Summen der *Globalstrahlung*, verbunden mit nahezu identischen Tagesverläufen. Am Beispiel der Kahlschlagfläche zeigt Abbildung 48 die ungestörten Strahlungsbedingungen zwischen Sonnenaufgang und -untergang. Die einzige Ausnahme bildete eine systematische kurzfristige Beschattung durch Horizontüberhöhung gegen 5:20 Uhr. Die Werte der Bestände gaben darüber hinaus indirekt Aufschluss über die Strahlungsbedingungen, da die Einstrahlungs- und Beschattungsphasen während der drei Tage ebenfalls identisch waren.

Die Tagesgänge waren aufgrund des Zeitpunktes der Wetterlage im Spätsommer durch etwas kürzere Tages- und längere Nachtzeiträume gekennzeichnet als im Mittel des Vergleichszeitraums. Nach Sonnenaufgang und dem Überschreiten der Horizontüberhöhung der jeweiligen Flächen durch die Sonne stiegen die Globalstrahlungswerte deutlich schneller an als im Durchschnitt. Auf der Kahlschlagfläche lag das Drei-Tagemittel etwa 61 % über dem Durchschnittswert des Vergleichszeitraums, und in den Beständen traten 57 % (Altbestand) bzw. 28 % (Aufforstung) höhere Werte auf. Im Verlauf der Tage wurden, nach dem 21.6., die höchsten Tagesmittel bzw. -summen auf der Kahlschlagfläche und im Altbestand während der Messkampagne 2000 gemessen (Abb. 46). Unter den wolkenlosen Bedingungen mit ihrem entsprechend hohen Anteil direkter Einstrahlung erwies sich die Strahlungsschwächung der Kronenräume während der Beschattungsphasen als besonders effektiv. Besonders im Aufforstungsbestand, in dem während der besonders strahlungsreichen Mittagstunden längere Beschattungen des Gebers zu verzeichnen waren, führte das zu deutlich geringeren Transmissionsraten als im Mittel der Referenzzeiträume und erklärt den geringeren Anstieg der Tagessummen im Vergleich zu den beiden anderen Flächen.

Die Messwerte der *Strahlungsbilanz* waren im Verlauf der Strahlungswetterlage durch höhere Amplituden und einen analog zu den Globalstrahlungswerten annähernd identischen Tagesverlauf der drei Tage gekennzeichnet (Abb. 48). Die höchsten Tagesmittel wurden auf der Kahlschlagfläche gemessen. Allerdings fiel der Anstieg der Werte gegenüber dem Durchschnitt des Vergleichszeitraums mit 54 % geringer aus als in den Beständen, in denen die Werte um 80 % (Altbestand) bzw. 61 % (Aufforstung) zunahmen. Als Ursachen können die höheren Werte der Albedo und der langwelligen Ausstrahlung auf der Kahlschlagfläche während des Tages und die höhere nächtliche Ausstrahlung angenommen werden (Abb. 48).

Das in Kapitel 3.1.1 beschriebene Phänomen der »Sonnenflecken« war unter den Bedingungen der Strahlungswetterlage besonders ausgeprägt und führte zu hohen, wenn auch kurzzeitigen »Fehlerwerten« in den Beständen. Im Altbestand traten so in den Mittagsstunden Pseudoausstrahlungswerte von bis zu  $69 \text{ Wm}^{-2}$  auf, und im Aufforstungsbestand wurden  $90 \text{ Wm}^{-2}$  erreicht (Abb. 48). Der Natur des »Fehlers« entsprechend traten auf der Kahlschlagfläche keine negativen Bilanzen während der Einstrahlungsphasen auf.

In den Nachtstunden erlaubte der wolkenlose Himmel auf allen Versuchsflächen eine etwa doppelt so hohe Ausstrahlung wie im Durchschnitt des Vergleichszeitraums. Erwartungsgemäß registrierten die Geber die höchsten Werte auf der Kahlschlagfläche, deren mittlere Ausstrahlung zwischen Sonnenuntergang und -aufgang etwa dem zweifachen Wert des Altbestands entsprach und 56 % über dem Bilanzwert der Aufforstung lag. Im Verlauf der nächtlichen Ausstrahlung konnten bemerkenswerte Unterschiede zwischen den Versuchsflächen beobachtet werden. In Folge der vegetationsbedingten Horizontüberhöhung wechselten die Bilanzwerte der Bestände in den Abendstunden bereits bei einem Sonnenstand von etwa  $15^\circ$  innerhalb weniger Minuten von einem noch recht hohen Niveau in den negativen Wertebereich. Erst etwa zwei Stunden später, bei einem Sonnenstand von  $6^\circ$  überwog die Ausstrahlung auch auf der Kahlschlagfläche, wobei die Werte langsamer, aber auf geringere Werte absanken. Die nächtlichen Minimalwerte wurden jeweils ein bis zwei Stunden später erreicht. In den Beständen wurde die Ausstrahlung durch die Eigen- bzw. Gegenstrahlung des Kronenraums - welche sich als Temperaturunterschied gegenüber dem wolkenlosen Himmel ausdrückte - kompensiert. Die Werte sanken dadurch weniger stark ab als auf der Kahlschlagfläche (BAUMGARTNER 1952, GRANBERG et al. 1993). In den Morgenstunden überwog auf der Kahlschlagfläche ab einem Sonnenstand von etwa  $7\text{-}9^\circ$  wieder die Einstrahlung, während in den Beständen noch etwa drei Stunden länger eine negative Bilanz zu verzeichnen war. Erst bei einem Sonnenstand von fast  $20^\circ$  wurden durchgängig positive Werte registriert.

#### Temperaturverhältnisse vom 26.7 bis 28.7.2000

Das Temperaturregime in Form von *Lufttemperatur*, *Erdoberflächentemperatur* und *Bodentemperatur* war im Verlauf der Strahlungswetterlage durch überdurchschnittlich hohe Gegensätze zwischen Tag und Nacht gekennzeichnet. Während der drei Tage war ein kontinuierliches Ansteigen der Mittel- und Extremwerte zu beobachten (Abb. 48). Zu Beginn der stabilen Wetterlage etablierten sich bei annähernd windstillen Bedingungen in den Nachtstunden des 25./26.7. Lufttemperaturen von unter  $5^\circ\text{C}$ , ohne dass jedoch Frostwerte auftraten (Tab. 17). In Bodennähe sanken die Temperaturen auf der Kahlschlagfläche jedoch auf  $-0,6^\circ\text{C}$  ab, während die der Bestände im positiven Bereich blieben. Der Anstieg des Temperaturniveaus in den Folgetagen verhinderte weitere nächtliche Frostwerte. In der Tallage des Oulankajoki traten mit  $2,0^\circ\text{C}$  ähnlich geringe Lufttemperaturen auf wie im Bereich der Versuchsflächen, dagegen blieb der bodennahe Bereich mit  $1,5^\circ\text{C}$  frostfrei. Am 40 km entfernt gelegenen Flughafen Kuusamo wurden die Bedingungen der Strahlungswetterlage verzögert wirksam, hier fielen die Lufttemperaturen am 26.7. nicht unter  $5,9^\circ\text{C}$ , jedoch sanken sie am Folgetag auf  $2,9^\circ\text{C}$ . Daten über die Erdoberflächentemperaturen lagen nicht vor. Am 28.7., dem letzten der drei Strahlungstage, kam es zu den höchsten Tagesmaxima an allen Standorten (Tab. 17, Abb. 48). Mit  $22,2^\circ\text{C}$  blieb das Temperaturmaximum in Kuusamo hinter den  $24,5^\circ\text{C}$  am Kiutakongäs und den Höchstwerten der Versuchsflächen zurück.

Wie einleitend erwähnt, zeichneten sich die Tage der Strahlungswetterlage durch überdurchschnittlich hohe Tagesamplituden aus, wobei analog zu den Referenzzeiträumen die höchsten Gegensätze im dichten Aufforstungsbestand auftraten, während die geringsten auf der Kahlschlagfläche gemessen wurden. Über die Werte der Lufttemperaturen war der laterale Wärmetransport durch Wind erkennbar, der bestandsabhängig auf der Kahlschlagfläche am stärksten ausgeprägt war.

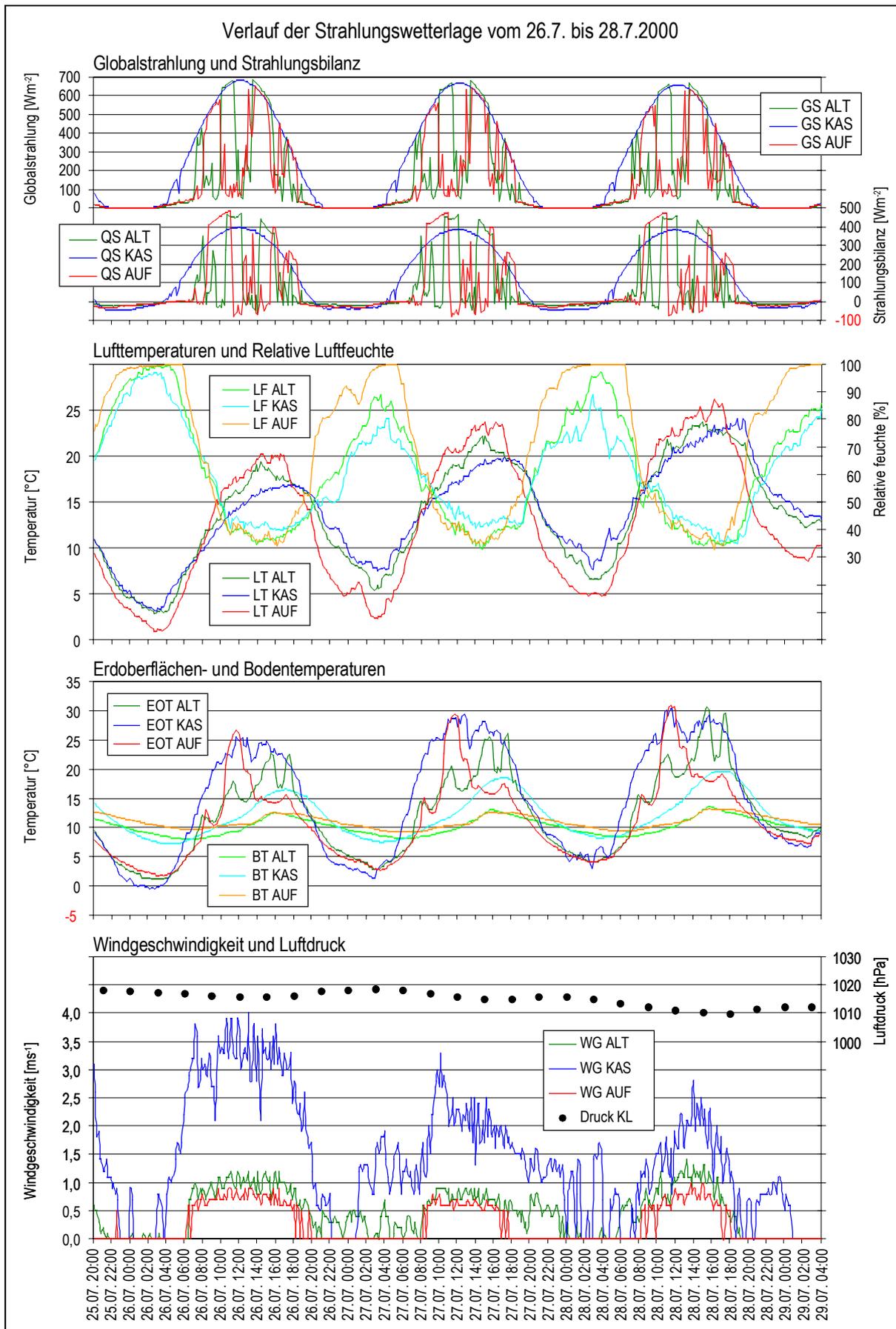


Abb. 48: Verlauf der Strahlungswetterlage vom 26.7. bis 28.7.2000 an den Standorten Altbestand (ALT), Kahlschlag (KAS) und Aufforstung (AUF); Luftdruckwerte der Station Kuusamo Lentoasema (KL)

In Bodennähe waren die Temperaturamplituden erheblich stärker durch den Boden als Strahlungsumsatzfläche geprägt, zumal die Wirkung des Windes eine geringere Bedeutung hatte. In den Beständen hatte dies zur Folge, dass es nur in Phasen direkter Einstrahlung eine Erwärmung der Bodenoberfläche auf das Niveau der Kahlschlagfläche kam (Abb. 48). Entsprechend blieben die Tagesmittelwerte der Bestände trotz gleicher Maximalwerte und höherer Minima hinter denen der Kahlschlagfläche zurück. Die Bodentemperaturen der drei Versuchsflächen waren am 27.7. bzw. 28.7. durch die höchsten Tagesamplituden der Messkampagnen 2000 gekennzeichnet, auch wenn die Veränderungen entsprechend der Wärmeleitenden Eigenschaften des Bodens weniger stark ausgeprägt waren als die der Luft- und Erdoberflächentemperaturen (GEIGER 1961, HÄCKEL 1999). Die größten Gegensätze traten auf der Kahlschlagfläche auf und waren primär auf die Erwärmung durch die ungehinderte Einstrahlung zurückzuführen, auch wenn auf der Fläche die größte nächtliche Auskühlung verzeichnet wurde. Die geringsten Werte lagen auf allen Flächen über 8 °C, sodass zu keinem Zeitpunkt Frostwerte auftraten.

Tab. 17: Ausgewählte Messwerte der Strahlungswetterlage vom 26.7. bis 28.7.2000

Messwert	ALT	KAS	AUF	Messwert	ALT	KAS	AUF
GSm [Wm <sup>-2</sup> ]	164	285	151	WG [ms <sup>-1</sup> ]	0,5	1,5	0,3
GSΣ [kWhm <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup> ]	3,9	6,9	3,6	WGmax [ms <sup>-1</sup> ]	1,9	5,9	1,5
GS [h]	19,0	19,6	19,5	WRm [°]	-	107	129
QSm [Wm <sup>-2</sup> ]	78	155	74	EOTm [°C]	12,4	15,3	11,6
QS'm [Wm <sup>-2</sup> ]	102	155	102	EOTmax [°C]	31,0	31,0	31,2
QS'm <sub>Tag</sub> [Wm <sup>-2</sup> ]	106	205	107	EOTmin [°C]	1,0	-0,6	1,7
QSm <sub>Nacht</sub> [Wm <sup>-2</sup> ]	-18	-36	-23	EOT ≤ 0 °C [h]	0,0	2,8	0,0
LTm [°C]	14,1	14,2	13,3	EOT < 5 °C [h]	14,0	14,7	16,7
LTmax [°C]	24,4	24,8	26,8	NS [mm]	0,0	0,0	0,0
LTmin [°C]	2,9	3,1	1,0	BTm [°C]	10,1	12,1	10,9
LT < 5 °C [h]	5,0	4,0	10,5	BTmax [°C]	13,6	19,7	13,2
LFm [%]	60	58	67	BTmin [°C]	8,1	7,2	9,3
				ET <sub>p</sub> [mm]	8,9	15,0	8,0

Messwerte der Globalstrahlung (GS), der Strahlungsbilanz (QS), der Strahlungsbilanz unter Berücksichtigung der »Sonnenflecken« (QS'), der Luft- (LT), Erdoberflächen- (EOT) und Bodentemperaturen (BT) sowie der relativen Luftfeuchte (LF), der Windgeschwindigkeit (WG) und -richtung (WR), der Niederschläge (NS) und der potenziellen Evaporation (ET<sub>p</sub>)

#### Windverhältnisse vom 26.7 bis 28.7.2000

Die Windverhältnisse, repräsentiert durch *Windgeschwindigkeit* und *Windrichtung*, wiesen im Verlauf der Strahlungswetterlage keinen signifikanten Zusammenhang mit den Strahlungswerten auf bzw. zeigten Tagesgänge, wie sie auch während anderer Strahlungsbedingungen auftraten. Von besonderer Bedeutung waren hingegen die nächtlichen Zeiträume, in denen es selbst auf der Kahlschlagfläche zu längeren Calmenphasen kam (Abb. 48). Derartige Phasen waren mit einem stärkeren Absinken der Temperaturen und im Fall der Nacht vom 25./26.7. mit Frostwerten im bodennahen Bereich verbunden. Die Abbildung zeigt darüber hinaus die Wirkung der unterschiedlichen Bestandsdichten der beiden bewaldeten Flächen. So wurde in den Nächten im Aufforstungsbestand zu keinem Zeitpunkt eine Windbewegung registriert, während im Altbestand noch geringe Werte auftraten (Abb. 48). Während des gleichmäßigen Strahlungsgangs im Verlauf der drei Tage konnte auf der Kahlschlagfläche der direkte Einfluss von Windbewegungen auf die Temperaturen beobachtet werden. Primär führten die teilweise recht hohen Windgeschwindigkeiten während des Tages zu einem geringeren Niveau der Lufttemperaturen und einem »unruhigen« Tagesverlauf. In den Nachtstunden vergrößerte der Einfluss des Windes den Wärmeaustausch und bewirkte

damit ein Anheben der Werte. Darüber hinaus konnte ein direkter Einfluss auf die nächtlichen Erdoberflächentemperaturen registriert werden. Bereits kurzfristige und geringe Windbewegungen innerhalb windstillen Phasen hoben die Temperaturen an, wobei Einzelereignisse mit einer ebenfalls kurzzeitigen Wirkung verbunden waren (Abb. 48: 25./26.7., 0 Uhr). Längere oder häufige Windereignisse von mehr als etwa  $1,0 \text{ ms}^{-1}$  verhinderten dagegen ein Absinken der Temperaturen, wie es in den Folgenächten zu beobachten war.

#### 4.5.1.2 Analogien und Differenzen zu weiteren Strahlungswetterlagen

Im Verlauf der Messkampagnen kam es zu vier weiteren Wetterlagen, die der Definition einer Strahlungswetterlage recht nahe kamen (Abb. 46). Die in diesen Zeiträumen registrierten Tagesverläufe der Werte wiesen weitgehende Analogien, aber auch einige Unterschiede zur zuvor beschriebenen Wetterlage auf.

Ursache für das Auftreten von Strahlungswetterlagen während der Messkampagnen waren in der Regel mehr oder minder stabile Hochdruckgebiete über Nordfennoskandien oder dem nördlichen bzw. zentralen Russland. Je nach Lage der Hochdruckkerne im Zusammenspiel mit weiteren Hoch- oder Tiefdruckgebieten wurden Luftmassen aus westsüdwestlichen (29.6.1999; 6.9.1999 und 30.7.2000), südöstlichen (5.8.2000) oder wie im Fall der zuvor beschriebenen Situation aus nordöstlichen Richtungen in den Untersuchungsraum geführt (NOAA AIR RESOURCES ARCHIVE 1999a, 1999b, 2000a, 2000b, 2000c). Während der beiden Strahlungswetterlagen 1999 bestimmten Hochdruckgebiete über Zentralrussland (29.6.1999) und südlich des Baltikums (6.9.1999) das Wettergeschehen, während am 30.7.2000 und am 5.8.2000 Hochdruckgebiete über der Kola-Halbinsel bzw. dem Weißen Meer wetterbestimmend waren (NOAA AIR RESOURCES ARCHIVE 1999a, 1999b, 2000a, 2000b, DWD 1999a, 1999b, 2000d, 2000e).

#### Strahlungsverhältnisse

Ungestörten Strahlungsbedingungen folgend, zeichneten sich sämtliche Strahlungswetterlagen durch hohe *Globalstrahlungswerte* aus, wobei die absoluten Messwerte lediglich durch die astronomischen und atmosphärischen Gegebenheiten begrenzt waren. Je geringer der zeitliche Abstand zum Sommersolstitium, desto höher waren die Tagesmittel bzw. -summen (Abb. 46). Vor diesem Hintergrund waren besonders die Werte der spätsommerlichen Strahlungswetterlage des 6.9.1999 zu sehen, deren Tagesmittel geringer waren als die Mittelwerte des Messzeitraums.

Die Tagesgänge der drei Versuchsflächen verliefen unter Berücksichtigung der zuvor genannten Gegebenheiten analog zur in Kapitel 4.5.1.1 beschriebenen Strahlungswetterlage. Scheinbar gegensätzliche Verhältnisse zeigten sich im Verhältnis der Tagesmittel bzw. -summen zwischen den Beständen. Während der Strahlungswetterlagen der Messkampagne 1999 wurden analog zu den Transmissionsraten sämtlicher Bezugszeiträume höhere Werte im Aufforstungs- als im Altbestand registriert, dagegen waren sie im Folgejahr geringer (Abb. 49). Dieser Widerspruch stand jedoch in Zusammenhang mit dem sehr unterschiedlichen zeitlichen Auftreten von Strahlungswetterlagen während der beiden Messkampagnen und ergab sich aus der Vegetationsverteilung der Bestände (Abb. 46). Bei recht geringen Unterschieden von 5 % bis 16 % in den Strahlungssummen zwischen den Beständen führte im Juli 2000 eine längere Beschattung der Geber im Aufforstungsbestand in den Mittagstunden und einer etwas längeren Einstrahlungsphase im Altbestand zu etwas höheren Tagessummen auf der zuletzt genannten Fläche.

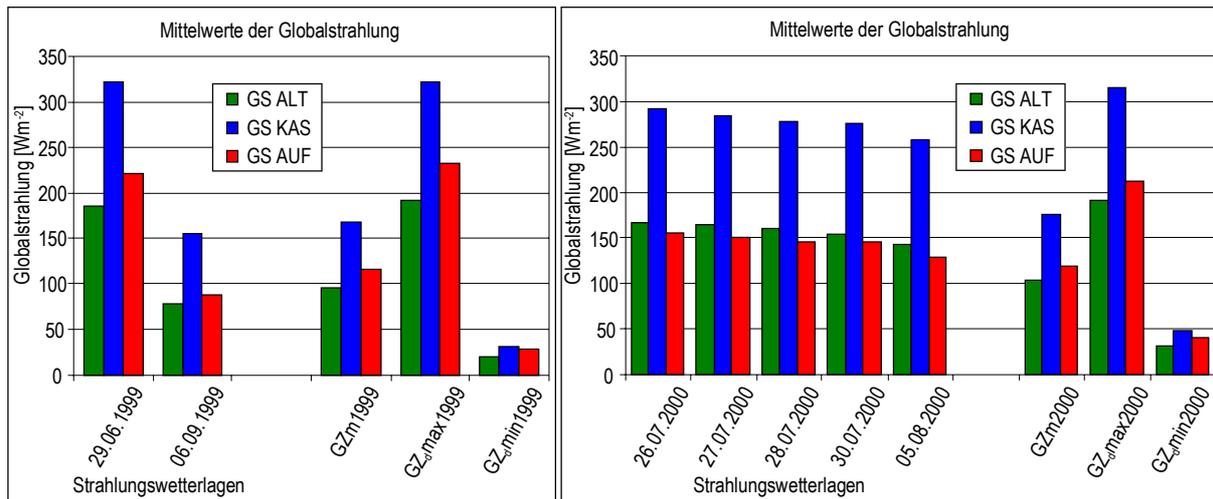


Abb. 49: Tagesmittelwerte der Globalstrahlung während aufgetretener Strahlungswetterlagen sowie durchschnittliche, höchste und geringste Tagesmittel der gesamten Messzeiträume (GZ)

Die Tagesgänge der *Strahlungsbilanz* zeigten im Verlauf der weiteren Strahlungswetterlagen ebenfalls analoge Verhältnisse zu der in Kapitel 4.5.1.1 beschriebenen Situation. Auch hier waren Unterschiede primär in den veränderten astronomischen Bedingungen und damit in den absoluten Werten zu suchen, sodass die höchsten Tagesmittel an den Tagen mit den höchsten Globalstrahlungswerten auftraten. Ebenfalls analog zur eingehender beschriebenen Strahlungswetterlage waren sämtliche Tage mit überdurchschnittlich hohen nächtlichen Ausstrahlungswerten verbunden. Eine Ausnahme stellte jedoch der 29.6.1999 dar, dessen zeitliche Nähe zum Sommer-Solstitium mit fast durchgehender Einstrahlung verbunden war. Der Zeitraum zwischen Sonnenuntergang und -aufgang währte nur etwa eine Stunde, sodass die höchsten Ausstrahlungswerte etwa eine Stunde vor Sonnenuntergang als Folge von Beschattungen durch Horizontüberhöhung auftraten, jedoch per Definition nicht zu den Nachtstunden gehörten.

Die Bilanzunterschiede zwischen den Flächen gestalteten sich auch während der anderen Strahlungswetterlagen grundsätzlich wie in Kapitel 4.5.1.1 beschrieben. Das galt sowohl für die überdurchschnittlichen Unterschiede zwischen der Kahlschlagfläche und den Beständen als auch für die geringen Unterschiede zwischen den Beständen. Die Werte des Aufforstungsbestands wiesen dabei geringfügig höhere Beträge auf als der Altbestand, lediglich der 6.9.1999 bildete eine Ausnahme. Die Lage dieses Tages im Spätsommer war verbunden mit bereits sehr geringen Einstrahlungswinkeln von maximal 30° (21.6.: 47°), unter denen sich der niedrige aber homogene Kronenraum der Aufforstung offenbar weniger strahlungsdurchlässig erwies als der Altbestand. Die These wird gestützt durch die Tatsache, dass unabhängig von der Ausbildung einer Strahlungswetterlage ab 3.9.2000 im Altbestand höhere Werte auftraten als in der Aufforstung.

### Temperaturverhältnisse

Das primäre gemeinsame Merkmal der *Lufttemperaturen* während der Strahlungswetterlagen waren ihre überdurchschnittlichen Tagesamplituden, während die Tagesmittel zum Teil über, zum Teil auch unter dem Durchschnitt der Referenzzeiträume lagen. Selbst im Verlauf der in Kapitel 4.5.1.1 eingehender beschriebenen Strahlungswetterlage traten beide Fälle auf.

In den Unterschieden zwischen den Versuchsflächen konnten keine Auffälligkeiten gegenüber den Werten anderer Wetterlagen festgestellt werden. Analog zum mittleren Tagesgang führte der Einfluss des Windes auf der Kahlschlagfläche zu den geringsten Tagesamplituden, während im dichten Aufforstungsbestand die höchsten Werte registriert wurden. Die nächtliche Abkühlung in diesem Bestand hatte jeweils die geringsten Minima zur Folge (Abb. 50).

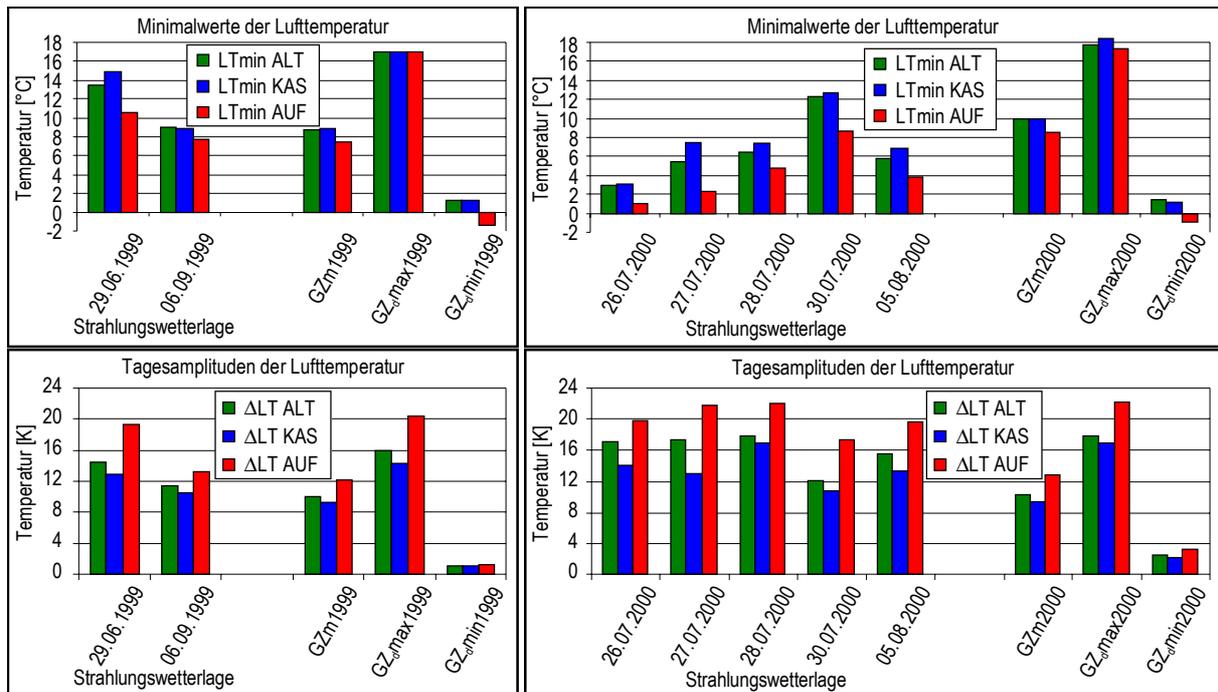


Abb. 50: Nächtlige Minimalwerte und Tagesamplituden der Lufttemperatur während aufgetretener Strahlungswetterlagen sowie höchste und geringste Tagesminima und -amplituden in den gesamten Messzeiträumen

Der Vergleich zwischen den Referenzstationen des finnischen Wetterdienstes und der Kahlschlagfläche zeigte als auffälligstes Merkmal die höheren Tagesamplituden in der Tallage des Kiutaköngäs sowohl in Bezug zur Position der Versuchsfelder als auch zur zweiten Referenzstation in Kuusamo. Die größeren Gegensätze entsprachen dabei üblichen Tagesgängen der Referenzzeiträume, waren jedoch stärker ausgeprägt. In der Regel zeichneten sich die Tagesamplituden am Kiutaköngäs sowohl durch geringere nächtliche Minima (negativer Temperaturgradient) als auch durch höhere Tagesmaxima aus (positiver Temperaturgradient). Eine Ausnahme gegenüber der Kahlschlagfläche bildete der 30.7.2000, an dem identische Maximalwerte registriert wurden (Abb. 51). Als Ursache kann wiederum der Windeinfluss angenommen werden, da der Tag als einziger Strahlungstag mit Windrichtungen in Tallage (aus SE) verbunden war und so zu einer Kanalisierung des Windes in der Tallage und einer damit verbundenen Temperaturreduzierung geführt haben dürfte.

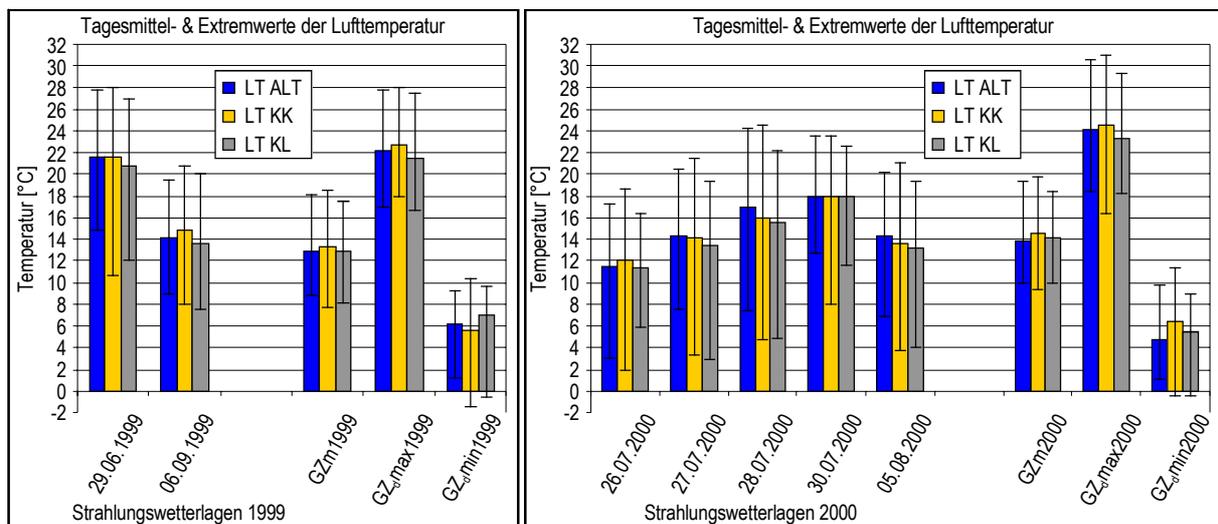


Abb. 51: Tagesmittel- und Extremwerte der Lufttemperaturen auf der Kahlschlagfläche (KAS) und an den Referenzstandorten Kiutaköngäs (KK) und Kuusamo Flughafen (KL) während aufgetretener Strahlungswetterlagen sowie Vergleichswerte der gesamten Messzeiträume (GZ)

Während zwei weiterer Tage traten gegenüber dem 40 km entfernten Flughafen Ausnahmen auf. Am 6.9.1999 und am 27.7.2000 wurden am Flughafen etwas geringere Minima und höhere Tagesamplituden registriert (Abb. 51). Im Hinblick auf Einzelereignisse, wie die zuvor beschriebenen, erwies sich die Distanz zum Flughafen Kuusamo als zu groß für eine systematische Auswertung von Abweichungen. Im Verlauf der Messungen konnte mehrfach das verzögerte oder frühere Auftreten bestimmter Wetterlagen gegenüber dem Untersuchungsgebiet beobachtet werden. Darüber hinaus traten vereinzelt auch unabhängige Wetterereignisse auf.

Das Temperaturregime der *Erdoberflächentemperaturen* war im Verlauf der Strahlungswetterlagen durch größere Gegensätze geprägt als das der Lufttemperaturen. Der Strahlungsumsatz des Bodens führte wiederum zu überdurchschnittlichen Tagesamplituden, wobei dem 6.9.1999 erneut eine Ausnahme-situation zukommt. Dessen bereits beschriebene, spätsommerliche Strahlungssituation führte auf der Kahlschlagfläche und im Altbestand zu etwas geringeren Amplituden als im Messzeitraum 1999, während es im Aufforstungsbestand erneut zu überdurchschnittlichen Gegensätzen kam. Ursache war dabei der Einfluss einer längeren Phase direkter Einstrahlung in den Bestand, die zu einem hohen Tagesmaximum und damit der großen Spannweite der Tagesamplitude führte. Eine weitere Ausnahme stellte der 30.7.2000 dar, der sich im Vergleich zu anderen Strahlungswetterlagen durch geringe Maximalwerte während des Tages und hohe nächtliche Minimumtemperaturen im Vergleich zu den Beständen auszeichnete (Abb. 52). Offenbar bewirkten die an diesem Tag aufgetretenen hohen Windgeschwindigkeiten selbst in Bodennähe einen Ausgleich des Temperaturniveaus mit der Folge einer deutlich geringeren Tagesamplitude.

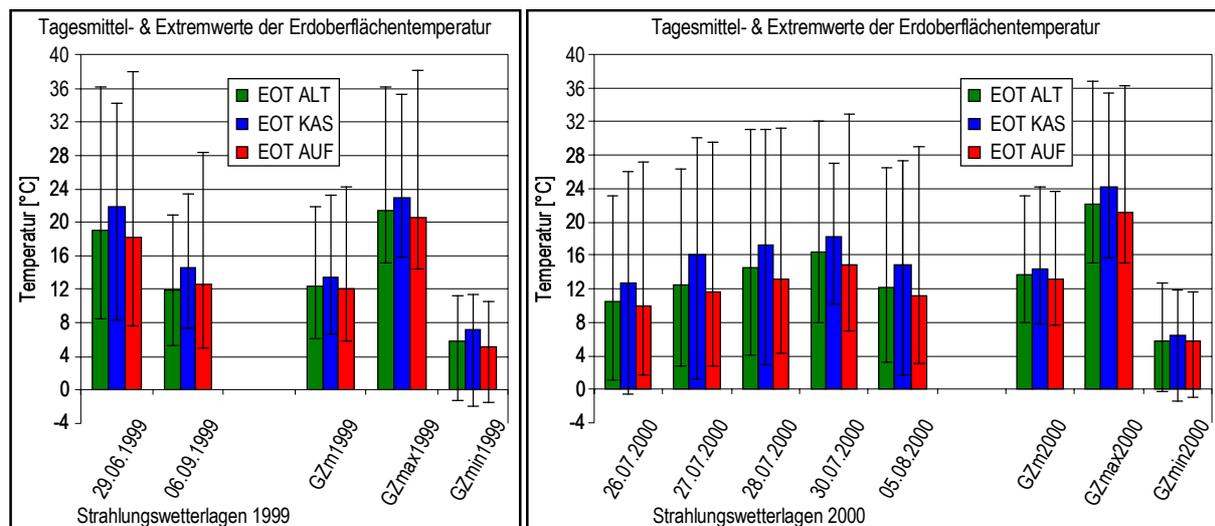


Abb. 52: Tagesmittel- und Extremwerte der Erdoberflächentemperaturen auf den Versuchsf lächen während aufgetretener Strahlungswetterlagen sowie Durchschnitts- und Extremwerte der gesamten Messzeiträume (GZ)

Etwas deutlicher als im Durchschnitt der Referenzzeiträume hoben sich die Tagesmittelwerte der Kahlschlagfläche während der Strahlungswetterlagen von den Beständen ab. In diesen äußerten sich die vegetationsbedingten Wechsel von Einstrahlung und Beschattung in Form beträchtlicher Schwankungen der bodennahen Temperaturen. In der Regel führten die Einstrahlungsphasen im dichten Aufforstungsbestand zu den jeweils höchsten Tagesmaxima der drei Flächen, lediglich am 27.7. wurden minimal höhere Werte auf der Kahlschlagfläche registriert. Die nächtlichen Minimalwerte unterschiedlicher Strahlungswetterlagen waren dagegen hohen Schwankungen unterworfen, die in direktem Zusammenhang mit den aufgetretenen Windgeschwindigkeiten standen (siehe dort). In der Folge konnten auf der Kahlschlagfläche sowohl die höchsten als auch die geringsten Minimalwerte bis in den Frostbereich beobachtet werden (Abb. 53).

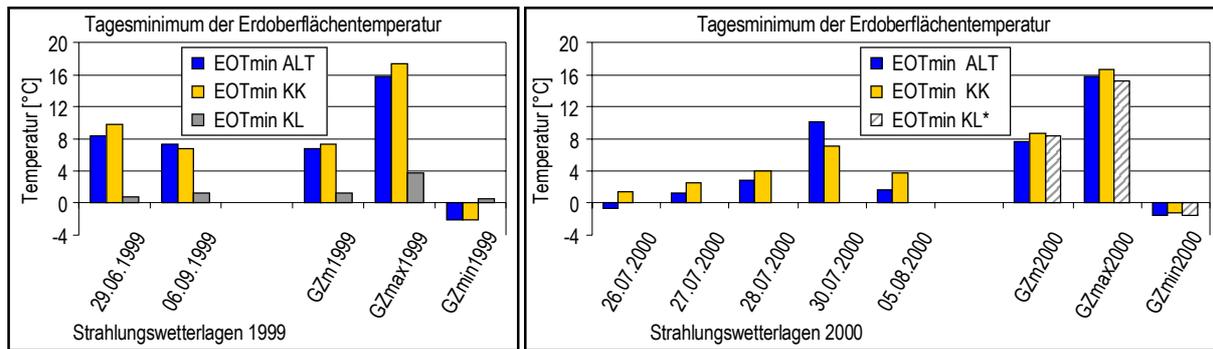


Abb. 53: Tagesminima der Erdoberflächentemperatur auf der Kahlschlagfläche (KAS) und an den Referenzstandorten Kuusamo Kiutaköngäs (KK) und Kuusamo Flughafen (KL) während aufgetretener Strahlungswetterlagen sowie Vergleichswerte der gesamten Messzeiträume (GZ) (\* Die Daten des Flughafens waren bezogen auf den Gesamtzeitraum lückenhaft, vgl. Tab. 31.)

Ein Vergleich mit den Werten der Referenzstationen war nur auf Basis der dort gemessenen Minimalwerte möglich (vgl. Kap. 4.4.2.2). Gegenüber der Tallage des Kiutaköngäs traten auf der Kahlschlagfläche meist geringere nächtliche Minimalwerte auf, wobei auch hier die Tage des 6.9.1999 und des 30.7.2000 Ausnahmen von der Regel bildeten. In beiden Fällen dürfte erneut der Einfluss nächtlicher Windbewegung und damit die Abweichung von den Bedingungen einer idealen Strahlungswetterlage die Ursache der Ausnahmen sein. In beiden Fällen kam es auf der Kahlschlagfläche zu keinen windstillen Phasen, sodass es vermutlich auch in Bodennähe einen lateralen Wärmetransport gab. Demgegenüber kam es in der Tallage vermutlich zu geringeren Windbewegungen. Für einen Vergleich mit dem Flughafen Kuusamo lagen zu wenige Werte vor (vgl. Kap. 4.1).

Der Strahlungsumsatz des Bodens führte auch bei den *Bodentemperaturen* sämtlicher Strahlungswetterlagen zu überdurchschnittlichen Tagesamplituden, die auch das bemerkenswerteste Merkmal in den Unterschieden zwischen den Flächen waren. Die exponierten Bedingungen der Kahlschlagfläche äußerten sich in deutlich höheren Gegensätzen zwischen Tag und Nacht als die der Bestände. Die geringsten nächtlichen Minima traten während einer Reihe von Tagen jedoch im Altbestand auf. Die Werte dieser Fläche reagierten in ihrem gesamten Niveau mit einer Verzögerung von einigen Tagen auf Wetterlagen, sodass die thermischen Bedingungen der Tage vor den jeweiligen Strahlungswetterlagen einen Einfluss auf die Minimalwerte dieser Fläche hatten.

### Windverhältnisse

Die *Windgeschwindigkeiten* stellten in Form geringer Werte die zweite Definitionsgröße für Strahlungswetterlagen neben der Strahlung dar. Dem Anspruch durchgehender Windstille (vgl. GEIGER 1961, KÖNIG 1995) hielten die aufgeführten Wetterlagen jedoch nicht stand, da an allen beschriebenen Tagen auch über längere Zeiträume Windgeschwindigkeiten von mehr als  $0,5 \text{ ms}^{-1}$  auftraten (Abb. 54). Während der meisten Strahlungstage blieben die Windgeschwindigkeiten unter den Mittelwerten der Messzeiträume, darüber lagen jedoch die des 6.9.1999, des 30.7.2000 und auch des 26.7.2000. So verwundert es wenig, dass die beiden zuerst genannten Tage bereits mehrfach in den Ergebnisdiskussionen windbeeinflusster Parameter als Ausnahmen zitiert wurden, da an diesen Tagen selbst in den Nachtstunden keine windstillen Phasen auftraten. Im Hinblick auf die Windgeschwindigkeiten nimmt auch der 26.7.2000 eine besondere Stellung ein, da er sich als besonders gegensätzlich erwies. Während des Tages wurden Stundenmittel von bis zu  $3,5 \text{ ms}^{-1}$  registriert, während es in den Nachtstunden bei Windstille zu Strahlungsfrost kam.

Die in den Tagesverläufen gemessenen Windgeschwindigkeiten auf den Versuchsflächen entsprachen den Unterschieden zwischen den Flächen, wie sie in den Kapiteln 4.4.4 oder 4.5.1.1 beschrieben wurden. Die höchsten Mittel- und Maximalwerte traten jeweils auf der Kahlschlagfläche auf, während die geringsten Windbewegungen im Aufforstungsbestand gemessen wurden. Gemeinsame Merkmale sämtlicher

Strahlungswetterlagen waren, abgesehen von den oben genannten Tagen, geringe Windgeschwindigkeiten in den Nachtstunden, die besonders im dichten Aufforstungsbestand zu ausgedehnten Calmenphasen führten. Da es im Aufforstungsbestand auch während windreicher Nächte zu langen Calmenphasen kam, sanken unter derartigen Bedingungen die bodennahen Temperaturen auf dieser Fläche am stärksten ab. Kam es dagegen auf der Kahlschlagfläche zu windstillen Phasen, so registrierten die Geber auf dieser Fläche die geringsten Erdoberflächentemperaturen.

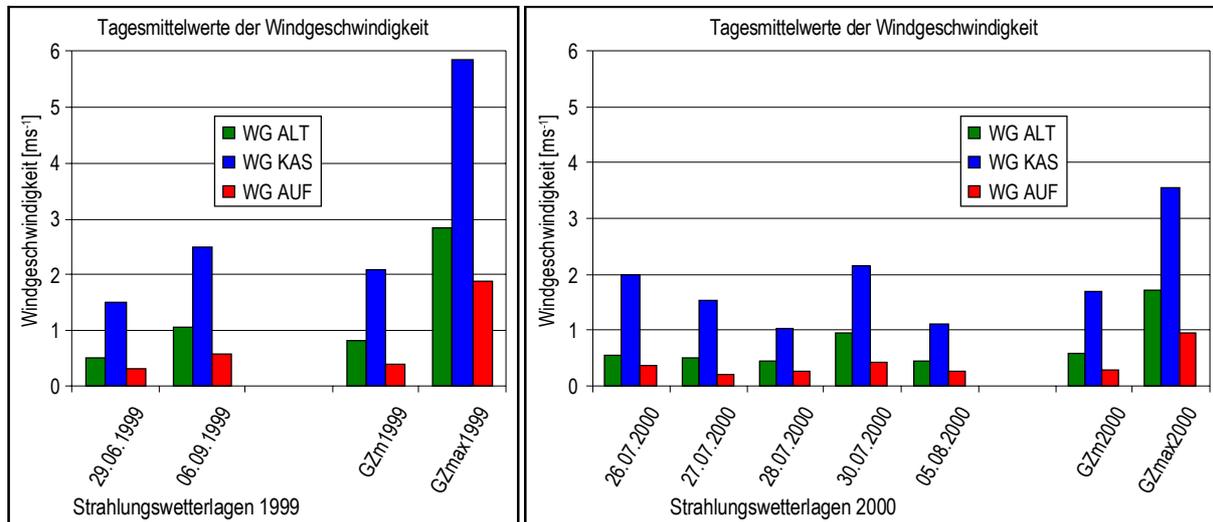


Abb. 54: Tagesmittelwerte der Windgeschwindigkeiten auf den Versuchsflächen während aufgetretener Strahlungswetterlagen sowie durchschnittliche und höchste Tagesmittelwerte der gesamten Messzeiträume (GZ)

Der Vergleich der Werte der Kahlschlagfläche mit den Windgeschwindigkeiten der Referenzstation des Flughafens Kuusamo zeigte keine signifikanten Abweichungen zu den Werten anderer Wetterlagen. Es wurden während sämtlicher Strahlungswetterlagen höhere Windgeschwindigkeiten auf der Kahlschlagfläche registriert.

#### 4.5.2 Frostwetterlagen

Im Raum der borealen Nadelwaldzone sind Frostwetterlagen während der Vegetationsperiode keine Seltenheit. Wie bereits beschrieben, gelten derartige Frostereignisse dennoch als limitierender Faktor für die Vegetationsentwicklung und als Gefährdungspotenzial für die Forstwirtschaft (POHTILA 1980, CHRISTERSSON et al. 1984, RAITIO 2000). Wie in Kapitel 4.4.2 beschrieben sind die Determinanten für eine Schädigung von Pflanzen Temperatur, Frostdauer sowie Zeitpunkt des Auftretens, da die Bestände im Verlauf eines Jahres einen unterschiedlichen Frosthärtegrad entwickeln (vgl. SAKAI & LARCHER 1987, CANNELL & SHEPPARD 1982, HANNERZ 1994). Die höchste Gefährdung besteht in der Phase des Sprießens zu Beginn des Sommers, während in der Folgezeit die Frosthärte der Bestände langsam wieder zunimmt (LANGVALL 2000, RAITIO 2000). Wie bereits in den Kapiteln 4.4.2.1 und 4.4.2.2 festgestellt, kam es im Verlauf der Messkampagnen zu keinen vegetationsgefährdenden Frösten, allerdings traten Frostwetterlagen auf, deren unterschiedliche Wirkung auf den Versuchsflächen untersucht wurde.

Im Zeitraum vor der Messkampagne 1999 traten die letzten Frosttage im Übergangszeitraum zwischen Winter und der beginnenden Vegetationsperiode am 2. Juni auf (vgl. Kap. 4.2.1), das entspricht dem Verlauf der Temperaturen im langjährigen Mittel (FMI 1991). Im Gegensatz dazu registrierten die Geber der Referenzstationen im Jahr 2000 mehrere Frostereignisse im Juni bis zum 18.6. (Abb. 27), die durch die bereits laufenden Messungen auf den Versuchsflächen bestätigt wurden. Bereits fünf Wochen später konnten im Zuge der zuvor beschriebenen Strahlungswetterlage vom 26. bis 28.7.2000 zumindest in Bodennähe erneut Frostwerte gemessen werden. Der Monat August markierte schließlich in beiden

Messkampagnen den Auftakt von Frostereignissen zum Ende der Vegetationsperiode. Während der Messkampagne 1999 wurden drei mehrtägige Ereignisse gezählt, im Folgejahr eines. Bezogen auf das langjährige Mittel 1961-1990 sind hingegen erst im September Werte unter 0 °C üblich. Im Verlauf der Messungen traten auf den Versuchsflächen und den Referenzstandorten an neun Tagen im Messzeitraum 1999 und an drei Tagen im Messzeitraum 2000 Frostbedingungen in Bodennähe oder bei den Lufttemperaturen auf (Abb. 46). Für eine nähere Auswertung der drei Versuchsflächen und der Referenzstandorte boten sich primär die ersten spätsommerlichen Frostwetterlagen im Verlauf der Vegetationsperioden an, da sie noch ein Risiko für die junge Waldvegetation darstellen (RAITIO 2000).

#### 4.5.2.1 Frostwetterlage vom 6.8. bis 9.8.1999

In Folge eines Hochdruckgebiets war der Beginn des Monats August durch hohe Tagesmaxima der Lufttemperaturen von über 20 °C geprägt. Das Hoch wurde im Verlauf des 4. August durch ein Tief (Abb. 55) über Lappland langsam abgebaut, was zu abnehmenden Temperaturen führte (FMI 1999c, DWD 1999f). Auf seiner Rückseite führte das Tief kalte Luftmassen vom Nordpolarmeer in den Untersuchungsraum, die in der Nacht vom 6.8. zum 7.8. zu den ersten Bodenfrösten des Spätsommers führten (NOAA AIR RESOURCES ARCHIVE 1999c, 1999d). Zwischenzeitlich erfolgte die Aufweitung des Tiefs zu einer Zyklone (DWD 1999c) und zu einem weiteren Einfluss von Kaltluft (DWD 1999d). Auf den Versuchsflächen folgten nach einer etwas wärmeren Nacht erneut Frostwerte vom 8.8. auf den 9.8.1999. Im Verlauf des 9.8. überwog die Wirkung eines Hochdruckgebietes über Zentralrussland, das erst zu südlicher und schließlich zu südwestlicher Strömung verbunden mit wärmeren Luftmassen führte (NOAA AIR RESOURCES ARCHIVE 1999e).

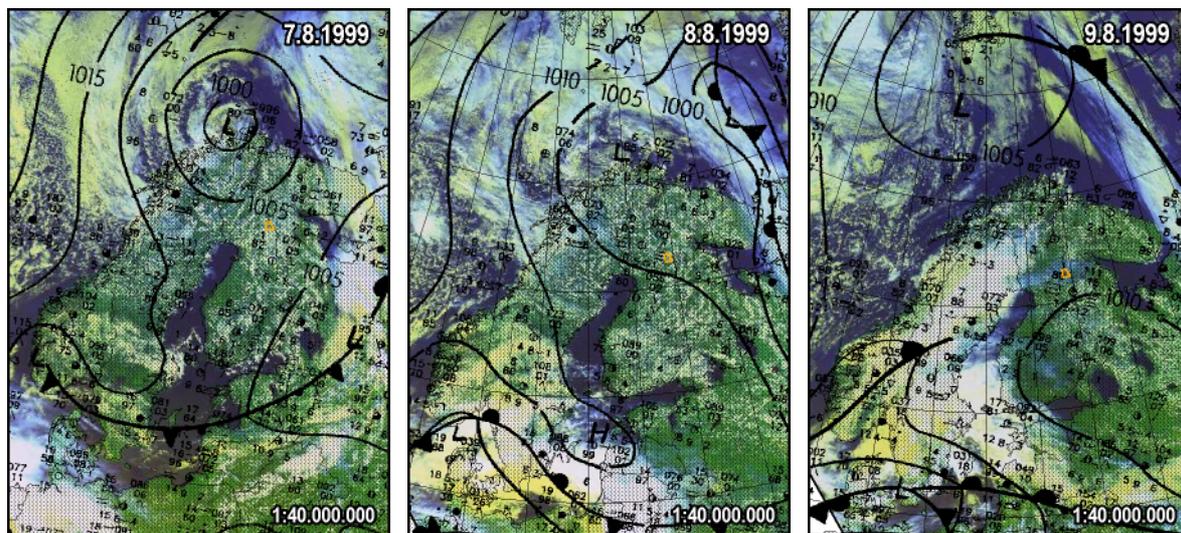


Abb. 55: Ausschnitte der Bodenwetterkarten 7.8.-9.8.1999 (DWD 1999c, d, e; verändert) und die Verteilung der Bewölkung; AVHRR-Falschfarbszenen von 7.8.-9.8.1999 (DUNDEE SATELLITE RECEIVING STATION 1999a, b, c; verändert); Untersuchungsraum orangefarben abgegrenzt

#### Strahlungsverhältnisse vom 6.8. bis 9.8.1999

Im Gegensatz zu den Strahlungswetterlagen waren die Tagesgänge von *Globalstrahlung* und *Strahlungsbilanz* zwischen dem 6.8. und 9.8. durch zahlreiche Wechsel von Einstrahlungs- und Beschattungsphasen gekennzeichnet (Abb. 56).

Während sich die Morgen- und Vormittagsstunden meist durch geringe Bewölkung auszeichneten, war im weiteren Verlauf der Tage Quellbewölkung zu beobachten (Abb. 56). In den Nachtstunden der zwei o. g. Frostnächte registrierten die Geber hohe und gleichmäßige Ausstrahlungswerte, wie sie für wolkenlose Nächte zuvor in Kapitel 4.5.1.1 beschrieben wurden. Im Gegensatz dazu ließen die frostfreien

Nächte aufgrund der ungleichmäßigen Ausstrahlungsverläufe auf wechselnde Bewölkungsverhältnisse schließen (Abb. 56). Ausgehend vom Zeitraum zwischen Sonnenuntergang und -aufgang wurden über die vier Tage im Aufforstungsbestand etwa 75 % und auf den anderen beiden Flächen ca. 100 % höhere Werte registriert als im Mittel des Vergleichszeitraums.

#### Temperaturverhältnisse vom 6.8. bis 9.8.1999

Das Temperaturregime der *Luft- und Erdoberflächentemperaturen* war im Verlauf der vier Tage auf allen Versuchsflächen durch überdurchschnittliche Gegensätze zwischen Tag und Nacht gekennzeichnet. Das geringe Temperaturniveau der Nachtstunden bewirkte jeweils unterdurchschnittliche Tagesmittelwerte. Der windgeschützte Aufforstungsbestand hob sich durch deutlich geringere Lufttemperaturen von den beiden anderen Versuchsflächen ab. In den Nachtstunden vom 6.8. zum 7.8.1999 traten kurzzeitig Frostwerte von 0,0 °C auf. Zwei Nächte später wurden Temperaturen nahe dem Frostbereich (0,3 °C) registriert. Die im gleichen Zeitraum gemessenen Minimalwerte der Kahlschlagfläche lagen beachtliche 4,0 K und die des Altbestandes 3,1 K darüber (Abb. 56). In Bodennähe ließen sich an allen untersuchten Standorten Frostbedingungen in den beiden ausstrahlungsreichen Nächten registrieren.

Die nächtlichen Minimalwerte der Erdoberflächentemperaturen unterschieden sich auf den drei Versuchsflächen nur geringfügig (Abb. 56), wobei die geringsten Werte auf der Kahlschlagfläche auftraten. Dies ist insofern bemerkenswert, als dass sich auf dieser Fläche ein Temperaturgradient von bis zu 5,9 K gegenüber der Ebene des Lufttemperaturgebers ausbildete, während im Aufforstungsbestand zeitgleich eine Differenz von lediglich 1,0 K bestand. Offenbar führte der Einfluss der nur zeitweise ausbleibenden Windbewegung erneut zu einem bereits in Kapitel 4.5.1.1 beschriebenen lateralen Wärmeaustausch und so zu einer Entkoppelung des Strahlungseinflusses von den Lufttemperaturen. An den Standorten der FMI-Referenzstationen registrierten auch die Geber der Lufttemperaturen Frostwerte in den zuvor genannten Nächten. An beiden Standorten wurden, abweichend von den Messwerten der Versuchsflächen, geringere Werte in der zweiten Nacht (8.8./9.8.) registriert. Unter dem Vorbehalt der großen Distanz zwischen den Stationen war die Ursache möglicherweise ein entgegengesetztes Schema der nächtlichen Windgeschwindigkeiten, die in der ersten Frostnacht am Flughafen und in der zweiten auf der Kahlschlagfläche höher waren.

Die *Bodentemperaturen* erreichten auf allen drei Versuchsflächen die geringsten Werte des Vergleichszeitraums 1999, blieben aber deutlich oberhalb des Gefrierpunktes (Tab. 8). Auch ohne die Bedingungen einer Strahlungswetterlage führte die Einstrahlung auf der Kahlschlagfläche zu erheblich höheren Tagesmaxima und die nächtliche Ausstrahlung zu geringeren Tagesminima als in den Beständen. Deren Werte zeichneten sich durch annähernd identische Tagesgänge aus (Abb. 56).

#### Windverhältnisse vom 6.8. bis 9.8.1999

Die während der Frostwetterlage aufgetretenen mittleren *Windgeschwindigkeiten* waren auf den drei Versuchsflächen geringer als die Durchschnittswerte der Referenzzeiträume des Jahres 1999. Das Vier-Tage-Mittel lag je nach Fläche bei etwa 70 bis 74 % der Beträge des Vergleichszeitraums. Ohne die Merkmale im Detail zu wiederholen, führten die insgesamt windarmen Bedingungen in zwei von drei Nächten der Wetterlage vom 6.8. bis 9.8.1999 auf allen Flächen zu windstillen Zeiträumen (Abb. 56), die im Verbund mit der hohen, gleichmäßigen Ausstrahlung zu Bodenfrösten führte. In der dazwischen liegenden Nacht wurde dagegen auf der Kahlschlagfläche eine durchgehende Windbewegung und im Altbestand eine Vielzahl von Windereignissen registriert.

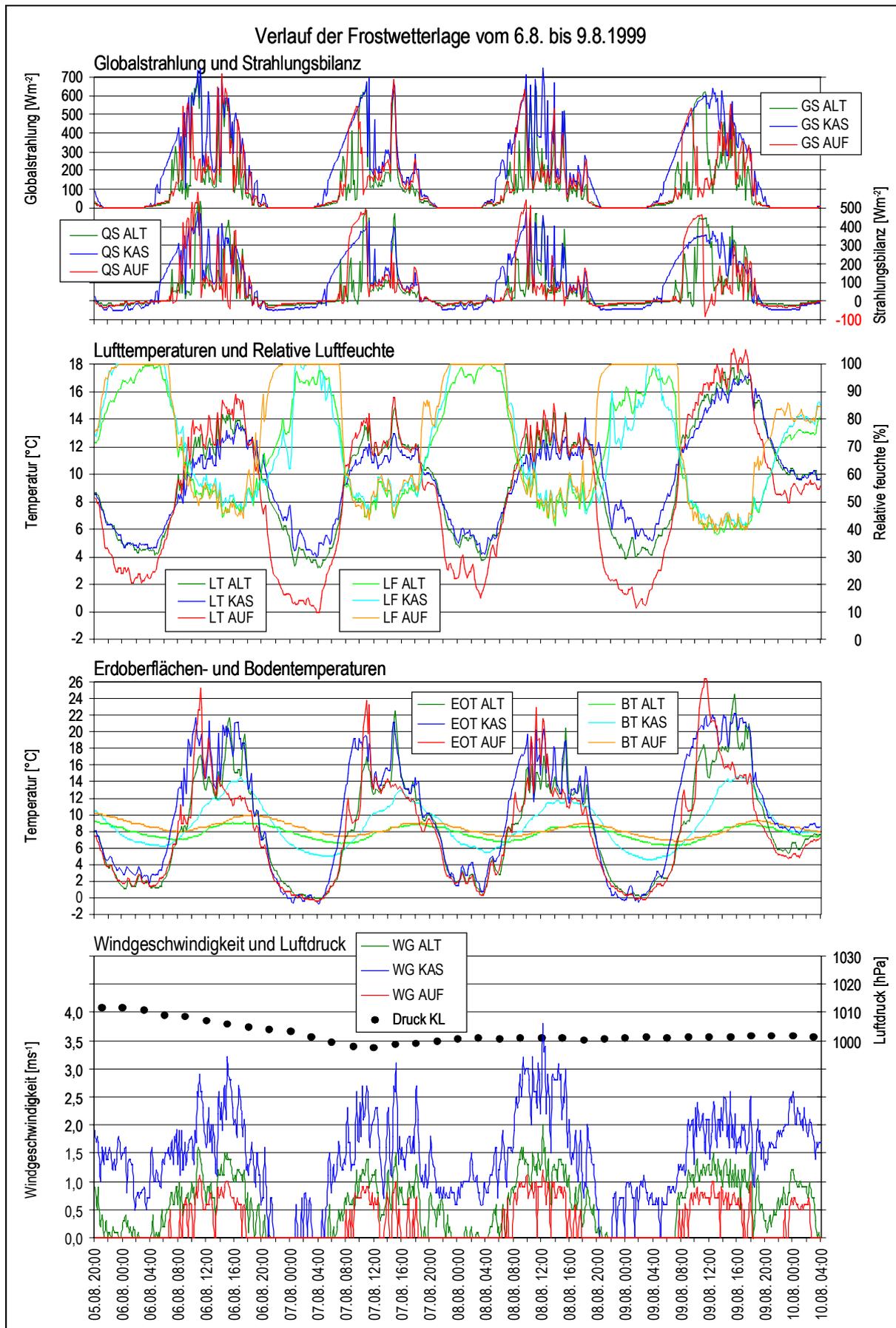


Abb. 56: Verlauf der Frostwetterlage vom 6.8. bis 9.8.1999 an den Standorten Altbestand (ALT), Kahlschlag (KAS) und Aufforstung (AUF); Luftdruckwerte der Station Kuusamo Lentoasema (KL)

Verbunden mit zeitweiser Bewölkung kam es auch im windstillen Aufforstungsbestand nicht zu Frostwerten. Da es analog zu den Strahlungswetterlagen auch in den Frostnächten nicht durchgehend windstill war, ließ sich in Abhängigkeit von der Bestandsdichte der Einfluss selbst kurzzeitiger Windereignissen auf die Temperaturen nachweisen. Bereits bei Windgeschwindigkeiten von  $0,6$  bis  $0,8 \text{ ms}^{-1}$ , die nur unwesentlich über der Anlaufgeschwindigkeit der Schalenkreuzanemometer lagen, konnte eine direkte Reaktion der Temperaturwerte in Form eines Anstiegs beobachtet werden. Auf der Kahlschlagfläche konnte die Wirkung bis in den Messbereich der Erdoberflächentemperaturen beobachtet werden, wo es in Reaktion auf Windereignisse in der Regel zu einem Anstieg der Werte über die Frostmarke kam (Abb. 56). Wie bereits angedeutet, boten die unterschiedlichen Windgeschwindigkeiten im Vergleich zwischen dem Flughafen Kuusamo und der Kahlschlagfläche ein Erklärungsmuster für das gegensätzliche Temperaturniveau der beiden Frostnächte. Der Einfluss des Windes war am Flughafen in der ersten Frostnacht mit einem Mittel von  $0,7 \text{ ms}^{-1}$  messbar größer als in der zweiten ( $0,2 \text{ ms}^{-1}$ ), sodass sich in der zuletzt genannten Nacht etwas geringere Temperaturen etablieren konnten. Mit nächtlichen Windmitteln von  $0,2 \text{ ms}^{-1}$  und  $0,6 \text{ ms}^{-1}$  waren die Verhältnisse auf der Kahlschlagfläche umgekehrt. Ein vergleichbarer Zusammenhang für den Einfluss des Windes in der Tallage des Kiutaköngäs konnte nicht ermittelt werden, da dort keine Windgeschwindigkeiten gemessen wurden. Jedoch deuten die in der Regel höheren Tagesamplituden der Lufttemperatur darauf hin, dass im vergleichsweise engen Tal meist geringere Windgeschwindigkeiten auftreten als im umgebenden Hochland.

Tab. 18: Ausgewählte Messwerte der Frostwetterlage vom 6.8. bis 9.8.1999

Messwert	ALT	KAS	AUF	Messwert	ALT	KAS	AUF
LTm [°C]	9,6	9,6	8,6	GSm [Wm <sup>-2</sup> ]	120	208	130
LTmax [°C]	18,3	18,2	19,6	GSΣ [kWhm <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup> ]	2,9	5,0	3,1
LTmin [°C]	3,1	4,0	0,0	GS [h]	17,8	17,9	18,0
LT ≤ 0 °C [h]	0,0	0,0	0,5	QSm [Wm <sup>-2</sup> ]	62	108	73
LT < 5 °C [h]	19,2	8,7	33,3	QS'm [Wm <sup>-2</sup> ]	66	108	79
EOTm [°C]	8,4	10,2	8,1	QS'm <sub>Taq</sub> [Wm <sup>-2</sup> ]	92	162	107
EOTmax [°C]	24,7	22,9	26,7	QSm <sub>Nacht</sub> [Wm <sup>-2</sup> ]	-18	-39	-16
EOTmin [°C]	-0,1	-0,8	-0,5	WG [ms <sup>-1</sup> ]	0,5	1,4	0,2
EOT ≤ 0 °C [h]	1,5	6,2	5,3	WGmax [ms <sup>-1</sup> ]	2,5	5,1	1,6
EOT < 5 °C [h]	36,5	32,7	37,8	WRm [°]	-	218	217
BTm [°C]	7,8	8,8	8,3	NS [mm]	0,0	0,0	0,0
BTmax [°C]	9,2	14,6	10,0	ET <sub>p</sub> [mm]	8,1	13,2	8,1
BTmin [°C]	6,3	4,6	6,8	LFm [%]	69	69	75

Zusammenfassung der Globalstrahlung (GS), Strahlungsbilanz (QS), Strahlungsbilanz unter Berücksichtigung der »Sonnenflecken« (QS'), Luft- (LT), Erdoberflächen- (EOT) und Bodentemperaturen (BT) sowie der relativen Luftfeuchte (LF), der Windgeschwindigkeit (WG) und -richtung (WR), der Niederschläge (NS) und der potenziellen Evaporation (ET<sub>p</sub>)

#### 4.5.2.2 Analogien und Differenzen zu weiteren Frostwetterlagen

Wie einleitend in Kapitel 4.5 bereits angedeutet und in Abbildung 46 dargestellt, kam es während der beiden Messkampagnen zu weiteren Frostwetterlagen. Der Verlauf der Tage zeichnete sich durch Analogien zur zuvor beschriebenen Frostwetterlage aus, daneben traten jedoch auch deutliche Unterschiede auf.

Obwohl sich verschiedene überregionale Wetterlagen für das Auftreten von Frostbedingungen während der Vegetationsperiode verantwortlich zeigten, waren sie immer mit dem Einfließen kalter bzw. arktischer Luftmassen aus dem Nordpolarmeer verbunden. Meist führten Tiefdruckgebiete bzw. ihre Ausläufer im nördlichen Fennoskandien oder in Nordrussland auf ihrer Rückseite Kaltluft aus nordwestlicher bzw. nordöstlicher Richtung in den Untersuchungsraum. Derartige Situationen prägten das Bild der zuvor

beschriebenen Wetterlage und den Zeitraum der etwa zehn Tage später aufgetretenen Frostwetterlage vom 20.8. bis 24.8.99, die durch ein Tief über Nordrussland dominiert war. Auch die letzten Fröste des Frühsommers 2000 (17.6.) wurden durch ein über der Kola-Halbinsel gelegenes Tiefdruckgebiet eingeleitet, welches auf seiner Rückseite polare Luftmassen in den Untersuchungsraum führte (DWD 2000f). Der Effekt wurde in diesem Fall durch ein ausgedehntes Hochdruckgebiet über Norwegen verstärkt. Die Ausgangsbedingungen für die Bildung von Nachtfrost am 15.8.2000 folgten ebenfalls dem Muster, dass der Untersuchungsraum auf der Rückseite zweier Tiefdruckgebiete lag, die sich vom Norden bis zum Zentrum Russlands erstreckten. Gleichzeitig hatten sich zwei Hochdruckgebiete über dem Baltikum und über Spitzbergen etabliert (DWD 2000g). Die Verschiebung des östlichen Tiefdruckgebietes in den Raum nordöstlich der Kola-Halbinsel führte kalte Luftmassen aus NNW in den Untersuchungsraum (DWD 2000h). Eine Ausnahme bildete die erste spätsommerliche Frostlage im Jahr 2000, die im Zusammenhang mit der in Kapitel 4.5.1.1 beschriebenen Strahlungswetterlage registriert wurde. Hier etablierte sich ein Hochdruckgebiet über dem nördlichen Fennoskandien, auf dessen Vorderseite der Transport kalter Luftmassen aus dem Raum der Barentssee erfolgte (DWD 2000i, NOAA AIR RESOURCES ARCHIVE 2000d). Die stabile Lage des Hochs führte zu wolkenlosen Bedingungen, daneben unterblieb jedoch der weitere Zufluss kalter Luft.

### Strahlungsverhältnisse

Wie im Verlauf der zuvor beschriebenen Referenzwetterlage wurden auch während der anderen Frostwetterlagen keine Auffälligkeiten in den Werten der *Globalstrahlung* bzw. in ihren Tagesverläufen beobachtet. Die Tagesmittel lagen im Rahmen der jahreszeitlichen und bewölkungsbedingten Schwankungen. Eine Ausnahme bildet die bereits erwähnte Kombination aus Strahlungs- und Frostwetterlage des 26.7.2000 mit überdurchschnittlich hohen Tagesmittelwerten. Die höchsten Tagesmittelwerte wurden in allen Fällen auf der Kahlschlagfläche registriert, dagegen war das Auftreten der höchsten Extremwerte abhängig von den Bewölkungsverhältnissen.

Die Werte der *Strahlungsbilanz* ließen im Gegensatz zur Globalstrahlung ein gemeinsames Merkmal der Frostwetterlagen erkennen. Auf allen Flächen konnten in den Nachtstunden überdurchschnittliche Ausstrahlungswerte beobachtet werden, welche die Ursache für die Frostwerte bildeten. Die Frostwetterlage vom 17./18.6. zu Beginn der Messkampagne 2000 bildete dabei scheinbar eine Ausnahme im Aufforstungsbestand (Abb. 57).

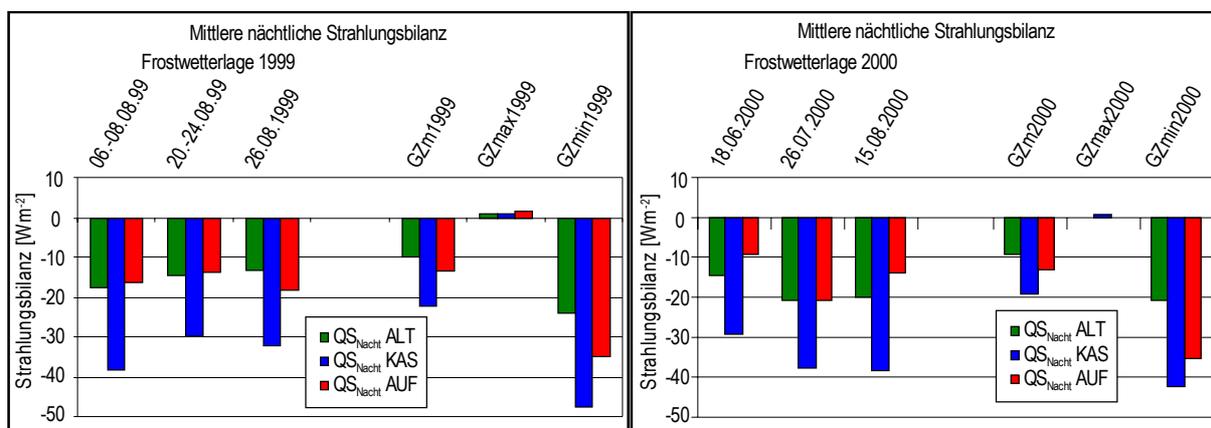


Abb. 57: Mittlere nächtliche Strahlungsbilanzwerte während aufgetretener Frostwetterlagen sowie durchschnittliche, höchste und geringste nächtliche Mittel der gesamten Messzeiträume (GZ)

Die Werte dieser Frostlage waren jedoch lediglich das Ergebnis eines Definitionsproblems aufgrund der zeitlichen Nähe dieser Frostwetterlage zum Sommer-Solstitium. Der Übergang zwischen den beiden Tagen war verbunden mit einem nur einstündigen Zeitraum zwischen Sonnenuntergang und -aufgang, aber einem

etwa sechsständigen Zeitfenster, in dem die Ausstrahlung überwog, das aber per Definition nicht zu den Nachtstunden gerechnet wurde. Unter Berücksichtigung dieses Zeitfensters wurden auch in dieser Frostnacht überdurchschnittliche Ausstrahlungswerte gemessen.

Die während der Frostwetterlagen registrierten Tagesmittelwerte und -amplituden der Strahlungsbilanz zeigten keine systematischen Auffälligkeiten zu anderen Wetterlagen. Eine Ausnahme bildete aber auch hier der 26.7.2000 als Teil der in Kapitel 4.5.1.1 beschriebenen Strahlungswetterlage und den damit verbundenen hohen Mittel- und Extremwerten.

Erwartungsgemäß zeichneten sich sämtliche Frostwetterlagen durch geringe *Lufttemperaturen* aus, die hinter den Werten der Referenzzeiträume zurückblieben. Der Einfluss kalter Luftmassen war besonders durch die geringeren nächtlichen Minimalwerte, aber auch durch unterdurchschnittliche Tagesmittel erkennbar. Es traten jedoch nicht zwingend Lufttemperaturen im Frostbereich auf (Abb. 58). Die geringen Minimalwerte führten während aller Frostwetterlagen zu überdurchschnittlichen Tagesamplituden. Zwischen den Versuchsflächen traten dabei größere Unterschiede auf, als sie im Mittel der Referenzzeiträume zu beobachten waren. Der windgeschützte Aufforstungsbestand hob sich durch besonders geringe nächtliche Temperaturen hervor, die gleichzeitig mit den höchsten Tagesamplituden der drei Flächen verbunden waren (Abb. 58). Während fünf der sechs Wetterlagen registrierten die Lufttemperaturgeber dieser Fläche Frostwerte, dagegen lag am 26.7.2000 ausschließlich Bodenfrost vor. Bei in der Regel etwas höheren Minimalwerten auf der Kahlschlagfläche konnten wie im Altbestand an keinem Messtag Lufttemperaturen im Frostbereich gemessen werden. Offenbar verhinderten auf beiden Flächen die im Vergleich zum Aufforstungsbestand öfter auftretenden Windereignisse ein Absinken der Werte bis in den Frostbereich.

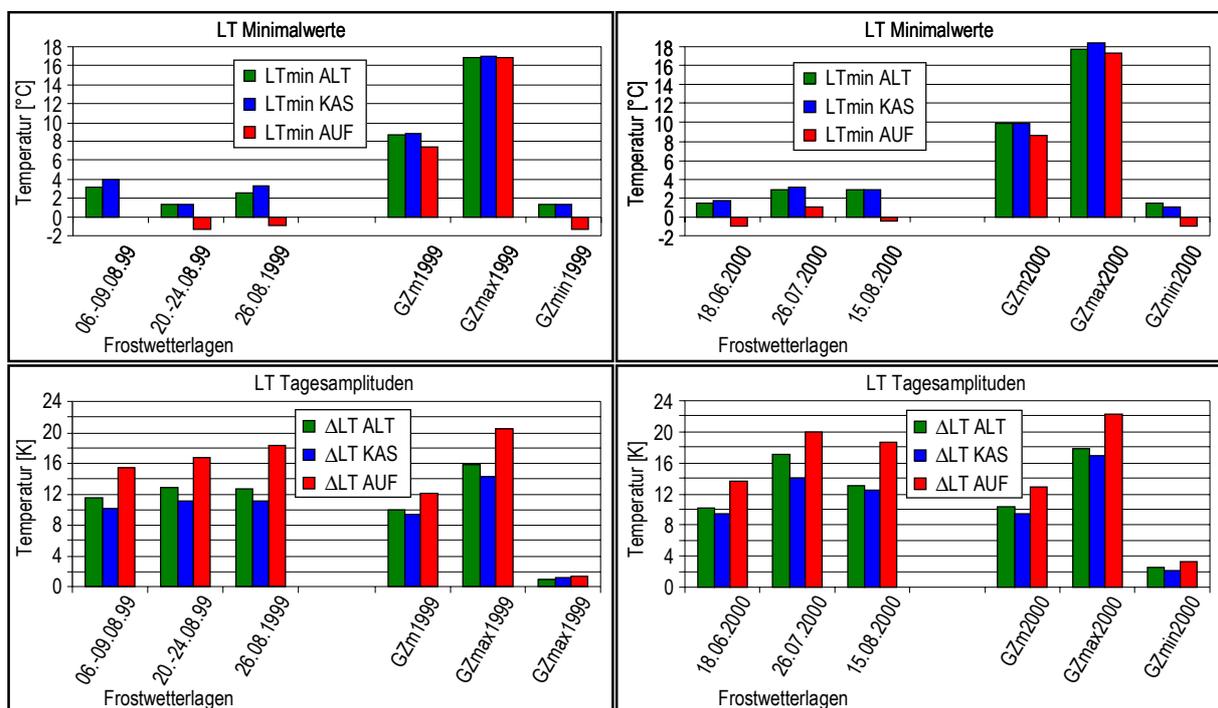


Abb. 58: Nächtliche Minimalwerte und Tagesamplituden der Lufttemperaturen während aufgetretener Frostwetterlagen sowie durchschnittliche, höchste und geringste nächtliche Werte der gesamten Messzeiträume (GZ)

Die Vergleichswerte der Referenzstation Kiutaköngäs hoben sich während der Frostwetterlagen ebenfalls von den mittleren Bedingungen der Referenzzeiträume ab. Im Vergleich zu Kahlschlagfläche traten in der Tallage immer geringere Minimalwerte auf, was jedoch auch während anderer Witterungsbedingungen zu beobachten war. Abgesehen von den Tagen des 26.7. und des 15.8.2000 sanken die Lufttemperaturen

in der Tallage im Verlauf sämtlicher Frostwetterlagen in den negativen Bereich. Als mögliche Ursache kann der Einfluss nächtlicher Windereignisse angenommen werden, da es im Umfeld der Versuchsflächen an beiden Tagen unter dem Einfluss ostnordöstlicher bzw. nordöstlicher Strömungen zu einer Vielzahl messbarer Windereignisse kam. Die Unterschiede zwischen der Kahlschlagfläche und dem Flughafen Kuusamo waren dagegen uneinheitlich. In weiteren Frostwetterlagen konnten am Flughafen teils höhere, aber auch geringere Minimalwerte beobachtet werden, die einen jeweils umgekehrten Einfluss auf die Höhe der Tagesamplituden hatten (Abb. 59). Der Vergleich der zwei Standorte muss jedoch immer vor dem Hintergrund einer Distanz von etwa 40 km und damit anderen lokalklimatologischen Bedingungen gesehen werden (KOUTANIEMI 1983). Je nach Windgeschwindigkeit und primärer Windrichtung konnte darüber hinaus aufgrund der Distanz ein früheres oder späteres Eintreten bestimmter Wetterlagen beobachtet werden.

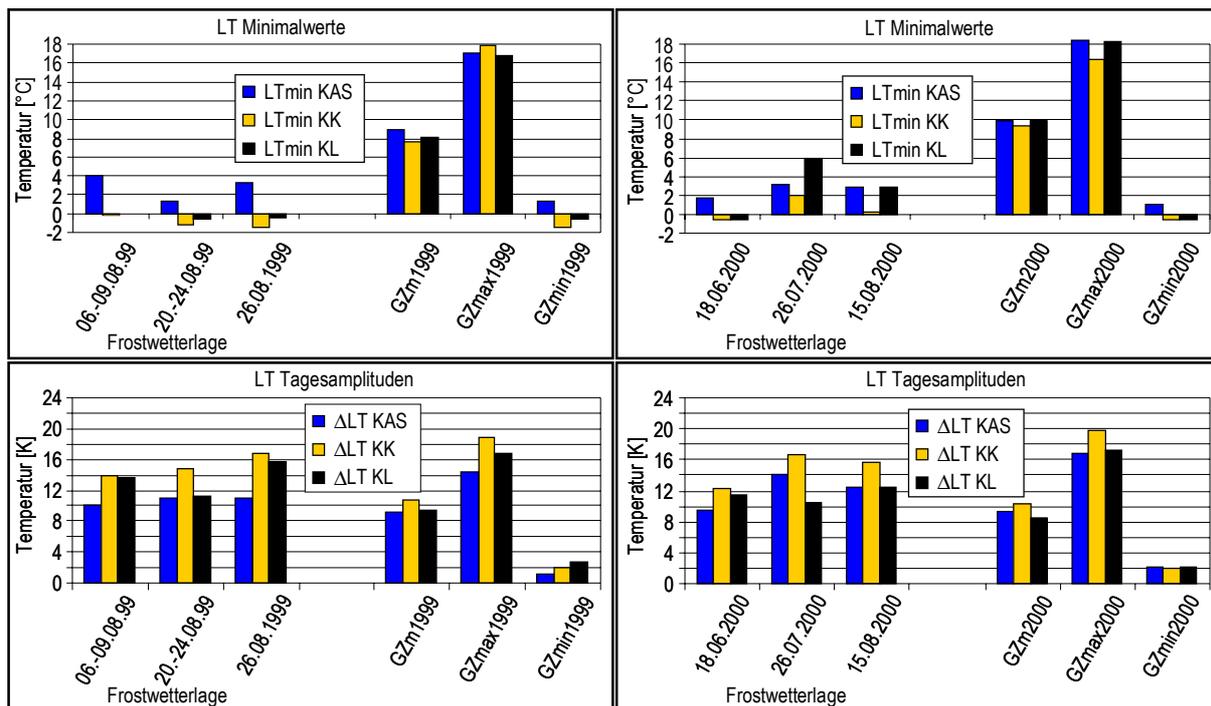


Abb. 59: Nächtliche Minimalwerte und Tagesamplituden der Lufttemperaturen auf der Kahlschlagfläche (KAS) und an den Referenzstandorten Kuitaköngäs (KK) und Kuusamo Flughafen (KL) während aufgetretener Frostwetterlagen sowie Vergleichswerte der gesamten Messzeiträume (GZ)

Über die Messwerte der *Erdoberflächentemperatur* als Referenzparameter zeichneten sich sämtliche Frostwetterlagen durch das Auftreten negativer Werte aus, die geringe Tagesmittel zur Folge hatten. In der Regel entwickelten sich, wie bei den Lufttemperaturen, überdurchschnittliche Gegensätze zwischen Tag und Nacht als Folge der geringen Minimalwerte. Eine Ausnahme bildete die frühsommerliche Frostwetterlage am 17./18.6.2000 in Folge geringer Tageshöchstwerte in den Beständen (Abb. 60).

Zwei systematische Merkmale der *Erdoberflächentemperaturen* bestimmten die Unterschiede zwischen den Versuchsflächen im Verlauf von Frostwetterlagen. Zum einen wurden analog zu den Referenzzeiträumen höhere Tagesmittel auf der Kahlschlagfläche registriert als in den Beständen, und zum anderen lagen die nächtlichen Minimalwerte disjunktiv zu den Referenzzeiträumen unter denen der Bestände. Eine Ausnahme bildete der durch verhältnismäßig hohe nächtliche Windgeschwindigkeiten geprägte 26.8.1999, an dem im windgeschützten Aufforstungsbestand die geringsten Minima gemessen wurden. Der Vergleich der Bestände gab die Verhältnisse der Referenzzeiträume wieder, wenn auch mit anderen Beträgen. In der Regel wurden im Aufforstungsbestand sowohl höhere Maximal- als auch geringere Minimalwerte registriert als im Altbestand. Davon abweichend konnten während einiger Tage entgegengesetzte Verhältnisse beobachtet werden. Die Tageshöchstwerte hingen dabei vielfach vom Zeitpunkt

bewölkungsbedingter Einstrahlungs- und Beschattungsphasen ab, während nächtliche Minimalwerte im Altbestand stärker windbeeinflusst waren als im Aufforstungsbestand.

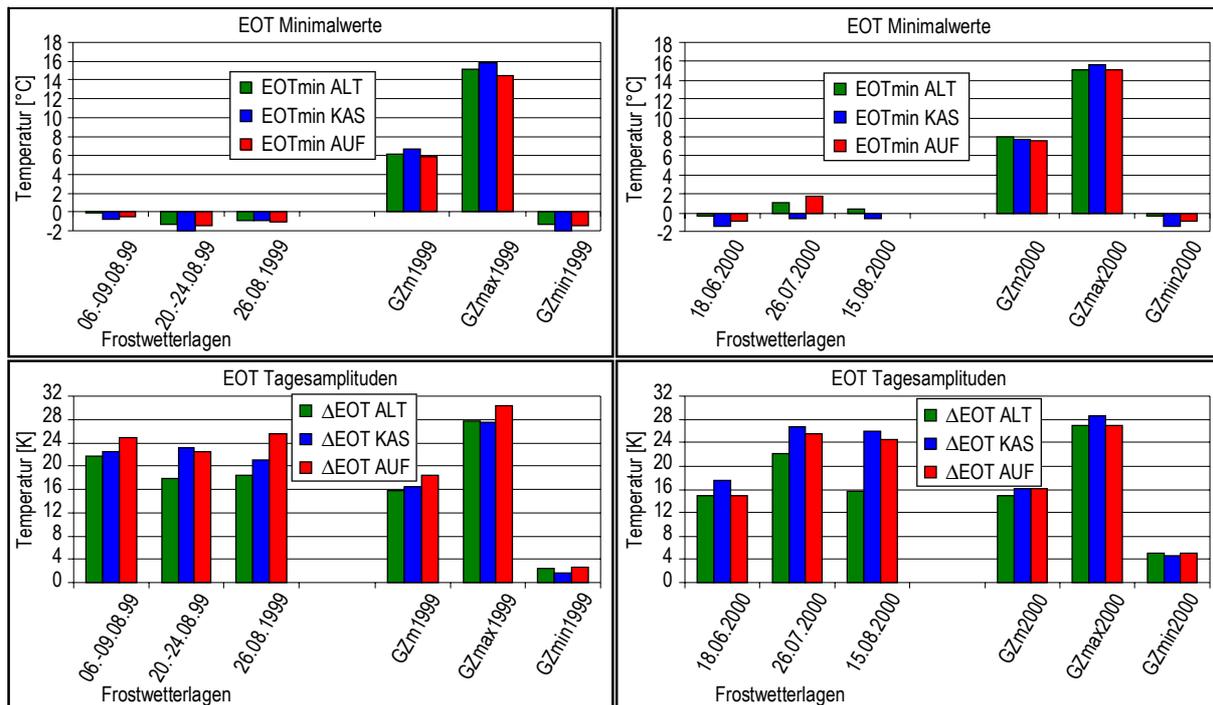


Abb. 60: Nächtliche Minimalwerte und Tagesamplituden der Erdoberflächentemperaturen während aufgetretener Frostwetterlagen sowie durchschnittliche, höchste und geringste nächtliche Werte der gesamten Messzeiträume (GZ)

Die Analyse der Frostverhältnisse an den FMI-Referenzstandorten war lediglich auf Basis der Minimalwerte möglich (vgl. Kap. 4.4.2.2). Im Vergleich zur Tallage des Kiutaköngäs wurden analog zu den Referenzzeiträumen meist geringere bodennahe Minimalwerte auf der Kahlschlagfläche registriert (Abb. 61). Demgegenüber gab es jedoch eine Reihe von Ausnahmen meist windbedingter Ursache. Im Fall mehrtägiger Frostlagen wie der in Kapitel 4.5.2.1 beschriebenen Situation oder dem Zeitraum 20.8.-24.8.1999 erfolgte der Anstieg der Werte im Verbund mit höheren Windgeschwindigkeiten auf der Kahlschlagfläche früher als in der Tallage, sodass der jeweils letzte Tag am Kiutaköngäs mit geringeren Minimalwerten verbunden war. Daneben bildeten Tage mit verhältnismäßig hohen nächtlichen Windgeschwindigkeiten wie dem 26.8.2000 Ausnahmen. Hier wurden vermutlich in der Tallage geringere Windgeschwindigkeiten gemessen, die eine stärkere Auskühlung ermöglichten, zumal die Hauptwindrichtung (WSW) während der Nachtstunden quer zur Talrichtung lag.

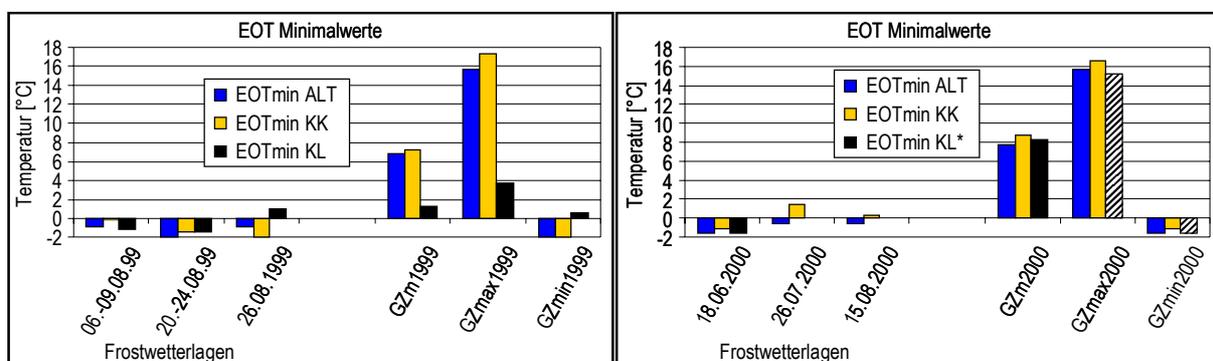


Abb. 61: Nächtliche Minimalwerte der Erdoberflächentemperaturen auf der Kahlschlagfläche (KAS) und an den Referenzstandorten Kiutaköngäs (KK) und Kuusamo Flughafen (KL) im Verlauf aufgetretener Frostwetterlagen sowie Vergleichswerte der gesamten Messzeiträume (GZ) (\* Die Daten des Flughafens waren bezogen auf den Gesamtzeitraum lückenhaft, vgl. Tab. 31.)

Die Minimalwerte des Standorts Kuusamo Flughafen standen nur ansatzweise in einem erkennbaren Zusammenhang mit den Messwerten der Kahlschlagfläche. Zwar wurden im Wesentlichen Frostwerte an den gleichen Tagen registriert, allerdings ließ sich nur bei größeren Unterschieden in den Windgeschwindigkeiten eine Wirkung auf die Minimalwerte erkennen. Darüber hinaus führte die bereits erwähnte Distanz zu den Versuchsflächen bzw. zum Kiutaköngäs zu einem eigenständigen Lokalklima, sodass z. B. im Verlauf der Frostwetterlage 20.8.-24.8.1999 an zwei Tagen in Folge keine negativen Werte gemessen wurden, während im Untersuchungsgebiet in allen Nächten Frostwerte auftraten. Aufgrund fehlender Messwerte der Referenzstationen musste die nächtliche Ausstrahlung in diesem Vergleich unberücksichtigt bleiben, obwohl sie einen bedeutenden Einflussfaktor auf die bodennahen Temperaturen darstellt.

Analog zu den Luft- und bodennahen Temperaturen lagen auch die Tagesmittel der *Bodentemperaturen* unterhalb der Durchschnittswerte der Referenzzeiträume, jedoch traten auch während der Frostwetterlagen keine Temperaturen unterhalb des Gefrierpunktes auf. Gemeinsames Merkmal der Frostwetterlagen waren darüber hinaus sowohl geringere Maximalwerte als auch unterdurchschnittliche Minimalwerte. Unterschiede zwischen den Flächen, die sich von den Differenzen der Referenzzeiträume abhoben, konnten lediglich in Form etwas größerer Tagesamplituden der Kahlschlagfläche gegenüber den Beständen beobachtet werden. Eine Ausnahme bildete die Frostwetterlage im Frühsommer 2000 (17./18.6.), in der sich die Kahlschlagfläche durch geringere Gegensätze zwischen den Extremwerten auszeichnete. Das Phänomen war allerdings nicht auf die Frostwetterlage beschränkt, sondern hielt bis zum Auftreten der ersten Tage mit Lufttemperaturen von 20 °C an (vgl. Kap. 4.3.2).

### Windverhältnisse

Im Hinblick auf die *Windgeschwindigkeiten* zeichneten sich Frostwetterlagen in der Regel durch etwas geringere mittlere und maximale Werte aus, als sie im Durchschnitt der Referenzzeiträume gemessen wurden. Etwas höhere Werte konnten am 18.6.2000 und am 26.7.2000 auf der Kahlschlagfläche beobachtet werden. Grundvoraussetzung für das Auftreten von Frostwerten war das Auftreten von Calmen oder Windgeschwindigkeiten von weniger als 0,6 bis 0,8 ms<sup>-1</sup> während ausstrahlungsreicher Nachtstunden. Wie einleitend beschrieben, zeichneten sich Frostwetterlagen durch einen überdurchschnittlich hohen Anteil von Calmen bezogen auf den Zeitraum der Nachtstunden aus, was sich besonders auf der Kahlschlagfläche bemerkbar machte (Abb. 62).

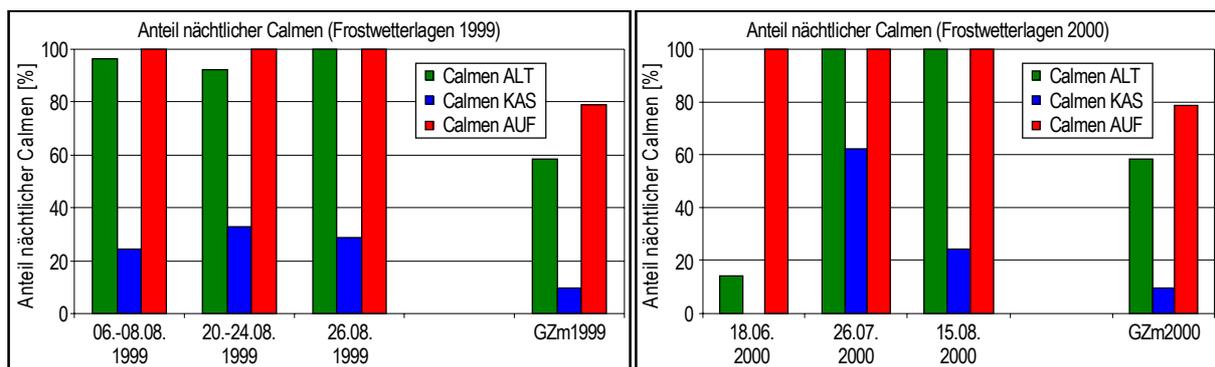


Abb. 62: Anteil windstillen Phasen während der Nachtstunden im Verlauf von Frostwetterlagen und im Mittel der gesamten Messzeiträume (GZ)

Die Unterschiede zwischen den Versuchsflächen entsprachen vordergründig den in Kapitel 4.4.4 beschriebenen Verhältnissen der Referenzzeiträume. Auch während der Frostwetterlagen wurden auf der Kahlschlagfläche die höchsten mittleren und maximalen Windgeschwindigkeiten gemessen, während im Aufforstungsbestand die jeweils geringsten Werte auftraten. Ein besonderes Merkmal der Frostwetterlagen waren dagegen die ausgesprochen geringen nächtlichen Windgeschwindigkeiten auf der Kahlschlagfläche, die deutlich unter den mittleren Nachtwerten der Referenzzeiträume lagen. Dies führte in Frostnächten

zu geringeren Unterschieden zwischen den Versuchsflächen und ermöglichte auf der Kahlschlagfläche das Absinken der Bodentemperaturen. Eine Ausnahme bildete der Nachtzeitraum 14./15.8.2000, der relativ hohe mittlere Windgeschwindigkeiten aufwies, doch gab es auch hier längere durch Calmen geprägte Phasen.

Im Vergleich zur Referenzstation des Flughafens in Kuusamo zeichnete sich die Kahlschlagfläche während der Frostwetterlagen durch höhere mittlere Windgeschwindigkeiten aus. Eine Ausnahme bildete wiederum der 26.7.2000, an dem nahezu gleiche Werte an beiden Standorten ermittelt wurden. Ein Vergleich der Maximalwerte war nicht möglich, da lediglich für die Wetterlagen 26.7.2000 und 15.8.2000 Werte des Flughafens vorlagen, die jedoch ebenfalls geringer waren als die der Kahlschlagfläche.

Wie einleitend beschrieben, waren die aufgetretenen Frostwetterlagen mit dem Einfließen kalter bzw. arktischer Luftmassen in den Untersuchungsraum verbunden. Die lokalen Windverhältnisse entsprachen in der Regel dem überregionalen Einfluss und waren durch primäre Windrichtungen aus nordwestlichen bis nordöstlichen Richtungen geprägt, sodass die zweite Frostnacht der in Kapitel 4.5.2.1 beschriebenen Wetterlage ein Ausnahme darstellte (Abb. 56). Während der eigentlichen Frostphasen in den Nachtstunden kam es jedoch aufgrund der geringen Windgeschwindigkeiten häufig zu umlaufenden Winden oder zu fehlenden Werten durch Calmen.

## **4.6 Zusammenfassung der Bestands- und Referenzmessreihen**

Die bestandsklimatologischen Messungen während der Vegetationsperioden 1999 und 2000 fanden in beiden Jahren unter klimatologisch repräsentativen Bedingungen statt. Die Durchschnittstemperaturen lagen an den Referenzstationen des finnischen Wetterdienstes zwar über den langjährigen Mitteln, wiesen jedoch keine Extrembedingungen auf. Die Niederschlagsverhältnisse zeigten ein indifferentes, unspektakuläres Bild. An den Referenzstandorten war der Sommer 1999 durch trockenere Verhältnisse geprägt, während sich der gleiche Zeitraum des Folgejahrs am Flughafen Kuusamo durch höhere und am Kiutaköngäs durch geringere Werte auszeichnete. Zusammenfassend war auch das Niederschlagsregime während der beiden Messkampagnen repräsentativ.

### **4.6.1 Geländeklimatologische Eigenschaften der Versuchsflächen**

Im Verlauf der beiden Messkampagnen offenbarten sich bestandsabhängige Unterschiede zwischen den Versuchsflächen, die auf entsprechende Sukzessionsstadien einzelner Flächen übertragbar sind.

Die Strahlungsverhältnisse an den drei Standorten waren unverkennbar durch Vegetationsunterschiede geprägt. Die Baum- und Strauchschicht des lockeren, jedoch verhältnismäßig hohen und vielschichtigen Altbestands war verbunden mit den geringsten Transmissionsraten. Offensichtlich erfolgte der Strahlungsumsatz in weiten Teilen im Kronenraum, was zu geringen Globalstrahlungswerten im darunterliegenden Raum führte. Die Bestandsstruktur der Fläche führte darüber hinaus zu niedrigeren Strahlungsbilanzwerten während des Tages und zu einer geringeren nächtlichen Ausstrahlung als auf den anderen Flächen. Auf der Kahlschlagfläche waren die Strahlungsverhältnisse lediglich witterungsbeeinflusst und verdeutlichten die Verlagerung des Strahlungsumsatzes vom Kronenraum auf den Boden. Das Fehlen der Waldvegetation bewirkte größere Strahlungsbilanzgegensätze zwischen Tag und Nacht als in den Beständen. Die höhere nächtliche Ausstrahlung bildete abschließend die Grundlage für die geringsten bodennahen Temperaturen während strahlungsreicher windstillen Bedingungen. Die im Vergleich zum Altbestand dichtere, jedoch niedrigere und uniforme Aufforstung war durch höhere Schwankungen der Transmissionsraten gekennzeichnet. Darüber hinaus konnte der diffuse Anteil der Strahlung besser eindringen als in den Altbestand.

Das thermische Regime ließ in unterschiedlicher Weise je nach Messhöhe der Luft-, Erdoberflächen- und Bodentemperaturen ebenfalls Differenzen zwischen den drei Sukzessionsstadien erkennen. Auf der Ebene der Lufttemperaturen unterschieden sich die Flächen nur in den Extremwerten, wobei sich die Windverhältnisse als besondere Einflussgröße erwiesen. Die Windbremsung der Bestände führte zu größeren Tagesamplituden als auf der Kahlschlagfläche. Lediglich während windstillen Wetterlagen wurden auf der Kahlschlagfläche höhere Maximalwerte registriert. Der dichte Bestand der Aufforstung führte fast durchgängig zu windstillen Verhältnissen, in deren Folge es meist zu den größten Tagesamplituden der drei Flächen kam. So wurden ausschließlich in diesem Bestand negative Lufttemperaturen gemessen.

Ausgehend von geringeren Windeinflüssen und dem Strahlungsumsatz des Bodens ließen sich in Bodennähe deutlichere Diskrepanzen zwischen den Versuchsfleichen beobachten als in zwei Meter Höhe. Dabei hob sich der Kahlschlag in so weit von den Beständen ab, als dass dort die höchsten Tagesmittel registriert wurden, und es in ausgeprägten Strahlungswetterlagen zu den geringsten nächtlichen Minimalwerten mit Frosteinwirkung kam. Darüber hinaus waren die Beträge der Extremwerte jedoch wetterlagenabhängig. In den Beständen führten Sonnenflecken in Verbindung mit der effektiven Windbremsung häufig zu kurzzeitigen aber höheren Maximalwerten. In windbeeinflussten Nächten sanken die Werte stärker und teilweise länger in den Frostbereich als auf der Kahlschlagfläche. Sämtliche Frostereignisse der Messkampagnen waren von kurzer Dauer und geringer Intensität, sodass es nicht zu sichtbaren Schädigungen der Vegetation kam. Die Bodentemperaturen folgten im Wesentlichen den Einstrahlungsverhältnissen, wodurch sich auf der Kahlschlagfläche die höchsten Durchschnittswerte und während strahlungsreicher Bedingungen die höchsten Gegensätze zwischen Tag und Nacht ausbildeten. Im Altbestand wurden in der Regel geringere Mittel- und Minimalwerte gemessen als auf den anderen Flächen.

Die Niederschlags- und Feuchteverhältnisse waren in der durch die Versuchsfleichen repräsentierten Sukzessionsreihe deutlichen Veränderungen unterworfen. Auf der Kahlschlagfläche ließ sich eine Zunahme der den Boden erreichenden Niederschläge verzeichnen. Daneben führte der offene Himmel zu einer gleichmäßigen Niederschlagsverteilung, da Interzeptionsverluste und Abtropfvorgänge entfielen. Die ebenfalls höhere potenzielle Evaporation mündete in einer deutlich negativen Gesamtbilanz, während sie in den Beständen annähernd ausgeglichen war. Im Aufforstungsbestand wurde trotz homogener Bestandsstruktur eine größere Variabilität in der Niederschlagsverteilung und der Bestandsinterzeption beobachtet als im Altbestand. Der Unterschied in der Gesamtsumme war zwischen den Beständen jedoch gering.

Die lokalen Windverhältnisse zeigten sich ebenfalls in hohem Maße durch die Bestandsstrukturen der Versuchsfleichen beeinflusst. Gegenüber dem Altbestand ließen sich auf der Kahlschlagfläche drei- bis vierfach höhere Windgeschwindigkeiten beobachten. Im Vergleich zum Aufforstungsbestand lagen die Werte je nach Bezugszeitraum annähernd sechs- bis siebenfach höher. In den durch gegensätzliche Hauptwindrichtungen geprägten Sommern 1999 und 2000 kam es nicht zu Windgeschwindigkeiten, die zu Windschäden führten.

#### **4.6.2 Unterschiede zwischen Versuchsfleichen und Referenzstandorten**

Die im Zuge der beiden Messkampagnen durchgeführten Vergleiche zwischen den Versuchsfleichen und den Referenzstandorten des Wetterdienstes offenbarten zum Teil deutliche räumliche Disparitäten im lokalen Klima des Untersuchungsgebiets. Ausgangspunkt der Vergleiche war in der Regel die Kahlschlagfläche, deren Messumfeld angenähert dem offizieller Wetterstationen entsprach. Die Diskrepanzen zwischen den Standorten verdeutlichten darüber hinaus die Problematik der Aussagefähigkeit von entfernten oder in besonderen Reliefeinheiten (Kiutaköngäs) gelegenen Messpunkten.

In Abgrenzung von der Tallage des Oulankajoki, ließ sich der Bereich der Versuchsfleichen anhand der in dieser Untersuchung ermittelten Temperaturverhältnisse dem Hochland zuordnen (vgl. KOUTANIEMI

1983). Diese Zuordnung ergab sich aus größeren Analogien der Tagesmittelwerte und der Temperatursummen des Kahlschlags im Vergleich zur etwa gleich hoch gelegenen, jedoch 40 km südlich gelegenen Station des Flughafens Kuusamo (Lentoasema). Gegenüber der nur 4 km entfernten, aber 136 m tiefer gelegenen Wetterstation Kiutaköngäs ließ sich ein für die Sommermonate üblicher Temperaturgradient feststellen. In der Tallage traten neben den in der Regel höheren Tagesmittelwerten höhere Maximal- und geringere minimale Temperaturen auf und damit auch größere durchschnittliche Tagesamplituden. Dieser Zusammenhang bestätigte sich auch während der aufgetretenen Strahlungs- und Frostwetterlagen.

Bodennahe Temperaturen wurden vom finnischen Wetterdienst ausschließlich in Form von Minimalwerten veröffentlicht. Ausgehend vom Kahlschlag waren jedoch auch hier größere Analogien zur Station des Flughafens als zum Kiutaköngäs zu beobachten. Meist bestand ein positiver Gradient in den Minimalwerten zwischen Tallage und Hochland, d. h., es traten geringere Minimalwerte auf der Kahlschlagfläche auf. In Abhängigkeit von Wetterbedingungen war die Ausprägung des Gradienten jedoch höchst variabel. Als Haupteinflussfaktoren erwiesen sich Windgeschwindigkeit und -richtung und die damit verbundenen Kanalisierungseffekte im Oulankatal. Beispielsweise wurden während Frostwetterlagen je nach überregionaler Hauptwindrichtung und der damit verbundenen Windexposition in der Tallage dort oder im Hochland geringere Minima gemessen.

Im Hinblick auf die Niederschläge ließ sich, abweichend von den Temperaturen, eine höhere Affinität zwischen den Werten der näher zueinander gelegenen Standorte beobachten. In der ersten Messkampagne waren die Niederschlagsmengen annähernd gleich, und im Folgejahr wurden auf der Kahlschlagfläche etwa 30 % höhere Werte gemessen. In beiden Vegetationsperioden lagen die Niederschläge jedoch deutlich unter den Werten des Flughafens Kuusamo.

Ein Vergleich der Windverhältnisse war nur zwischen der Kahlschlagfläche und dem Flughafen möglich. An diesem wurden in beiden Messkampagnen geringere Werte registriert als auf der Kahlschlagfläche, wobei die Unterschiede in der ersten Messkampagne größer waren als in der zweiten. Die Distanz der Stationen verdeutlicht darüber hinaus auch ein Problem im Vergleich von entfernten Standorten. Auf den Versuchsflächen wurden im Jahr 2000 geringere Werte gemessen als im Vorjahr, während am Flughafen höhere auftraten. Darüber hinaus ließen sich in beiden Messkampagnen Abweichungen der Hauptwindrichtungen von  $-30$  bis  $-45^\circ$  zwischen Kahlschlagfläche und Flughafen beobachten.

---

## 5 Evaluation der räumlichen Übertragbarkeit klimaökologischer Modelle

Die im Rahmen dieser Untersuchung ermittelten Ergebnisse zeigen den Einfluss unterschiedlicher Sukzessionsstadien im Rahmen einer forstwirtschaftlichen Nutzung auf die lokalen Klimabedingungen eines für den borealen Raum typischen Standorts. Die geländeklimatologischen Unterschiede zwischen den Versuchsflächen und den Referenzstandorten verdeutlichen darüber hinaus die Variabilität lokaler Klimabedingungen im Hinblick auf Distanz, Relief und Vegetation.

Diese Variabilität unterstreicht die Bedeutung lokalklimatologischer Messungen für die Ausweisung von Wachstums- oder Gefährdungspotenzialen in Räumen mit einem rudimentären oder weitmaschigen Netz offizieller Wetterstationen. Eine Vielzahl von Modellansätzen basiert auf lokal erhobenen Messdaten und ihrer räumlichen Modifikation durch verschiedene Einflussfaktoren (LINDKVIST 1997, BLENNOW & PERSSON 1998, LINDKVIST & CHEN 1999). Als wesentliche Einflussfaktoren haben sich im Rahmen früherer Untersuchungen trotz unterschiedlicher Ausrichtung und Ansatzpunkte der Arbeiten Orographie, Flächennutzung, Hydrographie und Pedologie herauskristallisiert (DUTTMANN & MOSIMANN 1994, KLEIN 1994, HANNAH et al. 1995, KÖNIG 1995, FU & RICH 2000, SCHAAB 2000).

Ein Problem vieler Modelle ist die hohe Anforderung hinsichtlich der verwendeten Variablen. Im Rahmen von Modellentwicklungen werden neben geländeklimatologischen Messwerten auch sämtliche raumbezogenen Daten selbstständig erhoben. Dies führt zu einer erheblichen Einschränkung der Übertragbarkeit der Modelle, sofern die benötigten Daten für andere Standorte nicht zur Verfügung stehen. Eine kommerzielle Nutzung von Modellen zur Ausweisung von Gunsträumen oder Gefährdungspotenzialen würde zwangsläufig scheitern, wenn potenzielle Kunden wie Waldbesitzer oder Forstunternehmen sämtliche benötigten Daten selbst erheben müssten.

So ist es nahe liegend, das Angebot öffentlicher und privater Anbieter von flächenhaften Daten auf ihre Eignung zur Ausweisung klimaökologischer Standorttypen aus den o. g. Bereichen zu untersuchen. Die technische Entwicklung in der Erfassung räumlicher Informationen, unterstützt durch die Möglichkeiten der Fernerkundung, erlauben es den nationalen Landesvermessungen zunehmend, Inhalte kostengünstig anzubieten. In Finnland stellt das NLS (National Land Survey = finn.: Maanmittauslaitos) landesweite Daten zum Relief, zur Landnutzung bzw. Forstinventur und die Inhalte der Grundkarten (Peruskartta/Maastokartta) in digitaler Form zur Verfügung. Die Aufbereitung der Daten folgt dabei kartographischen Gesichtspunkten bzw. im Fall des Datensatzes der nationalen »Landnutzung und Waldinventur« den Kundeninteressen der Forstwirtschaft.

Vor diesem Hintergrund galt es die Frage zu erörtern, inwieweit entsprechende Daten den Anforderungen aktueller lokalklimatologischer Modelle genügen und so ihren universellen Einsatz ermöglichen bzw. eine Übertragbarkeit in andere Räume erlauben.

### 5.1 Modellanforderungen

Moderne geo- oder klimaökologische Modellansätze verfolgen häufig den Ansatz, punktuelle Messungen über geostatistische Verfahren wie Kriging (MAHERTON 1971, ISAACS & SRIVASTAVA 1989), Cokriging oder multilineare Regression (ODEH et al. 1994) zu extrapolieren und zu überprüfen. Die Stichproben werden dabei, wie bereits erwähnt, durch stationäre Datenlogger oder in Form von Messfahrten erhoben. Der letztgenannte Punkt unterliegt in borealen Räumen jedoch zwei wesentlichen Einschränkungen. In vielen Fällen ist ein für Messfahrten notwendiges Verkehrsnetz zu weitmaschig, darüber hinaus fehlen in Folge der nördlichen Breite in den Sommermonaten die notwendigen nächtlichen Bedingungen, wie sie in einigen Ansätzen genutzt wurden (BLENNOW & PERSSON 1998, DUTTMANN & MOSIMANN 1994, SÖDERSTRÖM & MAGNUSSON 1995).

Im Mittelpunkt der Modellanforderungen stehen meist flächenhafte Daten der klimamodifizierenden Parameter, die als Variablen Eingang in die Modelle finden. Im Zusammenhang mit den o. g. punktuellen Messungen soll so eine möglichst realistische Abbildung der klimaökologischen Verhältnisse eines Untersuchungsgebiets wiedergegeben werden. Bezogen auf den borealen Raum ist das Ziel in der Regel die Prognose abiotischer - in diesem Fall klimatologisch bedingter - Gefährdungen der Waldvegetation oder der Regenerationschancen nach Kahlschlägen. Zwei für die Borealis typische Problemfelder bilden entsprechend ihrer Bedeutung den Schwerpunkt einer Vielzahl von Untersuchungen:

- *Modellansätze zur Temperaturverteilung und Frostgefährdung*
- *Modellansätze zur Prognose von Windgefährdungen*

Am Beispiel des in Kapitel 2 beschriebenen Untersuchungsgebiets soll verdeutlicht werden, welche Modellanforderungen sich durch die Daten der nationalen Katasterverwaltung erfüllen lassen.

## 5.2 Datengrundlagen

Zur Wiedergabe der klimamodifizierenden Parameter standen für das Untersuchungsgebiet die bereits genannten Höhen- und Landnutzungsdaten der finnischen Landesvermessung zur Verfügung. Die angebotenen Datenstrukturen lassen sich primär in zwei Gruppen unterteilen, die sich in ihren Inhalten ergänzen. Höheninformationen und der Datensatz der nationalen »Landnutzung und Waldinventur« wurden in Form von Rasterdaten (GRIDs) ausgeliefert, während sämtliche Inhalte der finnischen Grundkarten wie beispielsweise Informationsebenen zur Verkehrs- und Versorgungsinfrastruktur, Bebauung, Landnutzung und Gebietsabgrenzung in Form von Vektordaten vorlagen. Tabelle 19 fasst die vorhandenen Datenstrukturen zusammen.

Tab. 19: *Räumliche Datengrundlagen der finnischen Landesvermessung*

Datensatz	Aufbau/Herkunft
Rasterdaten (Format ArcInfo GRID)	Rasterweite 25 m x 25 m
Digitales Höhenmodell (DHM)	Isohypsen der finnischen Grundkarte 1:20.000
Landnutzung und Waldinventur	Grundkarten, Sat-Szenen, Trainingsfelder*
Vektordaten (Format ArcInfo)	Genauigkeit entsprechend Karten 1:5.000 - 1:20.000
Transport (Verkehrsnetz)	Linien-, Punkt- und Textinformationen
Transmission (Ver- und Entsorgungsnetz)	Linien-, Punkt- und Textinformationen
Terrain/1; Terrain/2 (Landnutzung)	Flächen-, Linien-, Punkt- und Textinformationen
Buildings (Bebauung)	Flächen-, Linien- und Textinformationen
Elevations (Isohypsen/Isobathen)	Linien-, Punkt- und Textinformationen
Abgrenzung besonderer Gebiete	Linien-, Punkt- und Textinformationen
administrative Abgrenzungen	Linien-, Punkt- und Textinformationen
agrarische Nutzflächen	Flächen-, Linien- und Textinformationen

\* siehe Text

Sämtliche Datengrundlagen wurden, sofern sie nicht bereits entsprechend vorlagen, in das finnische KKK-Koordinatensystem konvertiert. Bezugsmeridian ist 30° östlicher Länge, von dem das Zentrum des Untersuchungsgebiets 28,5 km entfernt liegt. Sofern Teilaspekte der Modelle umsetzbar waren, wurde ausgehend vom südwestlichen Koordinatenpaar 4453716/7343966 ein Bereich von neun Grundkartenblättern 1:50000 bzw. 40 km x 36 km ausgewählt. Der so definierte Raum ist deutlich größer als das Untersuchungsgebiet. Auf diese Weise konnten Berechnungsprobleme in den Randbereichen vermieden werden.

### 5.2.1 Digitales Höhenmodell (DHM)

Die Grundlage für die räumliche Abbildung des Georeliefs, der Grenzfläche zwischen Litho- und Atmosphäre (DIKAU & SCHMIDT 1999), bildet das digitale Höhenmodell der finnischen Landesvermessung (Maanmittauslaitos). Das landesweit verfügbare DHM weist eine horizontale Rasterauflösung von 25 m und eine vertikale Auflösung von 0,1 m auf. Grundlage des DHM sind die Konturlinien (Isohypsen und Küstenlinien) der finnischen Grundkarte 1:20000, die über Triangulation in ein gleichmäßiges GRID überführt wurden. Die genaue Vorgehensweise der DHM-Erstellung ist nicht in Form wissenschaftlicher Literatur dokumentiert (FORSEVIK 2005). Abbildung 63 gibt die Höheninformationen des DHM und deren Verteilung im Untersuchungsgebiet wieder.

Digitale Höhenmodelle sind sowohl für Modellansätze zur Temperaturverteilung und Frostgefährdung als auch für die Prognose von Windgefährdungen von weitergehender Bedeutung. Die absolute Höhe ist bedeutend für die Temperatur- und Strahlungsverhältnisse. Als Beispiel sei die Abnahme der Lufttemperatur mit der Höhe unter trockenadiabatischen Bedingungen genannt. Besondere Wetterlagen und jahreszeitliche Variationen sind dabei jedoch gesondert zu berücksichtigen (vgl. Kap. 4.4.2.1, HUOVILA 1970, 1987). Die Höhenlage eines Punktes bestimmt ferner die Wegstrecke, welche die direkte Einstrahlung durch die Atmosphäre zurücklegen muss und damit die Extinktionsverhältnisse (KÖNIG 1995). Der zuletzt genannte Punkt spielt jedoch nur bei großen Höhenunterschieden eine Rolle.

Neben der absoluten Höhe führen auch relative Höhenunterschiede zu lokalklimatologischen Unterschieden zwischen Standorten. Hangneigung und Exposition als erste Ableitungen eines DHM sind prägend für den tages- und jahreszeitlichen Strahlungsgenuss eines Punktes bzw. dessen Beschattung durch die Umgebung (BUFFO et al. 1972, IQBAL 1982, FU & RICH 1999, 2000). Die Hangneigung bildet darüber hinaus die Basis für Boden- und Oberflächenabflüsse sowie für die lokalklimatologisch bedeutenderen Kaltluftabflüsse in Bodennähe (BEVEN & MOORE 1993, BEVEN 1995, KÖNIG 1995). Weitere Einflussfaktoren ergeben sich aus den Neigungs- und Expositionsänderungen, d. h. der zweiten Ableitung des DHM (BAUER et al. 1985, FRIEDRICH 1996, DIKAU & SCHMIDT 1999). Relative Höhenunterschiede sind des Weiteren entscheidend für den Windexpositionsgrad (GRATKOWSKI 1956, HÜTTE 1968, MILLER 1985, ADRIAN 1994).

#### Eignung des DHM

Verschiedene Untersuchungen verdeutlichen, dass die Qualität eines DHM entscheidend für die Abbildung des Georeliefs ist. Sowohl die horizontale Rasterweite als auch die vertikale Auflösung bestimmen die spätere Güte eines Modells. Die Auswahl der GRID-Größe ist sowohl verbunden mit der räumlichen Ausdehnung des Untersuchungsgebiets und der dadurch entstehenden Datenmenge als auch mit den physikalischen Gesetzmäßigkeiten der zu untersuchenden Phänomene und Prozesse in unterschiedlichen räumlichen Skalen (vgl. FLORINSKY & KURYAKOVA 2000).

Rasterzellen mit geringen Ausmaßen führen zu einer detaillierteren Abbildung reliefabhängiger Prozesse, stellen jedoch besonders in großer räumlicher Ausdehnung ein Datenmengenproblem dar, welches u. U. zu nicht mehr tolerierbaren Verarbeitungszeiten führt. Darüber hinaus geben sie in vielen Fällen sogar eine Pseudogenauigkeit wieder, da das unregelmäßige Ausgangsraster, das zur GRID-Erstellung geführt hat, meist von erheblich geringerer Dichte ist.

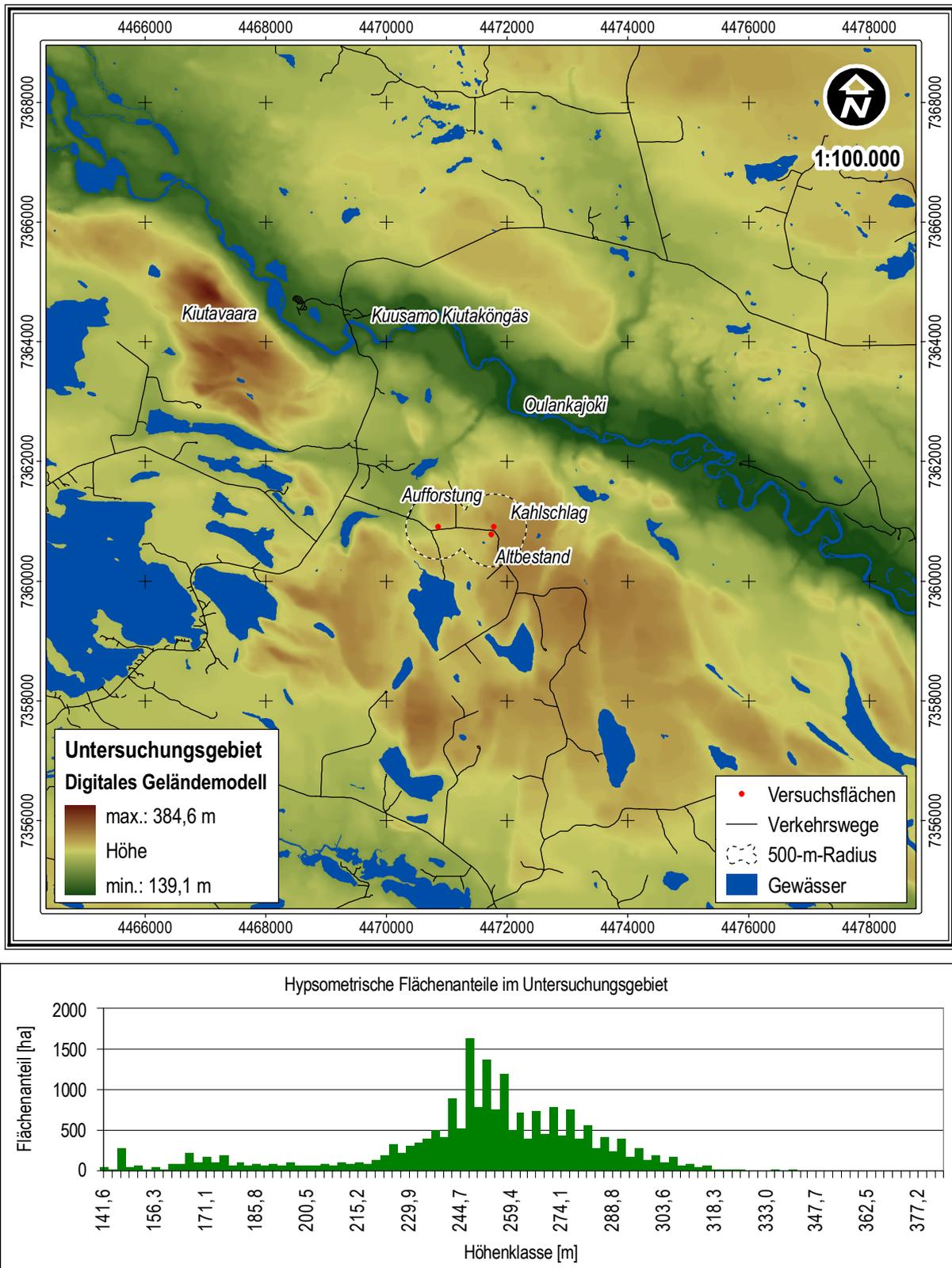


Abb. 63: Digitales Höhenmodell des Untersuchungsgebiets und die Verteilung der Höhenstufen (Quelldaten: NLS 1999a)

Große Rasterzellen führen hingegen zu einer Generalisierung und sind mit einer Über- oder Unterbewertung der o. g. Vorgänge verbunden. Reliefformen wie Rücken, Hangdellen oder vertikale Hangdiskontinuitäten mit geringeren Ausmaßen als drei Rasterzellen werden nicht oder nur ungenügend abgebildet. Darüber hinaus kann es zu einer Lageverschiebung markanter Reliefpunkte kommen (FRIEDRICH 1996). Weitere Folgen einer reduzierten horizontalen Auflösung sind:

- *Geringere Hangneigungsgradienten bei stärkerem Gefälle (CHANG & TSAI 1991, WOLOCK & PRICE 1994, ZHANG & MONTGOMERY 1994, THIEKEN et al. 1999),*
- *stärkere Gradienten bei flacherem Gefälle (THOMPSON et al. 2001),*
- *geringere Spannweiten in Wölbungs- und Bogenbereichen von Sätteln und Mulden (THOMPSON et al. 2001),*
- *größere spezifische Einzugsbereiche in Hochlagen (THOMPSON et al. 2001) und*
- *geringere Einzugsbereiche in Tallagen und fehlerhafte Abgrenzung von Hang und Sohle (ROESCHMANN & LEHMEIER 1993).*

Mit der Abnahme der vertikalen Präzision sind nach THOMPSON et al. (2001) weiterhin folgende Probleme verbunden:

- *eine steigende Anzahl von Flächen ohne Neigung und Krümmung, aber auch*
- *eine höhere Zahl von Bereichen mit stärkerer Neigung und hoher Bogenneigung.*

Methodische Annäherungen zur Bestimmung optimaler Rastergrößen haben sich erwartungsgemäß als abhängig von bestimmten Fragestellungen erwiesen. Für die Erfassung der Bodenfeuchteverhältnisse einer 4500 m<sup>2</sup> großen Versuchsfläche ermittelten z. B. FLORINSKY & KURYAKOVA (2000) optimale Zellgrößen zwischen zwei und vier Metern, während FRIEDRICH (1996) für geomorphometrische Reliefanalysen und einen Abbildungsmaßstab von 1:25000 ein Raster von 20 m als guten Kompromiss ansah. Größere Untersuchungsräume (84 km<sup>2</sup>) wurden auch von GARBRECHT & MARTZ (1993, 1994) am Beispiel von Entwässerungsmodellen analysiert. Für Rasterweiten von 30 m bei 0,9 m Höhengenaugigkeit ließen sich mit dem Modell in der Regel Abweichungen von lediglich 10 % der Messwerte realisieren. Systematische Untersuchungen zur Ermittlung optimaler Zellgrößen für lokalklimatologische Fragestellungen wurden bisher nicht durchgeführt. Es haben sich jedoch im Hinblick auf die Rasterweiten ähnliche Dimensionen etabliert wie in den zuvor genannten Bereichen. Für Strahlungsmodelle nutzte beispielsweise MÖLG (2002) Rasterweiten von 25 m, LEKES & DANDUL (2000) verwendeten ein 100-m-Raster für Risikoklassifikationen von Windschäden und BLENNOW & PERSSON (1998) simulierten lokale Frostvariationen mittels einer Rasterweite von 125 m.

Alternativ zum DHM des NLS wurden aus den Höheninformationen des nationalen topographischen Datenmodells (Tab. 19) weitere Geländemodelle mit Rasterweiten von 10 m und 100 m generiert (vgl. FRIEDRICH 1996, DIKAU & SCHMIDT 1999) und auf ihre praktische Nutzbarkeit überprüft. Ohne auf weitere Details einzugehen, wurde jedoch unter Abwägung der o. g. genannten Vor- und Nachteile die Ausgangsgröße des finnischen DHM übernommen. Für die Beibehaltung sprachen auch pragmatische Gründe wie die identische Rasterweite der »Landnutzung und Waldinventur« sowie die Vermeidung zusätzlicher Arbeitsschritte zur DHM-Erhebung (vgl. AUMANN 1994, OKSANEN & JAAKKOLA 2000). Dem zuerst genannten Punkt kommt dabei eine besondere Bedeutung zu, da die Verschneidung von Rasterdaten unterschiedlicher Auflösung in der Regel mit weiteren Fehlern verbunden ist.

### **5.2.2 Daten finnischen der »Landnutzung und Waldinventur«**

Eine weitere bedeutende Quelle für die Analyse der räumlichen, geländeklimatologischen Variabilität ist der Datensatz der nationalen »Landnutzung und Waldinventur«. Auf der Grundlage von regelmäßigen Felderhebungen, digitalen Karten und satellitengestützten Fernerkundungsdaten werden bis zu 83 Klassen zur Land- und Waldnutzung extrapoliert (VUORELA 1997, KATILA et al. 2000, TOMPPU 2000). Der Prozess der Datenaquisition ist in Abbildung 64 zusammengefasst.

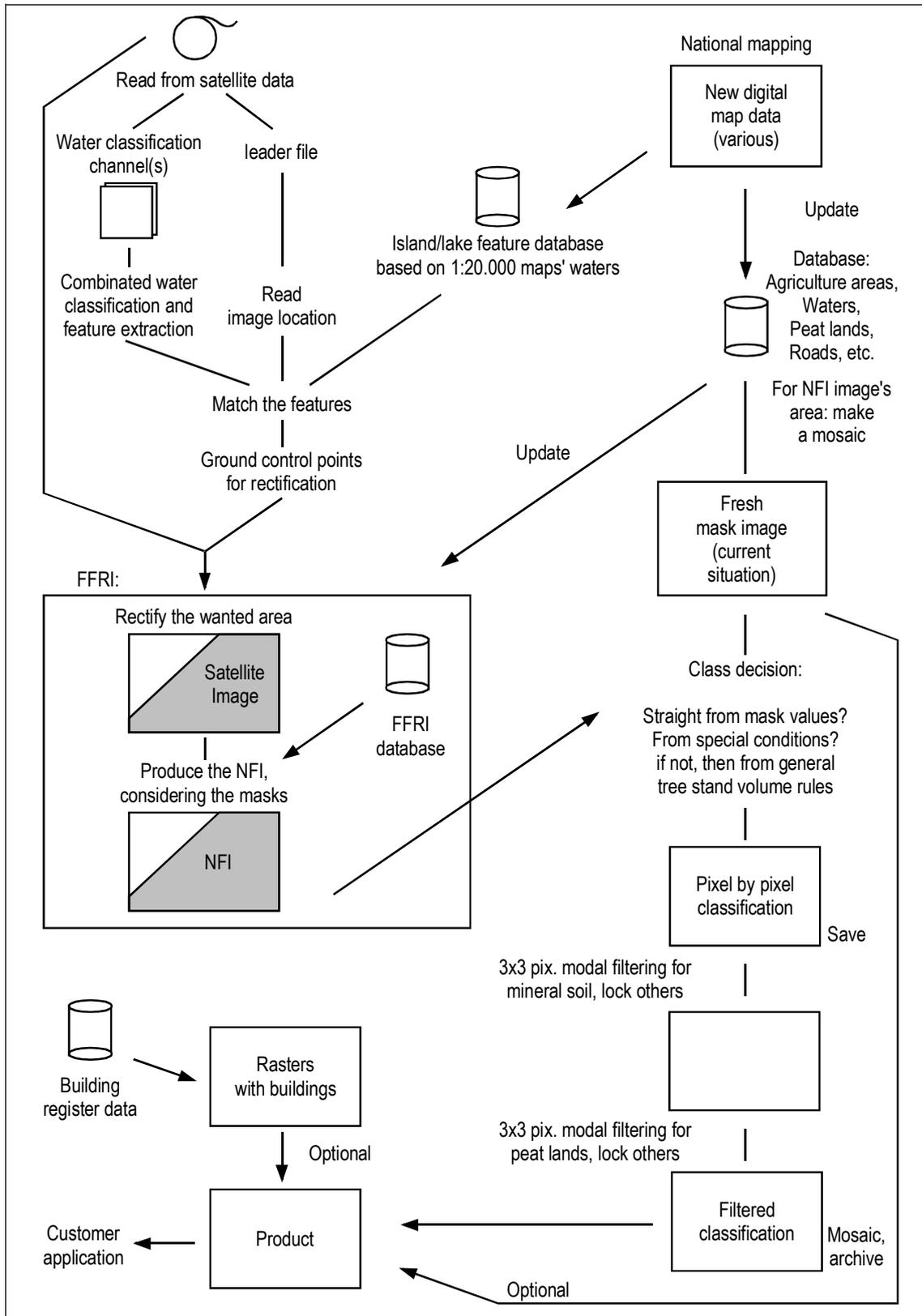


Abb. 64: Herstellungsprozess des Datensatzes der finnischen »Landnutzung und Waldinventur« (VUORELA 1997, verändert)

Das Endprodukt steht landesweit in der vierten Generation als GRID mit einer Rasterweite von 25 m zur Verfügung. Die Nutzungsklassen weisen Baumarten und Holzmengen von Waldbereichen, Kahlschlag- und Agrarflächen sowie bebaute Bereiche, aber auch Vorkommen von anstehendem Grundgestein, oligotrophe Moore und Gewässer aus. Abbildung 65 zeigt die Verteilung der übergeordneten Klassen im Untersuchungsgebiet.

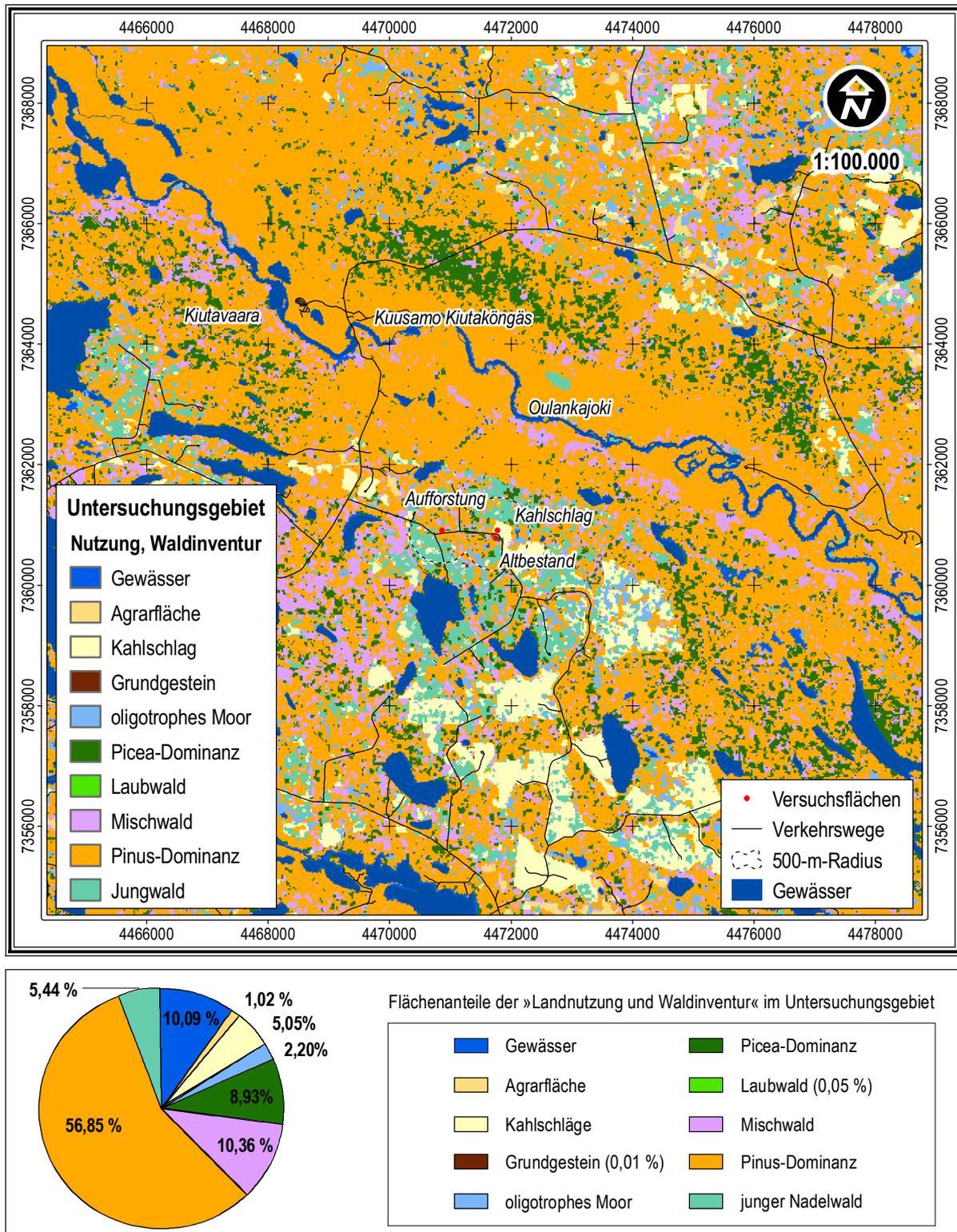


Abb. 65: Verteilung der Landnutzung im Untersuchungsgebiet (Quelldaten: NLS 1999b)

Die Datenstruktur der »Landnutzung und Waldinventur« beinhaltet je Zelle bis zu drei Informationen, die zu den genannten Klassen führen:

- *Nutzungstyp (z. B. Gewässer, Agrarfläche, Waldbestand),*
- *Nutzungseigenschaften bei bewaldeten Flächen (z. B. Picea-Dominanz mit  $101-151 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ ),*
- *Bodeninformationen bei bewaldeten Flächen (z. B. Pinus-Dominanz auf Mineralböden).*

Klimarelevante Informationen des Datensatzes lassen sich über die in Geoinformationssystemen implementierten Reklassifizierungsverfahren extrahieren. Als Beispiel seien die in einigen Modellansätzen genutzten Bodeninformationen sowie die Bestandsart genannt (JALKANEN & MATTILA 2000, MITCHELL & LANQUAYE-OPOKU 2004). Tabelle 20 verdeutlicht auszugswise die Datenstruktur und die daraus ableitbaren Informationsebenen. Die vollständigen Reklassifizierungstabellen finden sich in den Tabellen 33 bis 35 im Anhang.

Tab. 20: *Reklassifizierungsbeispiele für die Erhebung geländeklimatologisch relevanter Daten aus der finnischen »Landnutzung und Waldinventur«*

Ausgangs- klasse	Legende	Klasse Bestan	Legende Bestand	Klasse Holzmenge	Legende Index	Klasse Boden	Legende Boden
7	Gewässer	0	unbewaldet	0	kein Bestand	13	Gewässer
19	Kahlschlag neu a. Mineralboden	0	unbewaldet	0	kein Bestand	1	Mineralboden
40	oligotrophes Moor	0	unbewaldet	0	kein Bestand	4	Oligotrophes Moor
48	Fichtenwald 152-201 m <sup>3</sup> /ha (Torf)	1	Fichtendominanz	4	152-201 m <sup>3</sup> /ha	2	Torfboden
77	Kiefernwald <52 m <sup>3</sup> /ha (Mineralboden)	4	Kieferndominanz	6	<52 m <sup>3</sup> /ha	1	Mineralboden
142	junger Nadelwald o. Unterwuchs (Torf)	6	junger Nadelwald	22	k. A.	2	Torfboden

Das Beispiel führt sechs Klassen der »Landnutzung und Waldinventur« auf. Beispielhaft ist die Reklassifizierung zur Erhebung der von bewaldeten und unbewaldeten Standorten bzw. der Bestandsart (Tab. 33), der Nutzholzmenge (Tab. 34) oder den Bodeninformationen (Tab. 35) dargestellt.

### Eignung der finnischen »Landnutzung und Waldinventur«

Der Datensatz der »Landnutzung und Waldinventur« geht zurück auf Bemühungen des früheren finnischen Gewässer- und Umweltamtes zur Entwicklung einer satellitengestützten Erfassung des Vegetationsinventars in den Gewässerniederungen Finnlands im Jahr 1986 (KUITTINEN & SUCKSDORFF 1987). Im Verlauf der 80er-Jahre wandelte sich das Vorhaben unter Beteiligung verschiedener Institutionen zum nationalen Landnutzungs- und Waldklassifikationsprojekt, zumal seit längerem Forderungen nach einer Ergänzung der ausschließlich auf Felderhebungen basierenden Waldinventur bestanden (TOMPPU 1990, VUORELA 1997). Die Erfassung der Waldbestände dauerte zuvor etwa 10 Jahre, mit der Folge, dass Informationen über Teile des Landes am Ende der Inventurerhebung veraltet waren. Einschlag und Zustand des Waldes ließen sich schlecht abschätzen, Krankheiten und Schäden konnten nicht kontinuierlich erfasst werden. Weiterhin ließen sich die Wachstumsverhältnisse des Waldes in verschiedenen Landesteilen nicht vergleichen (TOMPPU 1990, 1991). Die erste Version eines satellitengestützten Datensatzes der »Landnutzung und Waldinventur« lag schließlich 1991 vor und lieferte gute inhaltliche Ergebnisse im Hinblick auf Bestandsabschätzungen für Flächen von mehr als 150000 ha (VUORELA 1997). Das Verfahren führte bereits zu diesem Zeitpunkt zu genaueren Ergebnissen als die alleinige Felderhebung (MUINONEN & TOKOLA 1990, TOMPPU 1990, 1993, TOKOLA & HEIKKILÄ 1997). Durch Integration digitaler Karteninformationen der Maßstäbe 1:50000 und 1:100000 wurde das Verfahren in den Jahren 1992 und 1994 weiter verbessert (VUORELA 1992, 1997). Besonders in der Abgrenzung von Waldregenerations- und Agrarflächen wurden erhebliche Verbesserungen erzielt, auch wenn in bestimmten Bereichen noch immer eine Nachkontrolle notwendig war (TOMPPU & HEIKKINEN 1999, KATILA et al. 2000).

Der hier genutzte Datenbestand der achten Waldinventur (1986-1994) ist nach wie vor für die Abschätzung großflächiger Bereiche ausgelegt. Die Kontrolle der Daten basiert landesweit auf 85672 Trainingsflächen (Sample-Plots). Die Flächen sind in Clustern zusammengefasst, die im Norden Finnlands eine Distanz von etwa 10 km zueinander haben. Innerhalb der Cluster beträgt der Abstand der Trainingsflächen 300 m (VUORELA 1997, JALKANEN & MATTILA 2000). Verschiedene Untersuchungen haben auch für kleinräumigere Anwendungen eine generelle Eignung der nationalen »Landnutzung und Waldinventur« aufgezeigt, jedoch ist lokal von einer deutlich höheren Fehlerrate sowohl im Hinblick auf den Lagefehler

(HALME & TOMPPO 2001) als auch auf die Abschätzung des Holzvorrats der Waldbestände auszugehen (VUORELA 1997, GJERTSEN et al. 2000, TOKOLA 2000). Eine zellengenaue Vorhersage der mehrere hundert an den Trainingsstandorten erhobenen Variablen erlaubt das Verfahren nicht (LAPPI 2001). Typische Fehlerquellen bzw. Gütefaktoren ergeben sich - je nach Fragestellung - aus der Distanz zur nächstgelegenen Trainingsfläche (TOKOLA 2000) sowie Besonderheiten in der Wasserbilanz, den Bodennährstoffen und lokalklimatische Besonderheiten, die zu lokalen Besonderheiten in der Vegetation führen können (KUUSIPALO 1996).

Auf den Versuchsflächen dieser Untersuchung konnte einerseits eine recht gute Übereinstimmung mit den tatsächlichen Verhältnissen gefunden werden, andererseits trat ein weiteres bisher nicht genanntes Problem zu Tage: der inhaltliche Redaktionsstand digitaler Datengrundlagen.

Die Versuchsflächen umfassen zwischen 3 x 3 und 3 x 4 Rasterzellen bzw. schneiden 4 x 4 Zellen. Die Klassenzuordnung für den Altbestand war im Hinblick auf seine inhomogene Struktur zufrieden stellend wiedergegeben. Die Mischklassifizierung der Zellen zeigte folgendes Bild:

- *Pinus-dominiertes Bestand* <52 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>, 52-101 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> und 52-101 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> (7 Zellen),
- *Mischwaldbestand* 52-101 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> (2 Zellen) und angrenzend
- *Picea-dominierte Bereiche der Klasse* <52 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>.

Die Angabe der Holzmengen in den Klassen ließ für derart wenige Rasterzellen keine genauere Angabe zu, jedoch entsprach die im Jahr 2000 selbst erhobene Schätzung von 55 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> für alle Arten und die Gesamtfläche näherungsweise den hier angegebenen Werten.

Für den Bereich der Kahlschlagfläche wies der Landnutzungsdatensatz noch Klassen für kiefern-dominierte Bestände mit Rohholzmengen von <52 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> und 52-101 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> aus, was auf einen veralteten Redaktionsstand der Inventurdaten hinweist. Eine Lösung des Problems ermöglichte der Datensatz des nationalen topographischen Datenmodells, einer digitalen Fassung der finnischen Grundkarten mit neuerem Redaktionsstand. Über eine Vektor-Rasterkonvertierung und anschließende Reklassifizierung konnten jüngere Kahlschlagflächen eingepflegt werden.

Ein vergleichbares Problem in abgeschwächter Form konnte für die Aufforstungsfläche festgestellt werden. Für den größten Teil des Bereichs erfolgte eine Zuordnung zur Klasse »Jungwaldbestand«, für den jedoch keine Holzmengen angegeben werden. Die Rasterzellen des südlichen Bereichs wiesen eine Klassenzugehörigkeit zum kieferndominierten Bestand der Klasse <52 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> auf. Letztere sind vermutlich auf den Einfluss des südlich der Straße angrenzenden Bestands zurückzuführen. Abbildung 66 gibt in einem Ausschnitt des Untersuchungsgebiets mit den drei Versuchsflächen die Daten der »Landnutzung und Waldinventur« wieder.

Unter Nennung der zuvor genannten Probleme und unter der Maßgabe der Aktualisierung des Redaktionsstands in Bezug auf neue Kahlschlagflächen wurde der Datensatz der nationalen »Landnutzung und Waldinventur« in die Analyse einbezogen und als geeignet angesehen. Die Aussagefähigkeit des Datensatzes für kleine Flächen oder Einzelzellen ist dagegen begrenzt. Der Bedarf an einer weiteren Verbesserung der Klassifikationsmethoden für die laufende neunte Waldinventur spiegelt sich in einem breiten Spektrum aktueller Untersuchungen wider (TOMPPO & HEIKKINEN 1999, KATILA et al. 2000, HALME & TOMPPO 2001, KATILA & TOMPPO 2001, LAPPI 2001).

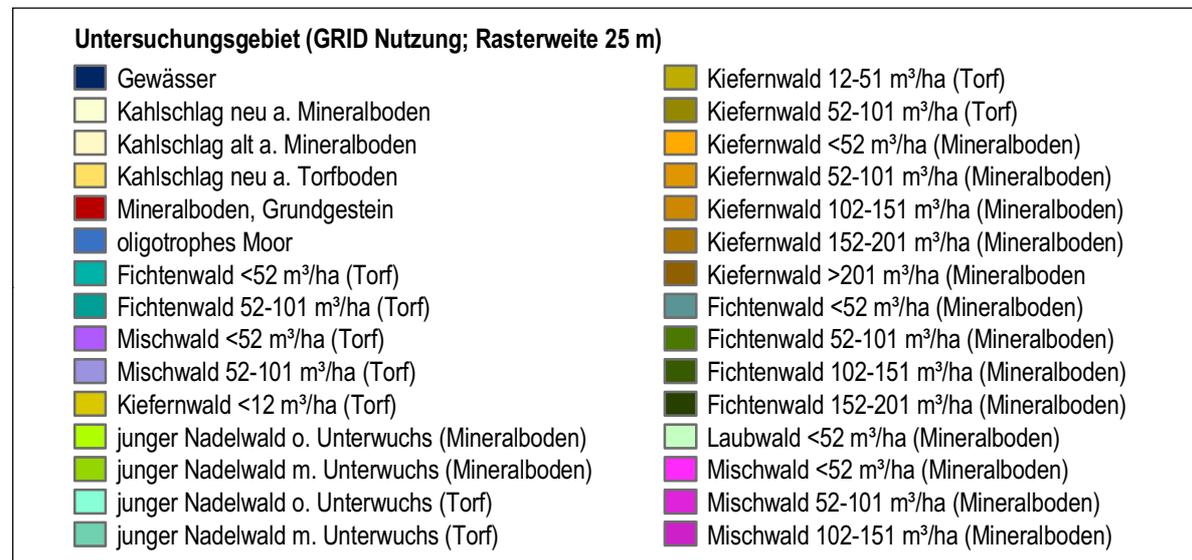
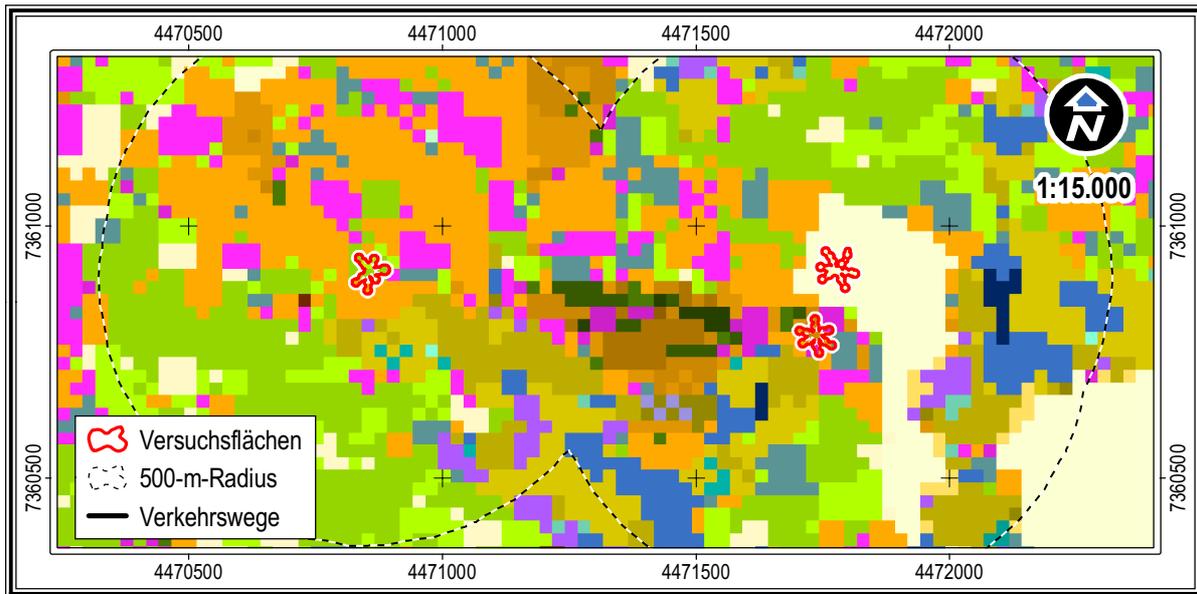


Abb. 66: »Landnutzung und Waldinventur« im Umfeld der Versuchsflächen; aktualisiert durch Daten des nationalen topographischen Datenmodells (Quelldaten: NLS 1999b, 1999c)

### 5.2.3 Nationales topographisches Datenmodell

Das nationale topographische Datenmodell Finnlands umfasst in digitaler Form zwölf Klassen topographischer Informationen mit einer Auflösung, die den Maßstäben 1:5000 bis 1:20000 entspricht. Der Aktualisierungszyklus beträgt für Straßen ein Jahr und für andere Informationsebenen fünf Jahre (NLS 1996, 2005).

Wie in Tabelle 19 bereits zusammengefasst, enthält der Datensatz alle Informationen topographischer Karten und somit einige Informationen, die über die zuvor vorgestellten GRID-Daten hinausgehen. Seitens der noch vorzustellenden geländeklimatologischen Modellansätze bestanden ausschließlich Anforderungen an flächen- und linienhaften Informationen. Die darüber hinaus vorhandenen Layer mit Punkt- und Textattributen wurden entsprechend nicht weiter ausgewertet.

#### 5.2.3.1 Transport und Transmission

Die beiden Datenebenen enthalten Informationen über das Verkehrsnetz und die Ver- und Entsorgungsstrukturen. Bedeutend für die Ausweisung klimaökologischer Standorttypen waren die linienhaften Attribute der Layer zur Extraktion von Schneisen innerhalb von Waldgebieten.

Der Transportlayer umfasst neben Straßen und Eisenbahnen auch Fährverbindungen, jedoch treten die zwei letztgenannten Inhalte im Untersuchungsgebiet nicht auf. Eine Unterklassifizierung der Straßen erlaubt theoretisch eine Abstufung in sieben Klassen, die sich aus der Anzahl der Fahrbahnen und der Straßenbreite ergibt (Tab. 21).

Tab. 21: Klassifizierung des Layers »Transport« innerhalb des Untersuchungsgebiets

Klasse	Legende	Type	Breite [m]	Länge [km]	Schneisenlänge [km]
12122	Straße IIb	Linie	5,0 - 6,5	1,8	1,0
12131	Straße IIIa	Linie	4,0 - 5,0	24,4	17,0
12132	Straße IIIb	Linie	3,0 - 4,0	29,3	18,2
12141	Nebenstraße	Linie	< 3,0	67,9	42,9

Abbildung 67 zeigt eine Übersicht des Transmissions- und Verkehrswegenetzes im Untersuchungsgebiet. Die Gesamtlänge beider Netze umfasst 198,5 km, von denen 128,1 km Waldschneisen ausbilden. Die Positionsgenauigkeit ist mit 3 m angegeben.

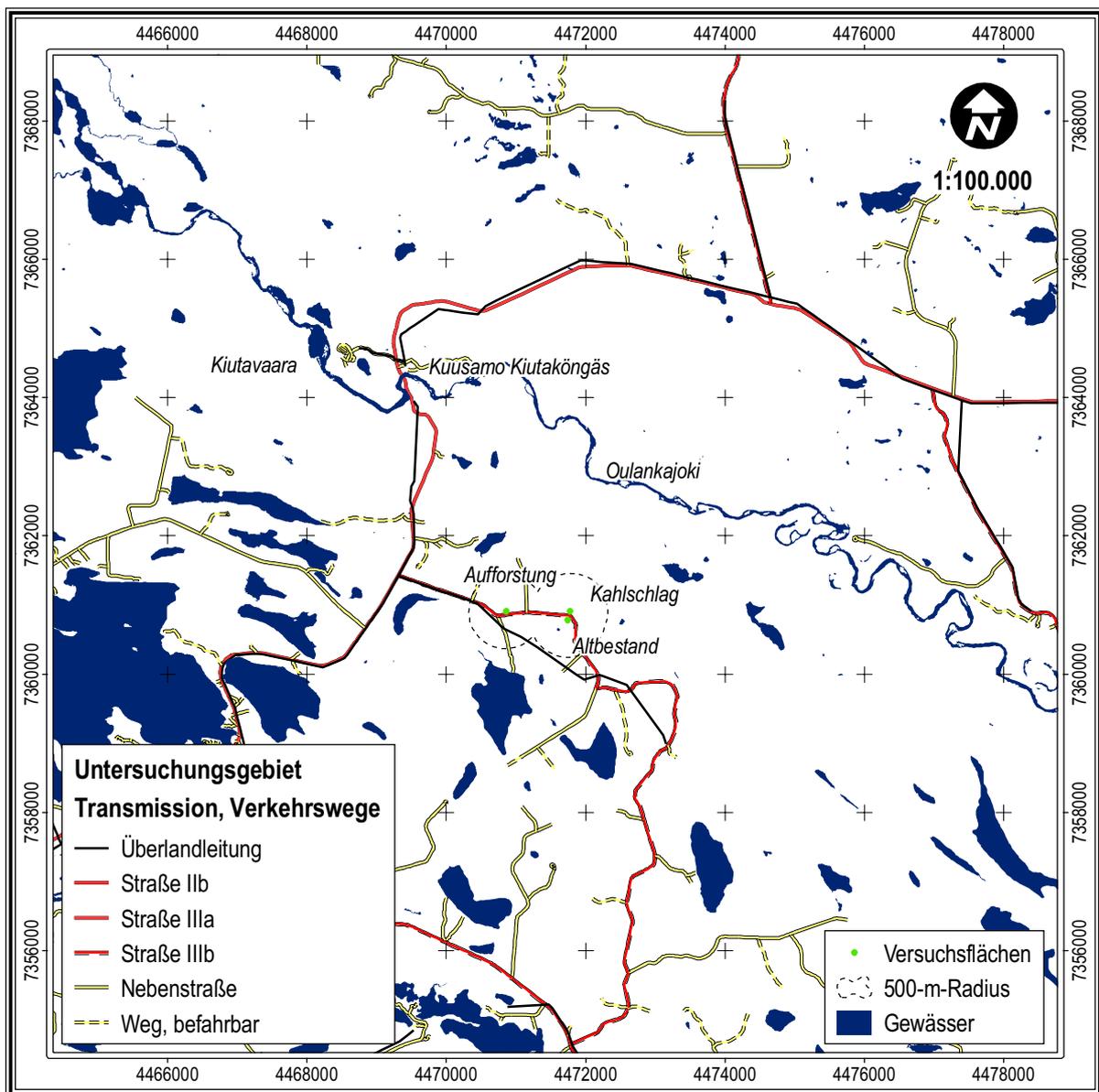


Abb. 67: Datenebenen »Transport« und »Transmission« im Untersuchungsgebiet (Quelldaten: NLS 1999c)

Der Transmissionslayer enthält in seiner linienhaften Ausprägung für das Untersuchungsgebiet ausschließlich Überlandleitungen (Stromversorgung). Die Gesamtlänge beträgt 40,2 km, von denen 27,1 km als Schneisen in Waldgebieten vorliegen. Vorgesehene Attribute sind darüber hinaus oberirdische Telefonleitungen und Pipelines (NLS 1996).

### 5.2.3.2 Flächennutzung

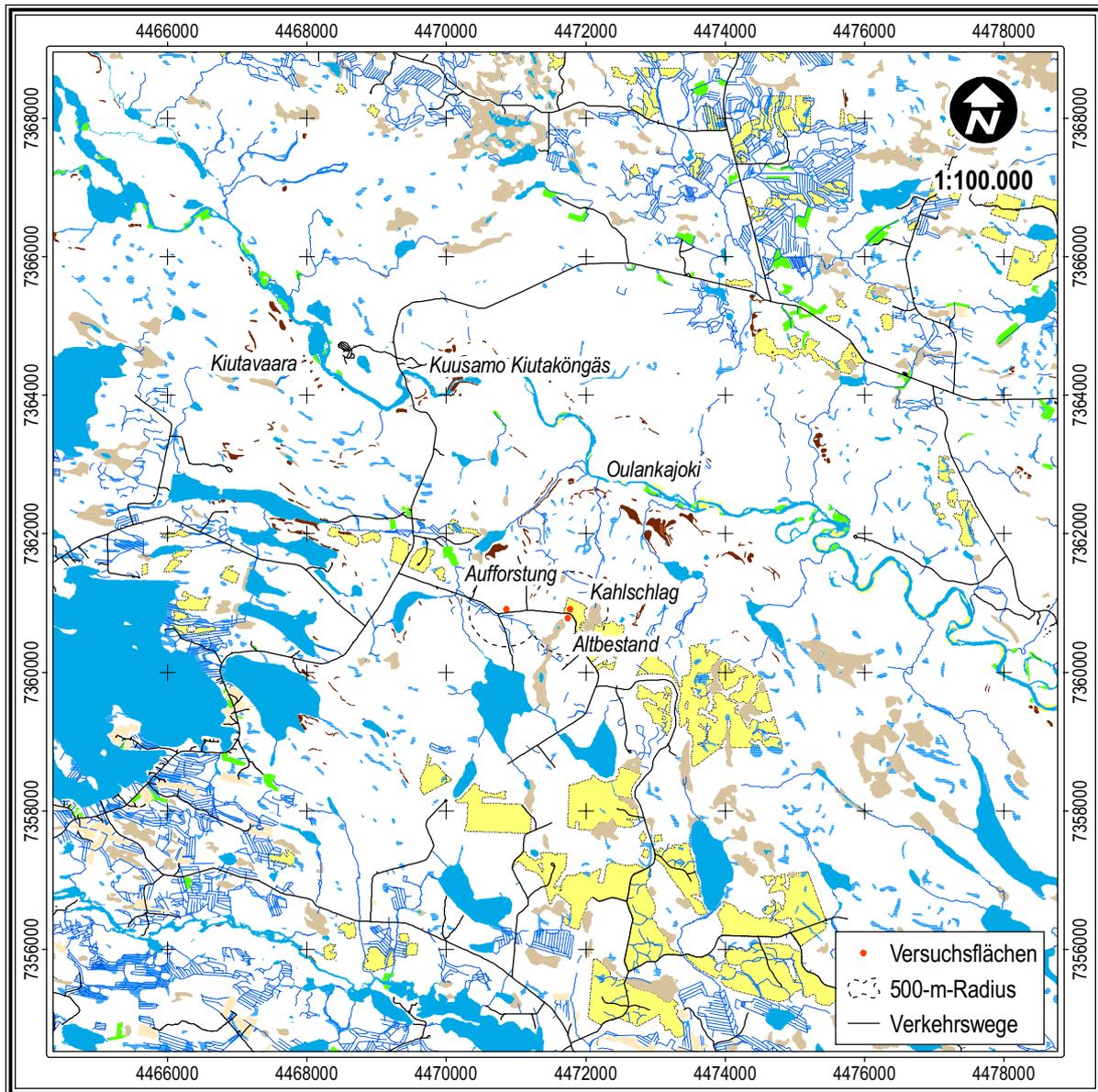
Information zur Flächennutzung liegen im topographischen Datenmodell Finnlands in Form von zwei Datensätzen mit jeweils vier Layern vor. Die als »Terrain/1« und »Terrain/2« bezeichneten Datensätze gliedern sich jeweils in Layer mit Flächen-, Linien- und Punktinformationen sowie eine ergänzende Textebene. In Bezug auf die Anforderungen lokalklimatologischer Modelle wurde ausschließlich auf die flächenhaften Layer zurückgegriffen. Die Polygone des »Terrain/1«-Datensatzes enthalten sich gegenseitig ausschließende topographische Informationen. Beispiele für derartige Daten sind Still- und Fließgewässer mit einer Breite von über fünf Metern, anthropogene und natürliche Flächenformen oder Daten zu Moorbereichen (NLS 1996). Die Flächendaten von »Terrain/2« verweisen auf Informationen zu wasserbeeinflussten Flächen, Kahlschlägen und anthropogen überprägten Bereichen wie Deponien. Polygone der zwei Datensätze können sich überlagern. So können z. B. Kahlschläge und Moorbereiche am selben Standort auftreten (NLS 1996). Tabelle 22 fasst aufgrund der Vielzahl der Klassen nur die im Untersuchungsgebiet vorkommenden zusammen. Eine vollständige Übersicht findet sich in den Tabellen 37 und 38 im Anhang.

Tab. 22: Landnutzungsklassen im Untersuchungsgebiet

Klasse	Layer	Legende	Typ	Fläche [ha]
32611	Terrain/1	Agrarfläche	Polygon	103,67
33000	Terrain/1	Aufschüttung	Polygon	1,35
36313	Terrain/1	Fließgewässer, Breite > 5 m	Polygon	163,63
32411	Terrain/1	Flugplatz, asphaltiert	Polygon	0,01
32413	Terrain/1	Flugplatz, übrige Fläche	Polygon	0,19
34700	Terrain/1	Geröll; Blockfeld	Polygon	6,52
34100	Terrain/1	Gestein, anstehend	Polygon	81,97
32111	Terrain/1	Kiesgrube	Polygon	6,02
35411	Terrain/1	Moor, begehbar, baumlos	Polygon	555,40
35412	Terrain/1	Moor, begehbar, bewaldet	Polygon	3294,21
35421	Terrain/1	Moor, schwer begehbar, baumlos	Polygon	230,14
32421	Terrain/1	Parkplatz; Verkehrsplatz	Polygon	0,72
34300	Terrain/1	Sandfeld; Sandbank	Polygon	21,00
32500	Terrain/1	Steinbruch	Polygon	0,74
36200	Terrain/1	Stillgewässer	Polygon	1802,30
35300	Terrain/1	Vernässungsfläche	Polygon	560,60
32800	Terrain/1	Wiese	Polygon	113,35
38900	Terrain/2	Deponiefläche	Polygon	7,48
39110	Terrain/2	offene Fläche, Kahlschlag	Polygon	1047,29

Der Informationsgehalt des nationalen topographischen Datenmodells eignet sich geländeklimatologisch primär zur Ergänzung bzw. Aktualisierung der Rasterdaten zur »Landnutzung und Waldinventur«. Da im Untersuchungsgebiet abgesehen von Kahlschlägen keine größeren anthropogen überprägten Bereiche existieren, wurde auf die Weiterverarbeitung des Datensatzes »Terrain/1« verzichtet. Trotzdem erscheint eine Beschreibung sinnvoll, da der Einsatz im Hinblick auf andere Untersuchungsgebiete mit einem höheren

Anteil an anthropogen überprägten Flächen möglich ist. Darüber hinaus besteht ein Potenzial in der Auswertung der linienhaften Aspekte in Form von Gewässern mit Breiten von weniger als fünf Metern. Abbildung 68 fasst die für das Untersuchungsgebiet erhobenen Landnutzungen der zuvor beschriebenen Layer zusammen.



Untersuchungsgebiet	
Nutzungstypen	
Fließgewässer, Breite < 2-5 m	Kiesgrube; Steinbruch
Agrarfläche	Moor, baumlos
Aufschüttung	Sandfeld; Sandbank
Gewässer, Breite > 5 m	Vernässungsfläche
Flugfeld; Parkplatz	Wiese
Geröll; Blockfeld	Deponiefläche
Gestein, anstehend	offene Fläche, Kahlschlag

Abb. 68: Datenebenen »Terrain/1« und »Terrain/2« im Untersuchungsgebiet (Quelldaten: NLS 1999c)

Weitere Möglichkeiten ergeben sich ggf. aus der Auswertung der ebenfalls linienhaften Informationen zu Steilhängen, Dämmen und Böschungen zur Verbesserung des DHM (vgl. FRIEDRICH 1996). Die

Flächendaten des Layers »Terrain/2« sind aufgrund des aktuelleren Redaktionsstands von großer Bedeutung für die Ausweisung jüngerer Kahlschlagflächen im Vergleich zu den zuvor genannten Rasterdaten.

### 5.2.3.3 Bebauung

Bebaute Flächen sind im Rahmen des nationalen topographischen Datenmodells in einer eigenen Datenebene mit der Bezeichnung »Buildings« zusammengefasst. Sie beinhaltet Gebäude und ähnliche anthropogene Strukturen in Form von Polygonen sowie Zäune und Mauern als Linienelemente. Gebäude müssen unabhängig von ihrer Nutzung mindestens eine Höhe von einem Stockwerk aufweisen und sind über ihre Nutzung klassifiziert. Von Gebäuden abweichende Objekte werden ab einer Mindestgröße von 200 m<sup>2</sup> erfasst (NLS 1996).

Vor dem Hintergrund einer vegetationsbezogenen Fragestellung, der geringen Bebauungsdichte in borealen Räumen und der fehlenden Ortschaften im Untersuchungsgebiet wurde auf eine weitergehende Auswertung verzichtet. Der Einfluss von größeren bebauten Flächen als Wärmeemittenten oder Windhindernisse in nördlichen Breiten bleibt somit spezialisierteren Untersuchungen überlassen (STEINECKE 1995, BOROWY 2005a, 2005b). Im Interesse der Vollständigkeit fasst Tabelle 39 im Anhang die Bebauungsklassen zusammen.

### 5.2.3.4 Höheninformationen (Isohypsen/Isobathen)

Wie einleitend bereits in Kapitel 5.2.1 beschrieben, ist die Erstellung des landesweiten DHM nicht weitergehend dokumentiert. Sofern eine bestimmte Methode zur DHM-Erstellung benötigt wird oder kleinere Rasterzellen abgeleitet werden müssen, kann auf den Datensatz »Elevations« des nationalen topographischen Datenmodells zurückgegriffen werden. Im enthaltenen Linienlayer sind die Isohypsen und Isobathen in Abstufungen von 5,0 m definiert, über deren Stützpunkte eine DHM-Erstellung möglich ist (NLS 1996).

## Eignung des nationalen topographischen Datenmodells

Die Entwicklung des topographischen Datenmodells reicht bereits zurück bis in das Jahr 1991, als mit der »Digital basic map working group« eine Kommission zur Einrichtung einer digitalen Kartengrundlage für Finnland eingerichtet wurde (NLS 1996). Bereits 1992 wurde die erste Generation des Datensatzes vorgestellt. Die in dieser Untersuchung genutzten Daten basieren auf dem Modell der zweiten Generation, dessen Entwicklung 1995 begann (NLS 1996).

Wie bereits einleitend beschrieben, besitzen die Daten des topographischen Datenmodells die höchste Aktualisierungsrate der finnischen Landesvermessung. Das System umfasst damit sowohl im Hinblick den Redaktionsstand als auch auf die räumliche Auflösung den höchsten Qualitätsstandard der Karten in Finnland. Damit eignet sich der Datensatz als Ergänzung und zum Teil als Alternative für die zuvor beschriebenen Datenbestände des DHM und der Landnutzung und Waldinventur.

Obwohl nicht für klimaökologische Aspekte ausgelegt, enthalten die o. g. Ebenen des topographischen Datenmodells eine Reihe verwertbarer Informationen für derartige Fragestellungen. Daraus ergeben sich zwangsläufig jedoch auch Probleme. So ist die Ausweisung von Schneisen z. B. nur generalisiert möglich. Zwar ist eine Abstufung über die Fahrbahnbreite des Layers »Transport« denkbar, jedoch bleiben die beiderseits der Fahrbahnen freigeschlagenen Schutzstreifen unberücksichtigt. Angaben zur Schneisenbreite von Überlandleitungen fehlen ebenfalls. Weitere Unwägbarkeiten ergeben sich im Fall wenig befahrener Verkehrswege. So musste der Straßentyp »Weg, befahrbar« trotz eines beachtlichen Anteils am Verkehrsnetz im Untersuchungsgebiet bei der Ausweisung von Schneisen unberücksichtigt bleiben. Eine Sichtung von Luftbildern des Untersuchungsgebiets ergab, dass die geringe Straßenbreite nur zum Teil

zu einer Schneisenbildung in Waldbereichen führt und so eine universelle Auslegung nicht möglich war. Mit zunehmendem Waldanteil und dichterem Verkehrswegenetz ist so von einem größeren Fehler durch Unterschätzung von Schneisenbereichen auszugehen.

Weitere Probleme ergeben sich aus der Aktualisierung der »Landnutzung und Waldinventur« durch flächenhafte Daten des topographischen Datenmodells. Eine Neuausweisung von Kahlschlagflächen ist unproblematisch, jedoch ist eine Aufhebung der Definition »Kahlschlag« durch »Aufforstung« nicht möglich, da das topographische Datenmodell keine Informationen zur Waldinventur enthält. Mit Zunahme der Untersuchungsraumgröße oder in Regionen mit intensiver Forstwirtschaft ist so von einem Interpretationsfehler aufgrund zu großer Kahlschlagflächen auszugehen. Weiterhin konnten im Untersuchungsgebiet größere Diskrepanzen zwischen der Ausweisung unbewaldeter Moorbereiche im Polygonlayer von »Terrain/1« und den Daten der »Landnutzung und Waldinventur« beobachtet werden, deren systematische Analyse im Rahmen dieser Untersuchung jedoch nicht zu leisten war.

Trotz der genannten Probleme darf der Datensatz des nationalen topographischen Datenmodells für klimaökologische Fragestellungen als geeignet angesehen werden. Die Einsatzmöglichkeiten liegen primär in der Ergänzung des DHM und der »Landnutzung und Waldinventur« sowie der Aktualisierung des letztgenannten Datensatzes. Im Zuge zukünftiger klimaökologischer Modelle ist die Einbeziehung auch kleinerer Gewässer oder Vernässungsflächen denkbar, des Weiteren erlauben die Höhendaten eine Bildung lokaler hoch aufgelöster Geländemodelle.

### 5.3 Modellansätze zur Temperaturverteilung und Frostgefährdung

Wie bereits eingehender in Kapitel 4.4.2 beschrieben, stellen Frostereignisse während der Vegetationsperiode einen limitierenden Faktor für die Waldsukzession in der Borealis dar. Betroffen sind vor allem Jungbestände auf zuvor eingeschlagenen Flächen (HOLTMEIER 1985, KUBIN & KEMPPAINEN 1991, LINDKVIST & CHEN 1997). Im Zusammenhang mit der großen Bedeutung der Forstwirtschaft in den nördlichen Breiten ist die Abschätzung der räumlichen Temperaturverteilung und die damit verbundene Frostgefährdung ein entsprechend intensiv bearbeitetes Forschungsfeld (LINDKVIST et al. 2000).

Die Geschichte der Entwicklung von Indizes zur Temperaturverteilung in verschiedenen Landschaftstypen reicht aufgrund ihrer Bedeutung auch außerhalb der Borealis weit zurück (vgl. THORNTHWAITE 1931, DWD 1963, HUOVILA 1964, THOMPSON 1969). Viele Ansätze orientieren sich an temperaturbezogenen Variablen wie »Kälte-«, »Frost-« und »Temperatursummen« oder der »Vegetationsdauer« (LINDKVIST et al. 2000). Weitergehende Erkenntnisse wie beispielsweise über die Entstehung und Wirkungsweise von Kaltluftabflüssen erlaubten die Entwicklung von mehrdimensionalen Modellen (YAMADA 1981, 1983, GROSS 1985, AVISSAR & MAHRER 1988). Auf die Orographie als einen der primären Einflussfaktoren auf lokale Temperaturverteilungen haben bereits BOOTSMA (1976) sowie MATTSOON & BÖRJESSON (1978) hingewiesen. Auch in späteren Untersuchungen waren Geländemodelle fast immer Bestandteil der Berechnungen (KALMA et al. 1986, LAUGHLIN & KALMA 1987, 1990).

Aktuelle Modellansätze berücksichtigen weitere Einflussfaktoren. Unterschiede ergeben sich aus den verwendeten Methoden, den Variablen und nicht zuletzt der Bezugsebene. Je nach Schwerpunkt der Fragestellungen wurden räumliche Verteilungen der Lufttemperaturen (BLENNOW & PERSSON 1998, BLENNOW & LINDKVIST 2000, LINDKVIST et al. 2000) oder bodennahe Temperaturen untersucht (LINDKVIST & LINDQVIST 1997, LANGVALL 2000). LINDKVIST & CHEN (1997, 1999) entwickelten darüber hinaus Indizes für Luft- und Erdoberflächentemperaturen.

Die Entwicklung einer modellhaften Beschreibung von Temperaturverteilung und Frostgefährdungen hat bis heute noch keinen Abschluss gefunden. Die lokalklimatischen Prozesse und ihre Zusammenhänge sind abschließend noch nicht so weit erklärt, dass sie Bestandteile aktueller Geoinformationssysteme darstellen

und universell eingesetzt werden können. Je nach Skala und Ansatz »erklären« die Verfahren zwischen 75 und 90 % der räumlichen Temperaturvariation oder frostbedingter Pflanzensterblichkeit (BLENNOW & PERSSON 1998, BLENNOW & LINDKVIST 2000, LINDKVIST & CHEN 1997, 1999).

Die vorgestellten Modelle sind ausnahmslos empirische Ansätze, in denen an ausgewählten Standorten meteorologische Daten erhoben wurden, die über mathematisch-statistische Verfahren räumlich extrapoliert wurden. Darüber hinaus berücksichtigen die Ansätze in der Regel eine Reihe von räumlichen Variablen, die Einflussfaktoren für die lokalen Temperaturverhältnisse darstellen. Entsprechende Einflussfaktoren sind die Orographie, die lokalen Bodenverhältnisse, die (Wald-)Vegetation und anthropogene Überprägungen. Daraus folgt, dass die universelle Eignung von Modellen und ihre Qualität in hohem Maße von der Verfügbarkeit flächendeckender Daten abhängt, da eine detaillierte Erhebung abseits wissenschaftlicher Untersuchungen weder zeitlich noch finanziell zu bewältigen ist. In diesem Zusammenhang gilt es, eine Auswahl an Modellansätzen auf ihre Anforderungen hinsichtlich der Variablenauswahl und deren räumlicher Verfügbarkeit zu analysieren. Am Beispiel des Untersuchungsraums soll nachvollzogen werden, in welchem Maße die Datenbestände öffentlicher oder privater Dienstleister für den borealen Raum vorliegen, inwieweit sie nutzbar sind und ob sie ggf. durch lokale Erhebungen ergänzt werden müssen.

### **5.3.1 Anforderungen von Modellen zur Temperaturverteilung oder Frostgefährdung sowie Möglichkeiten ihrer Übertragbarkeit**

Wie zuvor beschrieben, nutzen Modellansätze in der Regel Variablen, deren Datengrundlagen entweder punkt- oder flächenhaft vorliegen. Gewöhnlich stehen meteorologische Messwerte punktuell zur Verfügung, während Daten zu räumlichen Einflussfaktoren des lokalen Temperaturhaushalts flächenhaft abgelegt sind.

#### **5.3.1.1 Klimaparameter**

Das Netz meteorologischer Stationen im borealen Raum muss als ausgesprochen weitmaschig angesehen werden, sodass ein Rückgriff auf öffentliche lokale Daten nur in seltenen Fällen möglich ist. Darüber hinaus ist die Entwicklung der Modelle noch nicht soweit fortgeschritten, dass eine Extrapolation der Werte einzelner, weniger Standorte möglich wäre. Eine Voraussetzung aller hier vorgestellten Modellansätze ist somit ein mehr oder weniger dichtes Messnetz, dessen Messpunkte möglichst repräsentativ verteilt sind. Gemäß der Problematik von Modellen zur Temperaturverteilung oder Frostgefährdung stellen Messwerte der Temperatur in allen Ansätzen eine bedeutende Rolle. Darüber hinaus werden, je nach Schwerpunkt des entsprechenden Entwurfs, weitere klimatologische Parameter in die Modelle einbezogen.

Einen wesentlichen Einfluss im Hinblick auf die Frostgefährdung der Vegetation stellt beispielsweise die *Strahlung* dar (vgl. Kapitel 4.4.1). Zusammenfassend seien hier die Strahlungsexposition von Pflanzen nach Frostnächten (GILLIES & BINDER 1997, LINDKVIST & CHEN 1999, LANGVALL 2000) und die nächtliche Ausstrahlung (LINDKVIST & CHEN 1999) genannt. In diesem Zusammenhang stellen sowohl die Globalstrahlung als auch die Strahlungsbilanz bedeutende Parameter in der Mehrzahl der Ansätze dar (LINDKVIST & LINDQVIST 1997, LINDKVIST & CHEN 1997, 1999, BLENNOW & LINDKVIST 2000, LANGVALL 2000). Die Nutzung externer Strahlungsdaten erscheint im borealen Raum noch weit problematischer als die anderer Klimaparameter, da die Strahlungsverhältnisse von den Wetterdiensten nur an wenigen, ausgewählten Standorten erhoben werden. Eine nähere Betrachtung der Ansätze zeigt jedoch, dass die Strahlung weniger in ihrer numerischen Größe als vielmehr zur Abgrenzung von Zeiträumen benötigt wird. Angaben zur *Globalstrahlung* dienten beispielsweise LINDKVIST & LINDQVIST (1997), LINDKVIST & CHEN (1999) und BLENNOW & LINDKVIST (2000) der

Bestimmung von Einstrahlungszeiträumen in Abhängigkeit von Standort und Relief. Sofern neben den Wetterbedingungen lediglich die Orographie als einstrahlungsmodifizierender Faktor zu berücksichtigen ist, genügt in der Regel ein exponierter Messpunkt mit möglichst geringer Horizontüberhöhung zur Erfassung der Einstrahlung. Soll ausschließlich die Modifikation der Einstrahlung durch das Relief erhoben werden, kann auf Messungen verzichtet werden. Stattdessen ist es möglich, auf himmelsmechanische Gleichungen zurückzugreifen (IQBAL 1983, DUBAYAH & RICH 1995). In beiden Anwendungsfällen ist ein Rekurs auf die räumlichen Daten eines DHM nötig (Abb. 63).

Die Werte der *Strahlungsbilanz* werden von LINDKVIST et al. (2000) und BLENNOW & LINDKVIST (2000) zur Schwellenwertbestimmung nächtlicher Bewölkungsverhältnisse und damit zur Ausweisung von Strahlungsnächten genutzt, sodass ggf. auch hier ein Messpunkt genügt. Kleinräumige mobile Messungen, wie sie von LANGVALL (2000) zur Unterscheidung unterschiedlicher Vegetations- und Kahlschlagflächen genutzt wurden, erscheinen hinsichtlich des zeitlichen Aufwands zur Erfassung großer Flächen nicht möglich.

Als weitere Klimaparameter werden die lokalen *Windverhältnisse* durch Ansätze von LINDKVIST & LINDQVIST (1997) und LINDKVIST et al. (2000) berücksichtigt. Die Einbindung von Windgeschwindigkeit und -richtung, wie sie durch die Wetterdienste erhoben werden, ist jedoch problematisch, da Frostwetterlagen in der Regel mit annähernd windstillen Bedingungen verbunden sind (vgl. Kap. 4.5.2). Im Zusammenhang mit einer hohen Ausstrahlung entstehen unter diesen turbulenzarmen Bedingungen nächtliche Kaltluftflüsse, deren Windbewegung meist  $1,0 \text{ m s}^{-1}$  unterschreitet (GROSS 1985). Die Kaltluftflüsse folgen der Schwerkraft, sodass sich in Abhängigkeit von den relativen Höhenverhältnissen und Landschaftsformen ein räumliches Muster thermisch inhomogener Standorte ausbildet. Wärmere exponierte Punkte wie Kuppen wechseln sich mit Kaltlufteinzugsgebieten und Kaltluftsenken ab (MATTSSON 1978 zit. b. LANGVALL 2000, YAMADA 1981, GROSS 1987). Vor diesem Hintergrund weisen LINDKVIST et al. (2000) und BLENNOW & LINDKVIST (2000) frostgefährdete Standorte über orographische Merkmale aus. Entsprechend bildet auch in diesem Fall ein DHM die nötige Datengrundlage.

LINDKVIST et al. (2000) haben unter den zuvor genannten Gesichtspunkten konvexe Strukturen (Kuppen), lineare Hänge, ebene Flächen sowie seicht- und eng-konkave Tallagen als Variablenmerkmale für eine Clusteranalyse ausgewiesen. Die genaue Vorgehensweise ist jedoch nicht dokumentiert, sodass sich vergleichbare Reliefeinheiten nur näherungsweise nachbilden lassen. Als Methode bietet sich z. B. die Ausweisung von Oberflächenformen aus DHM-Daten nach PEUCKER & DOUGLAS (1975) an, mit der sich Kuppen, Kammstrukturen, Neigungstypen, Ebenen sowie Senken und Kehlbereiche identifizieren lassen. Abbildung 69 zeigt am Beispiel des Untersuchungsgebiets eine Kartendarstellung mit entsprechenden Merkmalsausprägungen.

Die Darstellung verdeutlicht die unterschiedlichen Reliefmerkmale zwischen der Tallage des Oulankajoki und dem nördlich und südlich anschließenden Hochland. Gut erkennbar sind die blau dargestellten Talstrukturen kleinerer Gewässer, die als Zuflüsse für den Oulankajoki fungieren. Im Umfeld der Tallage kommt es aufgrund der höheren Reliefenergie zu einem kleinräumigen Wechsel zwischen Senken und Kammlagen sowie einem hohen Anteil an geneigten Bereichen. Besonders die nördlichen Moorbereiche des Hochlands sind dagegen durch große ebene Flächen gekennzeichnet.

Der derzeitige Stand der Modelle setzt eine hohe Anzahl an (Temperatur-)Messpunkten voraus, die sich durch das meteorologische Messnetz der Wetterdienste nicht realisieren lässt. In der Vergangenheit wurden bereits Verfahren vorgestellt, mittels derer eine Extrapolation von Temperaturwerten einzelner Punkte oder der meteorologischen Messnetze möglich ist. Sie setzten jedoch entweder unbewaldete Flächen voraus (BOOTSMA 1976) oder bezogen sich auf die Extrapolation von Durchschnittswerten (HOLDAWAY

1996, TVEITO et al. 2000). Untersuchungen von LAFLEUR et al. (1997), FRIEDL (2002) oder der Modellansatz von KANG et al. (2000) lassen den Schluss zu, dass sich das Problem mittelfristig durch fernerkundungsgestützte Ansätze lösen lässt. Zum aktuellen Zeitpunkt erscheint eine Frostgefährdungskartierung in borealen Räumen ohne lokale Erhebung von Temperaturdaten nicht möglich.

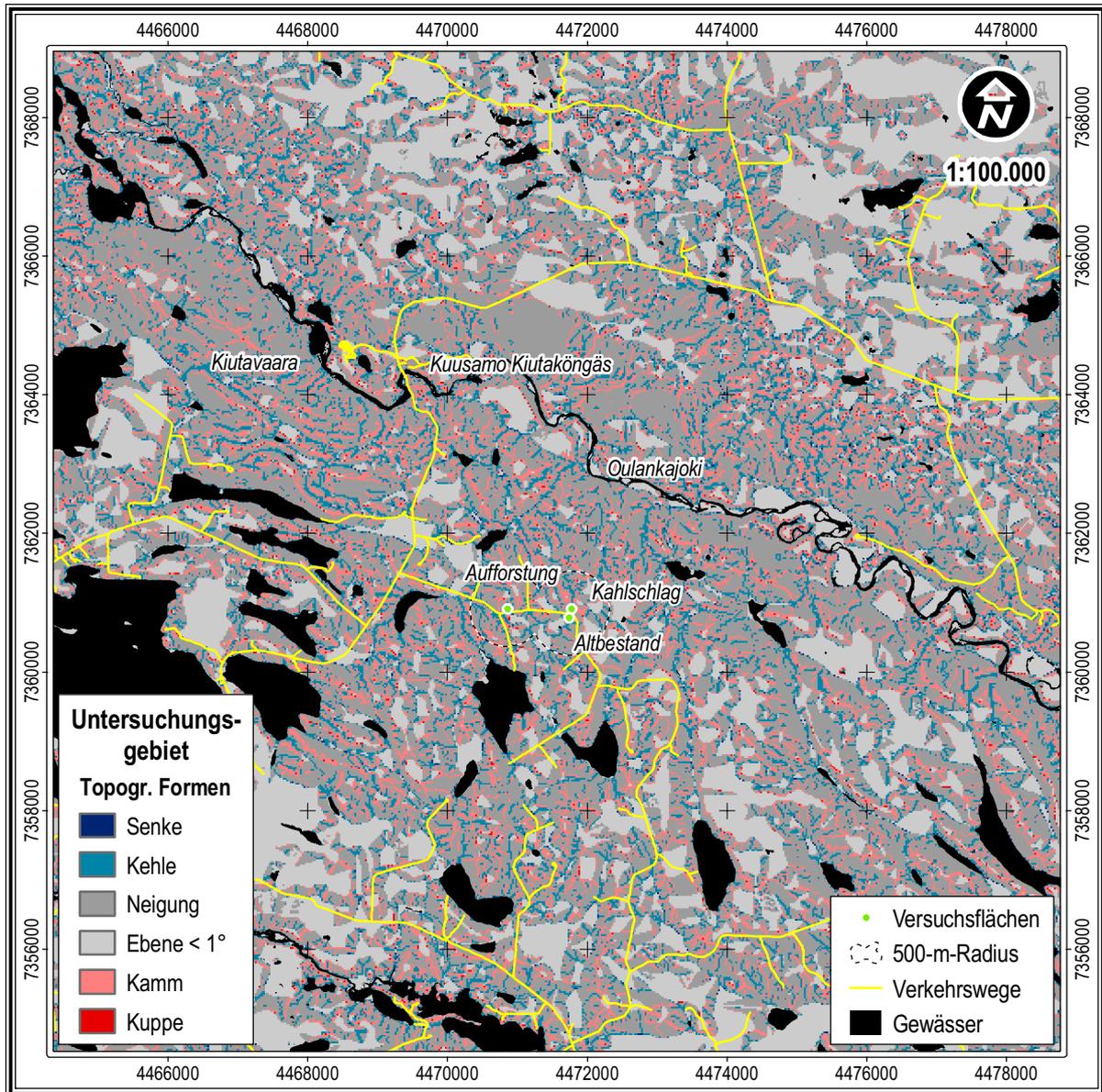


Abb. 69: Orographische Landschaftsmerkmale nach PEUCKER & DOUGLAS (1975), generalisiert und durch ebene Flächen ergänzt

### 5.3.1.2 Orographie

Wie zuvor bereits angedeutet, stellen die orographischen Verhältnisse als Umgebungsfaktor eine bedeutende räumliche Variable in der Ausweisung von Frostgefährdungen dar. Die »absolute Höhe« repräsentiert als Variable die lokale Ausprägung der höhenbedingten Temperaturänderung und damit z. B. die Ausbildung der Baumgrenze (LINDKVIST & LINDQVIST 1997, BLENNOW & PERSSON 1998, BLENNOW & LINDKVIST 2000, KANG et al. 2000). Besonders in gebirgigen Arealen überwiegt das Relief als Einflussfaktor für das Geländeklima (BLENNOW & LINDKVIST 2000). Im lokalen multiplen Regressionsmodell der beiden Autoren »erklärt« allein die Variable der »absoluten Höhe« etwa 40 % der räumlichen Verteilung der Minimalwerte der Lufttemperaturen über eingeschlagenen Flächen.

Relative Höhendifferenzen werden von allen genannten Modellansätzen verwendet. Wie bereits beschrieben, leiten LINDKVIST & LINDQVIST (1997) bzw. LINDKVIST & CHEN (1999) lokale Modifikationen der Strahlung aus DHM-Daten ab und weisen orographische Geländeformen aus. Die Ansätze von BLENNOW & PERSSON (1998) sowie BLENNOW & LINDKVIST (2000) berücksichtigen Höhendifferenzen innerhalb bestimmter Radien als Variablen für multiple Regressionsmodelle. Abbildung 70 veranschaulicht am Beispiel des Untersuchungsgebiets die orographisch bedingte Variation der Einstrahlungsdauer auf Grundlage des DHM. Ausgangspunkt ist der Zeitraum der Messkampagne 1999 als Teil dieser Untersuchung (vgl. Kap. 4.3.1).

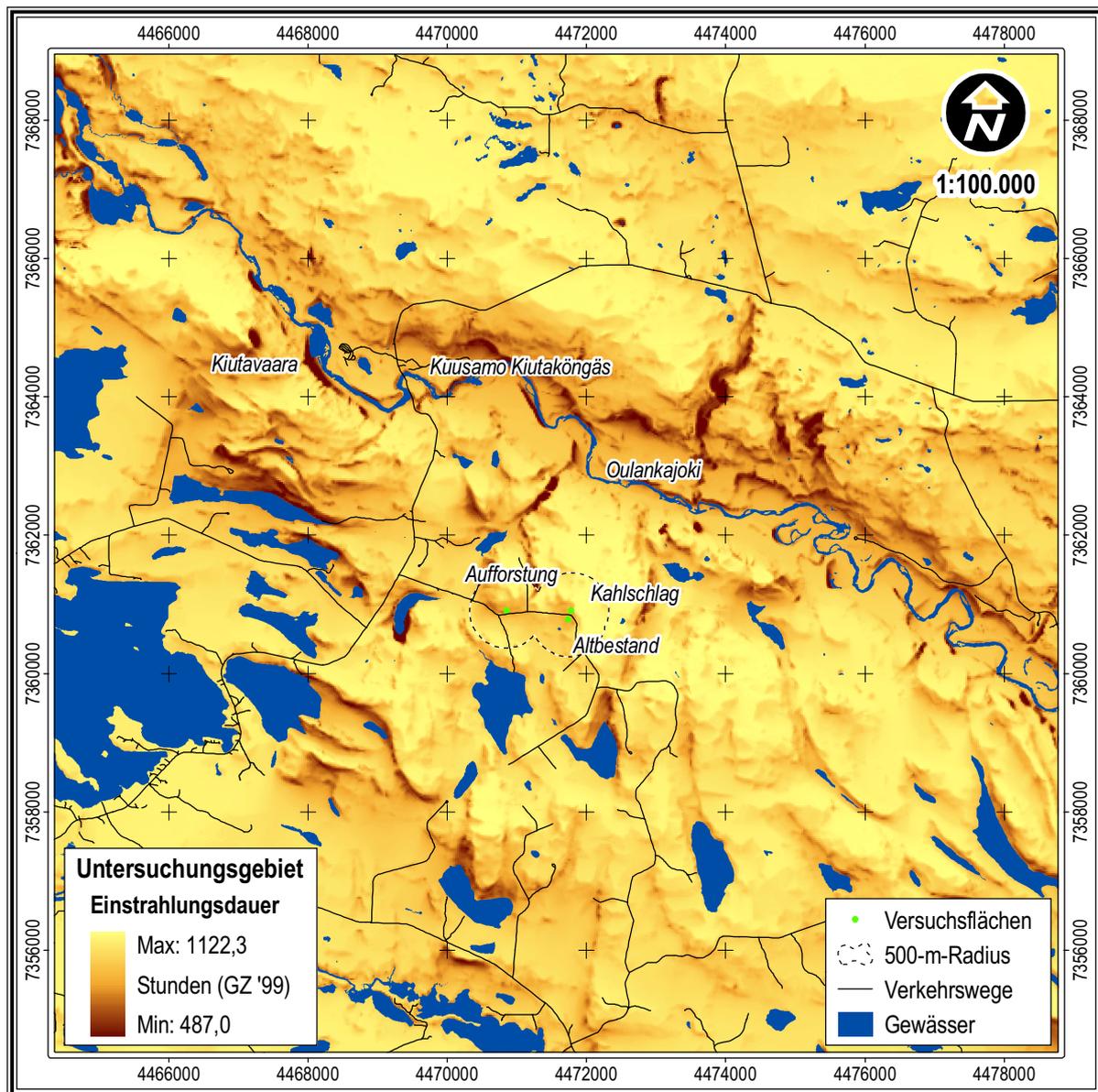


Abb. 70: Orographisch bedingte Variation der Einstrahlungsdauer im Untersuchungsgebiet vom 25.6. bis 8.9. 1999, erstellt nach WILSON & GALLANT (2000)

Die Kartendarstellung der orographisch bedingten Variation der Einstrahlungsdauer hebt einmal mehr die klimarelevanten Unterschiede zwischen Hochland und der Tallage des Oulankajoki hervor. Begrenzt auf den hier dargestellten Untersuchungsraum beträgt die sommerliche Einstrahlungsdauer im Stromstrich des Oulankajoki nur etwa 84 % der exponiertesten Standorte des Hochlands. Flächen mit besonders geringer Einstrahlungsdauer ergeben sich aus fluvialen Erosionsformen wie Sockelbereichen von Abbruchkanten, abgeschnittenen Mäandern und eng eingeschnittenen Tälern der Zuflüsse des Oulankajoki.

Ein Vergleich mit den gemessenen Werten ist lediglich für die durch Vegetation unbeeinflusste Kahlschlagfläche sinnvoll. Ausgehend von einem empirisch ermittelten Schwellenwert von  $53 \text{ Wm}^{-2}$  zur Unterscheidung rein diffuser und direkter Einstrahlung in den Tagesrandlagen lag die gemessene Einstrahlungsdauer etwa 6 % über dem modellierten Wert. Dabei ist jedoch zu berücksichtigen, dass die Messhöhe zwei Meter über dem Boden liegt, was mit einer verringerten Horizontüberhöhung verbunden ist.

Während die Einstrahlungsdauer an einem Standort lediglich von der Breitenlage und der Horizontüberhöhung eines Standortes abhängig ist, wird die Globalstrahlungssumme zusätzlich durch die Höhe des Sonnenstands und die Wetterlage beeinflusst. Die räumliche Variation der Werte wird somit in höherem Maße durch die Exposition der Standorte bestimmt. Abbildung 71 verdeutlicht diesen Zusammenhang am Beispiel der nord- bzw. südexponierten Hanglagen des Oulankajokitals.

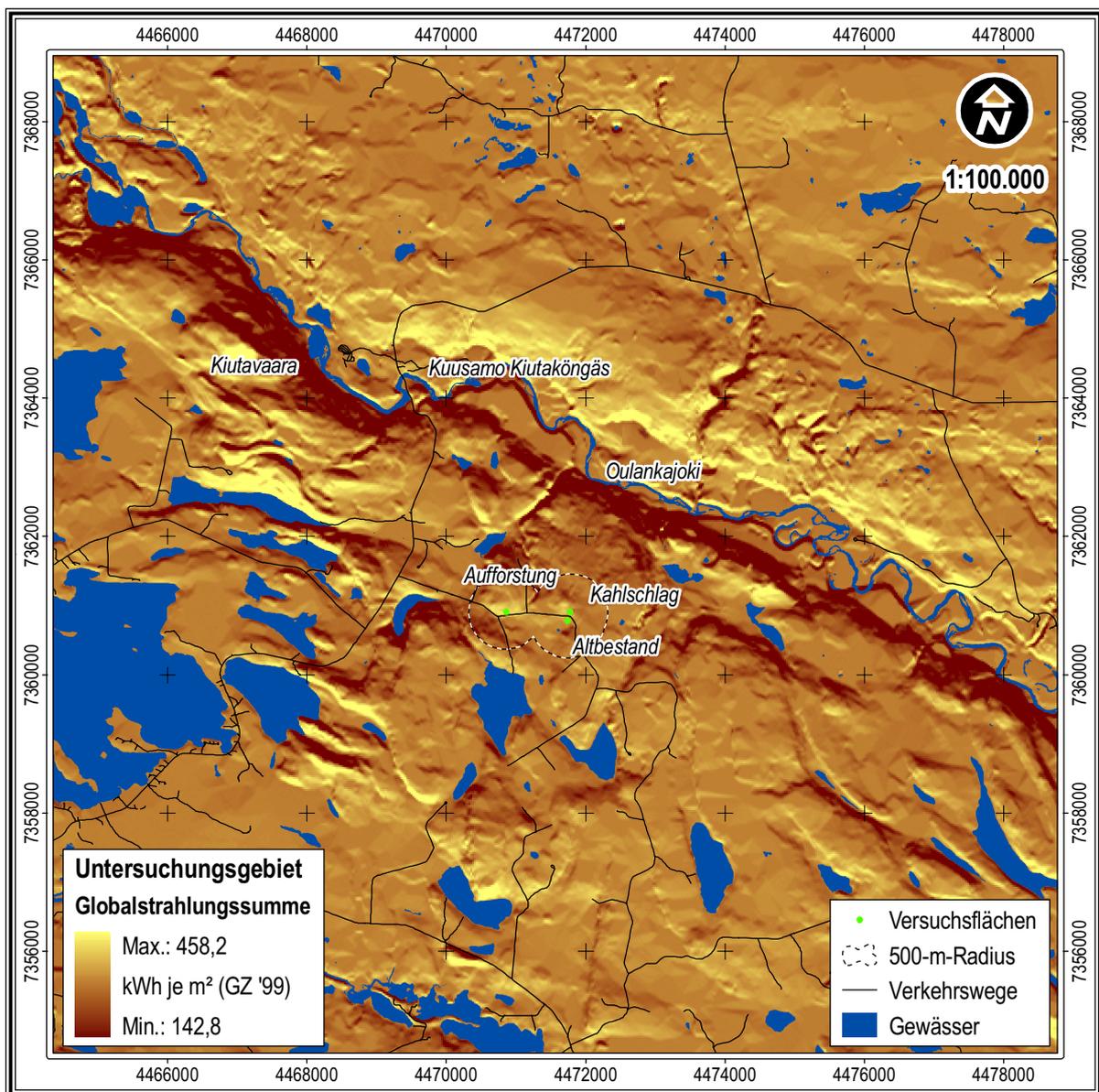


Abb. 71: Orographisch bedingte Variation der Globalstrahlungssumme im Untersuchungsgebiet vom 25.6. bis 8.9. 1999, korrigiert auf Grundlage der Messwerte der Kahlschlagfläche, erstellt nach WILSON & GALLANT (2000)

Auch die eng eingeschnittenen Talstrukturen der Zuflüsse weisen jeweils strahlungsexponierte bzw. -geschützte Hanglagen auf. Die südlich und südwestlich exponierten Versuchsflächen unterliegen entsprechend einem überdurchschnittlichen Strahlungsgenuss. Vor dem Hintergrund einer hohen Variabilität der Bewölkung fallen die gemessenen Strahlungssummen der Kahlschlagfläche deutlich geringer aus als die

modellierten Werte. Bei der Darstellung wurden die Werte auf der Grundlage der Messdaten der Kahl-schlagfläche korrigiert.

Die orographischen Verhältnisse spielen darüber hinaus eine primäre Rolle in der Ausbildung von Kaltluft-senken unter den Bedingungen windstiller, wolkenloser Nächte. Das »Einzugsgebiet von Kaltluftabflüssen« ist als Variable im Ansatz von BLENNOW & LINDKVIST (2000) nach BLENNOW (1998) berücksichtigt. Der zugehörige Algorithmus wurde von LAUGHLIN & KALMA (1990) entwickelt. Darüber hinaus existieren eine Reihe von Implementierungen zur Nachbildung reliefbedingter Stoffflüsse. Abbildung 72 basiert auf dem Verfahren der »Multiple Flow Direction« nach FREEMAN (1991) und ist im Geoinformationssystem »Saga« integriert.

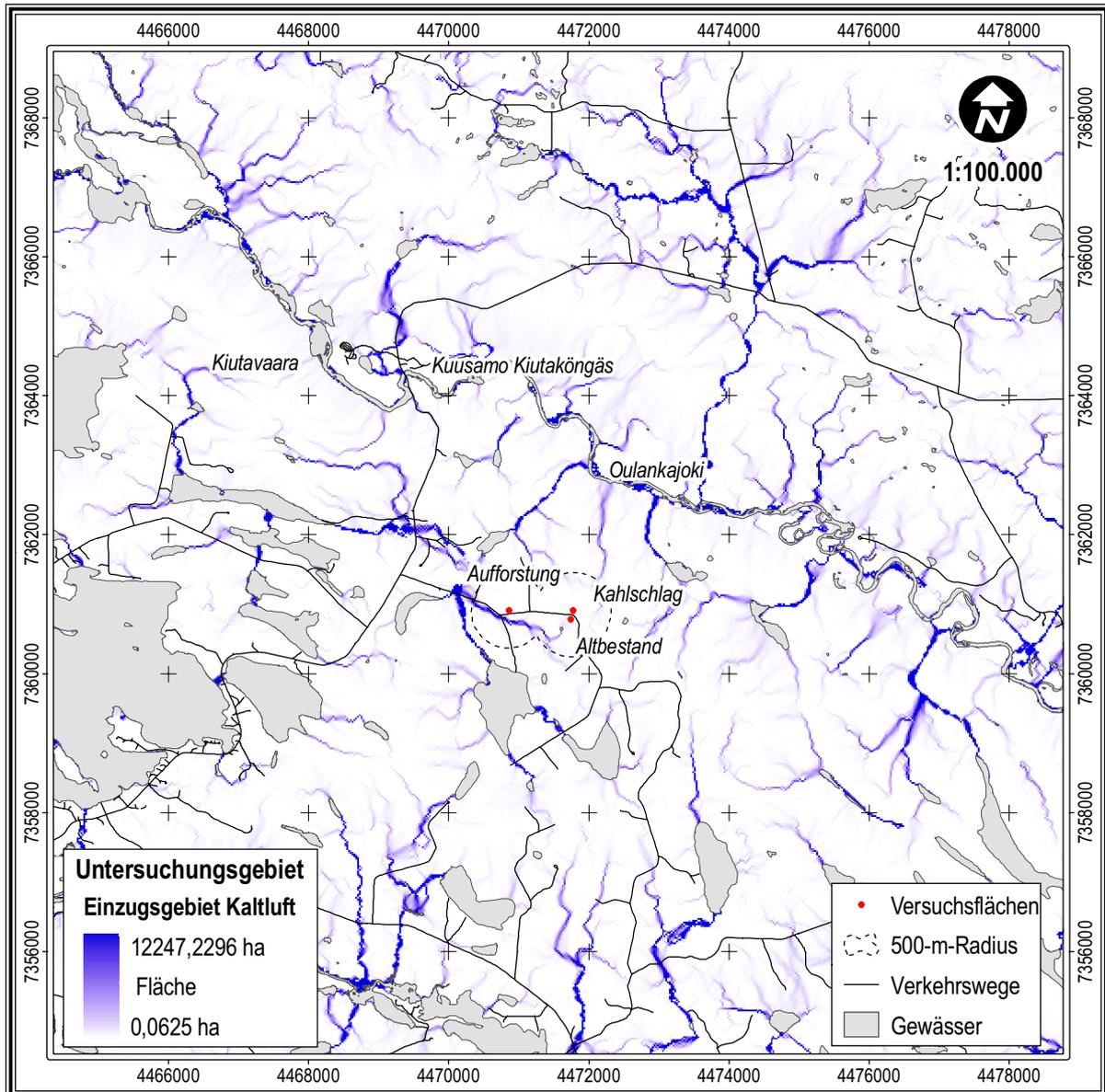


Abb. 72: Potenzielle Einzugsgebiete von Kaltluftabflüssen bzw. Kaltluftakkumulationen auf der Grundlage des DHM nach einem hydrologischen Ansatz von FREEMAN (1991)

Einschränkend ist jedoch zu berücksichtigen, dass die in Geoinformationssystemen implementierten Algorithmen zur Bestimmung der Einzugsgebiete von Stoffflüssen auf hydrologische Prozesse optimiert sind. Obwohl sie teilweise dem Verfahren von LAUGHLIN & KALMA (1990) ähneln, besteht weiterer Forschungsbedarf hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit auf Kaltluftflüsse (O'CALLAGHAN & MARK 1984, BAUER et al. 1985, FAIRFIELD & LEYMARIE 1991, QUINN et al. 1991, TARBOTON 1997).

Die Kartendarstellung der potenziellen Einzugsgebiete von Kaltluftabflüssen hebt deutlich die Bereiche enger Taleinschnitte der Zuflüsse des Oulankajoki und die Bereiche von Senken im Hochland hervor. Im Umfeld der Versuchsflächen fallen besonders der vermoorte Senkenbereich südlich des Altbestands sowie der Bachlauf südlich der Aufforstungsfläche auf. Aufgrund der Nähe der Akkumulationsräume zu beiden Versuchsflächen ist ein Einfluss auf die Minimalwerte beider Standorte in wolkenlosen, lang anhaltend windstillen Nächten nicht auszuschließen.

Aufgrund der flächendeckenden Verfügbarkeit eines hoch aufgelösten DHM und geeigneter Methoden zur Ableitung orographischer Eigenschaften lassen sich die Modellanforderungen der genannten Ansätze weitgehend erfüllen. Ebenfalls unproblematisch ist die Bestimmung der Lage einer Fläche oder eines Messpunktes im nationalen Koordinatensystem. Diese von BLENNOW & LINDKVIST (2000) verwendete Variable repräsentiert die Längen- und Breitenlage eines Standortes und damit die großräumige Veränderung von Faktoren wie Kontinentalität oder Humidität. Ein weiterer Aspekt ist die Zunahme der Frostgefährdung in nördlicher Richtung (LANGVALL 2000).

### 5.3.1.3 Böden

Die Bodeneigenschaften spielen in den Modellen zur Frostgefährdung eine deutlich untergeordnete Rolle. Lediglich der Ansatz mobiler Messungen von BLENNOW & PERSSON (1998) verwendet Variablen, welche die Bodeneigenschaften berücksichtigen. Dies ist um so bemerkenswerter, als sich das Modell auf in zwei Metern gemessenen Lufttemperaturen bezieht und deshalb mit einem geringeren Zusammenhang zu rechnen ist als bei bodennahen Temperaturen (vgl. Kap. 4.4.2). Lediglich eine der Variablen des linearen Regressionsmodells von BLENNOW & PERSSON (1998), die als »Anwesenheit von Torfböden« bezeichnet wird, erwies sich als signifikant für das Erklären von Temperaturvariationen bzw. erlaubte die Herstellung des Zusammenhangs, dass im Umfeld von Torfböden ein höheres Frostrisiko besteht.

Eine verhältnismäßig grobe Ausweisung von Bodeninformationen nach Torf- und Mineralböden, wie sie in BLENNOW & PERSSON (1998) benötigt wird, ist aus den Daten der nationalen »Landnutzung und Waldinventur« möglich. Entsprechende Angaben sind Teil der Bestands- bzw. Flächeninformationen der nationalen Waldinventur. Abbildung 73 zeigt eine durch Reklassifizierung der finnischen Landnutzungs- und Waldinventurdaten erhobene Kartendarstellung der verfügbaren Bodeninformationen im Untersuchungsgebiet Oulanka. Für die darüber hinaus dargestellten Klassen der Bodeninformationen existiert jedoch kein abgestuftes Modell zur Forstgefährdung.

Die Darstellung des Untersuchungsgebiets veranschaulicht auch im Fall der Bodeninformationen deutliche Unterschiede zwischen Tallage und Hochland. Ausgehend von der 210-m-Isohypse nehmen Mineralböden im Hochland etwa 72 % der Landfläche ein, während es in der Tallage über 95 % sind. Somit finden sich Torfböden und oligotrophe Moore fast ausschließlich im Hochland und dort primär in Senken. Sofern Torfböden die Frostgefährdung erhöhen (BLENNOW & PERSSON 1998), würde sich dies auf Hochlandbereiche stärker auswirken als auf die Tallage des Oulankajoki. Die Versuchsflächen befinden sich ausnahmslos auf Mineralböden, jedoch beträgt die Distanz zu Torf- oder Moorbereichen lediglich 30 m (Altbestand), 80 m (Aufforstung) oder 200 m (Kahlschlag).

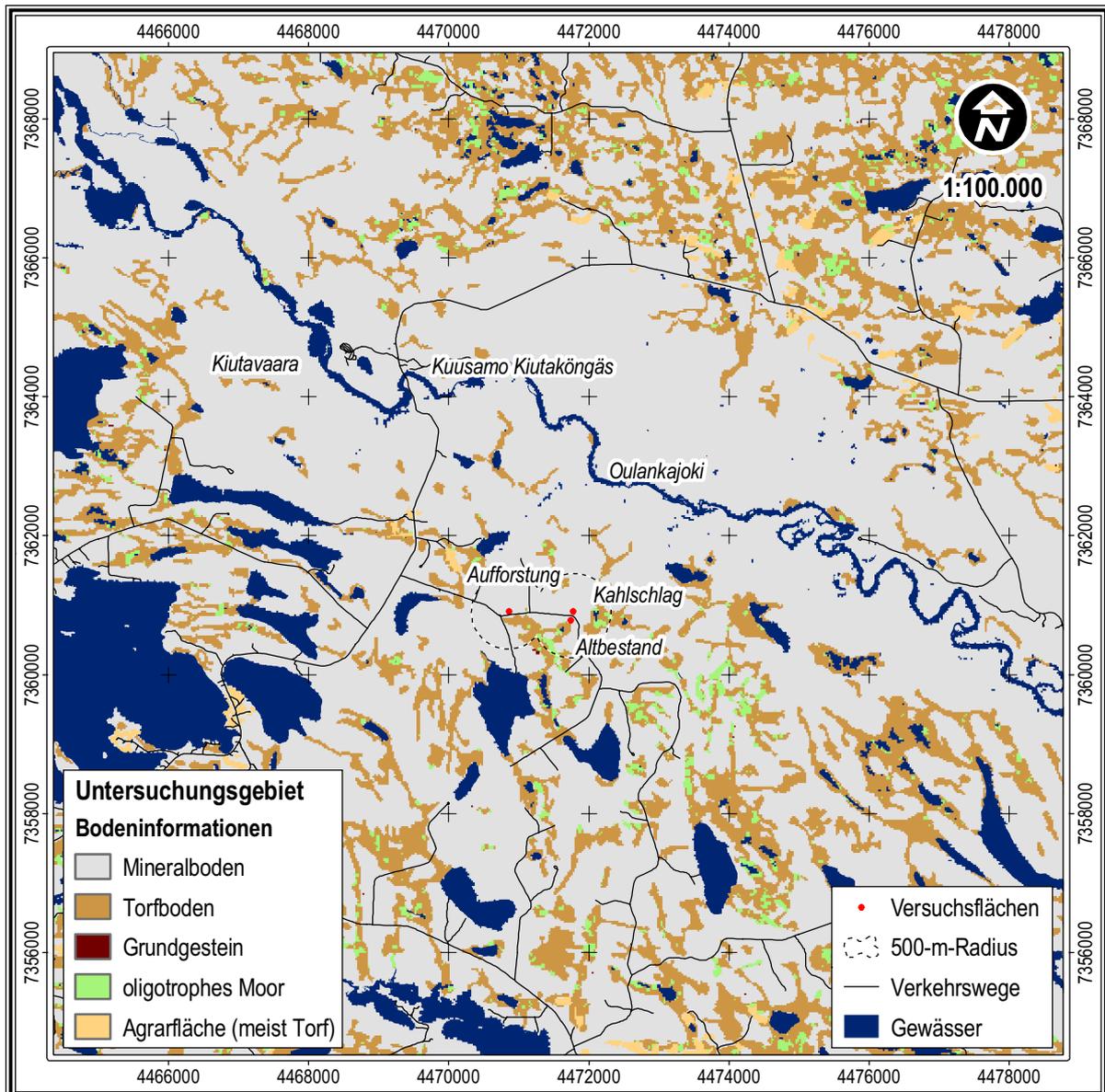


Abb. 73: Abgeleitete Bodeninformationen der finnischen Landnutzungs- und Waldinventurdaten (Quelldaten: NLS 1999b)

#### 5.3.1.4 (Wald-)Vegetation

Wie die Messergebnisse dieser Untersuchung belegen, üben die Vegetationsverhältnisse einen beträchtlichen Einfluss auf die lokalen Temperaturverhältnisse aus. In allen vorgestellten Ansätzen haben Variablen Eingang gefunden, welche den Einfluss der komplexen Vegetationsstrukturen auf den Temperaturhaushalt repräsentieren. Je nach Schwerpunkt und Skala der Ansätze wurden »Bestandshöhe«, »Kronenschluss«, »Bestandsdichte« und die »Mortalitätsrate von Jungbeständen« als Variablen genutzt (LINDKVIST & CHEN 1997, 1999, BLENNOW & PERSSON 1998, BLENNOW & LINDKVIST 2000, LANGVALL 2000).

Die Variablen »Bestandshöhe« und »Kronenschluss« sind bedeutend für den Strahlungsaustausch zwischen Boden und Atmosphäre (vgl. Kap. 4.4.1.1). Beide Variablen wurden von BLENNOW & PERSSON (1998) indirekt zur Ermittlung der Horizontüberhöhung entlang ihrer Messtranekte genutzt (vgl. REIF-SNYDER 1967, NUNEZ & SANDER 1982). Die in Ergänzung mit einem lokalen DHM resultierende Variable »sky view factor« erwies sich als signifikant im Sinne ihres Modells.

Auch die Bestandsdichte steht als Einflussgröße für den Strahlungshaushalt im Zusammenhang mit Frostgefährdungen in wolkenlosen, windstillen Nächten. Der von LANGVALL (2000) beschriebene Ansatz verweist auf eine Abnahme der Frostgefährdung mit zunehmender Bestandsdichte in unterschiedlich ausgedünnten Schutzwäldern. Die weitergehende Nutzung einer Variable »Bestandsdichte« ist jedoch nur im Zusammenhang mit zusätzlichen vegetationsbezogenen (z. B. den zuvor genannten) Variablen sinnvoll. LANGVALL (2000) weist beispielsweise darauf hin, dass Jungbestände innerhalb von Schutzwäldern im Frühsommer später austreiben als vergleichbare Bestände auf Freiflächen und so einer geringeren Mortalitätsrate unterliegen. Mit Zunahme der Temperaturen im Frühsommer sinkt die Frostwahrscheinlichkeit, sodass die später austreibenden Pflanzen seltener zum Zeitpunkt ihrer höchsten Frostempfindlichkeit Temperaturen unterhalb des Gefrierpunkts ausgesetzt sind.

Die Aufforstung von Kahlschlägen gehört auch zu den Schwerpunkten der Ansätze von LINDKVIST & CHEN (1997, 1999) sowie BLENNOW & LINDKVIST (2000). Jungbestände gelten als besonders frostgefährdet (STRAND & LUNDMARK 1987, GRANBERG et al. 1993), sodass ein besonderes Interesse an einer entsprechenden Risikoabschätzung besteht. LINDKVIST & CHEN (1997, 1999) nutzten die Mortalitätsrate in fünf Jahre alten *Picea abies*- und *Pinus contorta*-Plantagen zur Ausweisung der orographieabhängigen Frostgefährdung. BLENNOW & LINDKVIST (2000) diente die Mortalitätsrate eines fünfjährigen Bestands im gleichen Untersuchungsraum zur Überprüfung ihres multiplen Regressionsmodells.

Im Gegensatz zu den orographisch abgeleiteten Daten des vorangegangenen Kapitels 5.3.1.3 stellt sich das Informationsangebot an flächendeckenden, vegetationsbezogenen Informationen als ausgesprochen gering dar. Keine der genannten und in Tabelle 23 zusammengefassten Modellvariablen kann auf Daten der »Landnutzung und Waldinventur« oder auf Katasterinformationen zurückgreifen. Die forstwirtschaftliche Optimierung der Waldinventur beschränkt das Informationsspektrum auf Artendominanz und Holzmenge je Fläche, wodurch eine auf klimatologische Fragen ausgerichtete Aufbereitung der Daten schwer fällt. Die Angabe der Holzmenge ist lediglich in gleichaltrigen Plantagen ein Indikator für Bestandshöhe bzw. -dichte oder den Kronenschluss. Eine Klassifizierung ist jedoch auch dort nicht möglich. Für Jungbestände sind darüber hinaus keine weiteren Informationen verfügbar, sodass auch über die Mortalitätsrate keine Aussagen getroffen werden können. Zum aktuellen Zeitpunkt ist eine Bereitstellung von Daten für die vegetationsbezogenen Variablen der vorgestellten Modelle über das Angebot nationaler Katasterverwaltungen daher nicht möglich.

#### 5.3.1.5 Bestandsmanagement

Obwohl nicht Teil bestehender Modellansätze, erscheint es sinnvoll, den Einfluss üblicher Bodenmeliorationsverfahren als klimaökologischen Standortfaktor anzuführen, da er einen positiven Einfluss auf die Wachstumsbedingungen von Setzlingen ausübt (KUBIN & KEMPPAINEN 1994, LANGVALL et al. 2001, KARLSSON et al. 2002). Bearbeitungsverfahren wie Kerben, Eggen oder Pflügen sowie das Entfernen der Einschlagsreste verändern die Bodenstruktur, -durchlüftung und -temperatur sowie die Verfügbarkeit von Nährstoffen und Bodenwasser (ÖRLANDER et al. 1990, PREVOST 1992, SUTTON 1993, KUBIN & KEMPPAINEN 1994, LANGVALL et al. 2001, deCHANTAL 2004).

Untersuchungen von LANGVALL et al. (2001) und KARLSSON et al. (2002) führten zu dem Schluss, dass das Eggen eingeschlagener Flächen mit positiven Effekten für die Aufforstung von *Betula*-, *Pinus*- und *Picea*-Setzlingen verbunden ist. Eine weitere Auswirkung war die Reduzierung des Unterwuchses und damit die Stärkung der Konkurrenzfähigkeit der Setzlinge (KARLSSON et al. 2002). Das Entfernen der Einschlagsreste bewirkte hingegen lediglich in *Betula*-Beständen eine positive Auswirkung.

Analog zu den vegetationsbezogenen Einflussfaktoren stehen keine flächenhaften Daten zum Bearbeitungszustand von Kahlschlagflächen zur Verfügung. Die Ergebnisse der genannten Untersuchungen unterstreichen jedoch die Bedeutung dieser Thematik, sodass die Erfassung von Bodenmeliorationsmaßnahmen in einen Forderungskatalog zur Ausweisung klimaökologischer Standorttypen aufzunehmen ist.

### 5.3.2 Zusammenfassung zum Anforderungskatalog von Modellen zur Temperaturverteilung und Frostgefährdung sowie Möglichkeiten ihrer Übertragbarkeit

Die Analyse aktueller Modellansätze zur Ausweisung lokaler Temperaturverteilungen oder Frostgefährdungen auf der Basis von zur Verfügung stehenden Daten der Katasterverwaltung und des Wetterdienstes in Finnland zeigen eine beachtliche Nähe zwischen Anforderung und Angebot. Trotzdem erlaubt die Diskrepanz zwischen den benötigten Variablen der Modellansätze und den zur Verfügung stehenden räumlichen Daten zurzeit keine universelle Anwendung der Modelle für die genannte Fragestellung. Eine Umsetzung erfordert nach wie vor ein hohes Maß an eigenständigen Erhebungen in den Bereichen Mikroklimatologie und Vegetation. Anforderungen bezüglich orographischer und bodenbezogener Variablen sind hingegen vollständig aus dem digitalen Höhenmodell Finnlands und der nationalen »Landnutzung und Waldinventur« zu erfüllen. Tabelle 23 fasst den Anforderungskatalog der vorgestellten Modelle und die aktuelle Datenlage am Beispiel des Untersuchungsgebiets zusammen.

Tab. 23: Variablen verschiedener Modellansätze zur Prognose der Temperaturverteilung bzw. Frostgefährdung an Standorten und die großflächige Verfügbarkeit entsprechender Datengrundlagen

Klimaökologischer Parameter	Variable	Verfügbarkeit	Informationsgehalt	Quelle
Klima	Globalstrahlung	punktuell	gut	Wetterdienste
	Strahlungsbilanz	punktuell	gut	Wetterdienste
	Lufttemperatur	punktuell	gut	Wetterdienste
	Erdoberflächentemperatur	punktuell	gering/gut*	Wetterdienste
	Windgeschwindigkeit	punktuell	gut	Wetterdienste
	Bewölkungsgrad	punktuell	gut	Wetterdienste
	Topographie	Höhe absolut	flächendeckend	gut
Höhe relativ		flächendeckend	gut	DHM
Einzugsgebiet Kaltluft		flächendeckend	gut	DHM
Ortskoordinaten		flächendeckend	gut	nationale Kartographie
Terrainkrümmung		flächendeckend	gut	DHM
Blickfeld, Horizontüberhöhung		flächendeckend	gut	DHM
Bodeneigenschaften		Bodentyp o. Bodenart o. Bodentextur	flächendeckend	gering
Vegetation	Bestandshöhe	n. v.	n. v.	n. v.
	Kronenschluss	n. v.	n. v.	n. v.
	Bestandsdichte	flächendeckend	gering	Landnutzung & Waldinventur
	Mortalitätsrate (Jungbestände)	n. v.	n. v.	n. v.
Flächenmanagement	Bodenverbesserungsmaßnahmen	n. v.	n. v.	n. v.
<i>Abstufung Informationsgehalt: gut, gering, sehr gering, n. v. (nicht vorhanden)</i>				<i>* nur Minima</i>

Auswahl der Variablen nach Ansätzen bzw. Untersuchungen von LINDKVIST & LINDQVIST (1997), LINDKVIST & CHEN (1997), BLENNOW & PERSSON (1998), LINDKVIST & CHEN (1999), BLENNOW & LINDKVIST (2000), LANGVALL (2000), LINDKVIST et al. (2000), LANGVALL et al. (2001) und KARLSSON et al. (2002)

Ein wesentliches Problem für eine universelle, zeit- und kostengünstige Anwendung der Modelle ist das Fehlen eines engmaschigen Wetterstationsnetzes im borealen Raum. An vielen Standorten ist so eine Extrapolation punkthafter Wetterdaten aufgrund fehlender Ausgangsinformationen nicht oder nur ungenau möglich. Darüber hinaus sind Messungen zu den Strahlungsverhältnissen in der Regel nicht Teil standardisierter Wetterstationen. Vor dem Hintergrund abnehmender staatlicher Investitionen ist auch in Zukunft nicht mit einem dichteren Stationsnetz der Wetterdienste zu rechnen. Sollten jedoch klimaökologische

Modelle unter kommerziellen Gesichtspunkten ihre Prognosefähigkeit unter Beweis stellen, wäre eine Förderung von Messnetzen durch forstwirtschaftliche Unternehmen denkbar.

Mittelfristig bleiben lokale Messungen, wie sie im Rahmen dieser Untersuchung durchgeführt wurden, die einzige Möglichkeit zur Spezifizierung oder Korrektur entfernterer Wetterdienststationen. Längerfristig stellen Fernerkundungsdaten möglicherweise eine Alternative zur bodennahen Erhebung von Klimadaten dar, worauf abschließend noch einzugehen ist.

Im Gegensatz zu den direkten klimabezogenen Informationen ist das Fehlen einer erweiterten Datenbasis zur Vegetation lediglich eine Folge der Ausrichtung bestehender Landnutzungsdaten und möglicherweise das Ergebnis einer mangelnden Nachfrage. Im Rahmen der Datenbasis der finnischen »Landnutzung und Waldinventur« werden auf den Trainingsflächen auch Informationen zu den bisher nicht berücksichtigten Variablen »Bestandshöhe«, »-dichte«, »Kronenschluss« und »Schädigungen« sowie zum »Alter« der Bestände erhoben (KUUSELA & SALMINEN 1969, METLA 2005). Ausgewertet und publiziert werden jedoch nur die für Ertragsprognosen bedeutenden Variablen »Artenzusammensetzung«, »Bestandsalter« und »Holzmenge«. Bestünde eine Nachfrage nach klimatologisch relevanten Bestandsinformationen, wie sie die beschriebenen Modellansätze nutzen, sollte eine entsprechende Veröffentlichung durch die erhebenden Institutionen möglich sein.

Wie bereits erläutert, ist das Bestandsmanagement zurzeit nicht Teil klimaökologischer Modellansätze, jedoch verweisen zahlreiche Autoren (vgl. Kap. 5.3.1.5) auf den lokalklimatischen Einfluss von Bodenmeliorationsverfahren und die damit verbundene Verbesserung der Wachstumschancen von Sämlingen im borealen Raum. Eine Erfassung der Bodenbearbeitungsmaßnahmen und die Erstellung einer entsprechenden Datenbank würde zukünftigen Modellen zu deutlich verbesserten Prognosen verhelfen.

## 5.4 Modellansätze zur Windwurfgefährdung

Wie in Kapitel 4.4.4 beschrieben, stellt neben der Frostgefährdung auch der Windwurf in der Borealis einen bedeutenden abiotischen Schädigungsfaktor dar. Frühere Untersuchungen dokumentieren die ökologische und wirtschaftliche Bedeutung sowohl für den nordeuropäischen Raum (LAIHO 1987, JALKANEN & MATTILA 2000, TALKKARI et al. 2000), die Taiga Russlands (GONCHARUK et al. 1997, ULANOVA 2000) und Bereiche Nordamerikas (MITCHELL et al. 2004, SCOTT 2005).

Vor diesem Hintergrund besteht erwartungsgemäß sowohl Bedarf an Prognosemöglichkeiten über zu erwartende Windschäden in Waldarealen als auch über die windbedingten Einschränkungen für das Bestandswachstum nach Einschlägen. Entsprechend reicht eine systematische Suche nach geeigneten Parametern etwa 30 Jahre zurück. Ausgehend von der Analyse regionaler Windströmungen und dem Einfluss der Topographie (JACKSON & HUNT 1975) entstand nach BOOTH (1977) eine der ersten europäischen Windwurfklassifikationen, die durch MILLER (1985) weiterentwickelt wurde. Die als »Windthrow Hazard Classification« (WHC) bezeichnete Methode ermittelte die Windgefährdung eines Standortes aus den individuell gewichteten Faktoren Windzone (in Großbritannien), Höhenlage, Windexposition und Bodentyp. Die Windexposition aus acht Kompassrichtungen wurde zum heute verwendeten TOPEX-Modell weiterentwickelt (BELL et al. 1995).

Die Prozesse der Windeinwirkung auf Einzelbäume, die zu Windwurf, d. h. Entwurzelung oder Stammbruch führen, sind inzwischen recht gut dokumentiert (PELTOLA & KELLOMÄKI 1993). Demgegenüber zeigen sich die Verhältnisse in räumlicher Hinsicht so komplex, dass Methoden zur Modellierung von Windgefährdungen bis heute nicht den Eingang in das Standardportfolio der verbreiteten Geoinformationssysteme gefunden haben. Gleichwohl existiert inzwischen eine Reihe von Modellen, die sich in synoptische, mechanistische und empirische Ansätze unterteilen lassen (LANQUAYE 2003, MITCHELL et al. 2004, SCOTT 2005).

- Synoptische Ansätze basieren auf dem durch Geländebeobachtung erworbenen Erfahrungsschatz von Waldbesitzern bzw. Forstmitarbeitern. Dabei werden beobachtete Risikoindikatoren wie Wurzeldeformationen, unverhältnismäßig große Kronen, Krankheiten und problematische Bodenbereiche systematisch erhoben und ausgewertet. Anschließend werden Wahrscheinlichkeiten für eine Windwurfanfälligkeit ausgewiesen (STATHERS et al. 1994, LANQUAYE 2003).
- Mechanistische Ansätze versuchen die Wahrscheinlichkeit von Windschäden durch Abschätzung kritischer, Windwurf verursachender Windgeschwindigkeiten an einem Standort zu bestimmen. Die Ergebnisse derartiger Ansätze sollen Schadensrisiken für unterschiedliche Waldbereiche ermitteln und bei der Entwicklung von Strategien zur Minderung der Risiken helfen (TALKKARI et al. 2000, LANQUAYE 2003). Die kritischen Windgeschwindigkeiten werden z. B. durch Zugfestigkeitstests an Bäumen (SMITH et al. 1987, PELTOLA et al. 2000), Windkanalversuchen oder numerischer Modelle von Windbewegungen gewonnen (GARDINER et al. 1997, GARDINER & QUINE 2000, RUEL et al. 2000, TALKKARI et al. 2000). Mechanistische Modelle wurden erfolgreich in uniformen Beständen in Europa und Ostkanada angewandt (PELTOLA & KELLOMÄKI 1993, PELTOLA et al. 1999). Als problematisch hat sich jedoch der Einsatz in inhomogenen Beständen herausgestellt (hohe Variabilität von Baumhöhe, Gesundheitszustand, Bestandsstruktur und -verteilung). Auch das Fehlen lokaler Winddaten limitiert derartige Ansätze (LANQUAYE 2003, SCOTT 2005).
- Empirische Ansätze basieren auf der Erhebung bestehender Windschäden auf Beispielflächen. Durch die Erfassung der Verbindung zwischen Windschäden und den lokalen Bestands-, Umwelt- und Managementvariablen wird versucht, das Gefährdungspotenzial für andere Bestände zu ermitteln. Empirische Ansätze wurden erfolgreich in Fichtenbeständen in Ontario, Kanada (ELLING & VERRY 1978), Kiefernbeständen in Schweden (FRIDMAN & VALINGER 1998) und an verschiedenen Waldrändern von Kahlschlagflächen im kanadischen British Columbia getestet (MITCHELL et al. 2001, MITCHELL 2003). Empirische Ansätze erscheinen geeigneter für Bestände mit komplexer Bestandsstruktur und heterogenen Relief- und Bodenverhältnissen (MITCHELL & LANQUAYE-OPOKU 2004). Für den Aufbau empirischer Modelle sind Informationen über eine hohe Anzahl von Fällen notwendig. Die Erhebung und Weiterverarbeitung ist über Luftbildinterpretation und GIS möglich.

Ein Vergleich der Erfolgsaussichten der einzelnen Ansätze erscheint wenig sinnvoll, da in der Regel unterschiedliche Zielvorstellungen vorliegen. Ansätze zur Ausweisung von Windgeschwindigkeiten weisen mit einer guten Variablenauswahl Fehler von weniger als 10 % auf (vgl. HANNAH et al. 1995, SUÁREZ-MINGUEZ et al. 1999). Untersuchungen auf der Grundlage von erfolgten Schadensereignissen sind je nach Standort in der Lage, zwischen 69 und 95 % der Schäden zu »erklären« (MITCHELL et al. 2001, LANQUAYE 2003, MITCHELL & LANQUAYE-OPOKU 2004, SCOTT 2005).

Unabhängig von der Vorgehensweise und dem gewählten Modellansatz hängt die Qualität der Windgefährdungsprognosen, wie zuvor im Fall der Modelle zur Temperaturverteilung, in hohem Maß von flächenhaften Informationen zu den geforderten Variablen ab. Auch im Fall der Vorhersage von Windschäden besteht von Seiten möglicher Nutzer ein kommerzielles Interesse in einem geringen Aufwand an Datenerhebungen. Daraus folgt die Forderung nach einer lückenlosen Verfügbarkeit von Daten für den Einsatz in Prognosemodellen. Analog zu den Temperaturmodellen soll auch in diesem Fall das Verhältnis zwischen den Anforderungen ausgewählter Modellansätze an flächenhafte Daten und dem Angebot der finnischen Katasterverwaltung untersucht werden. Es gilt wiederum, die universelle Eignung der Modelle zu überprüfen und Lücken im Datenangebot auszuweisen.

### 5.4.1 Anforderungen von Modellen zur Windwurfgefährdung sowie Möglichkeiten ihrer Übertragbarkeit

Die in Modellen zur Windgefährdung verwendeten Variablen beziehen sich fast ausnahmslos auf die lokalen oder überregionalen Windverhältnisse, das umgebende Relief des ausgewählten Standorts, die Boden-, Vegetations- und die lokalen Nutzungsverhältnisse (SUÁREZ-MINGUEZ et al. 1999, GARDINER et al. 2003, LANQUAYE 2003, SCOTT 2005).

#### 5.4.1.1 Windverhältnisse

Wie einleitend angedeutet, stellen Messdaten nahe gelegener Wetterstationen in der Borealis die Ausnahme dar. Darüber hinaus sind die Werte teilweise wenig repräsentativ für walddominierte Areale, da sie häufig an Flughäfen oder in stadtnahen Gebieten gewonnen werden (SCOTT 2005). Zur Erfassung der lokalen Windverhältnisse wurden daher entweder Daten entfernter Stationen extrapoliert oder mit Hilfe lokaler Messungen korrigiert.

Mit Hilfe von Rauigkeitsklassen für bestimmte Oberflächen wurden beispielsweise Windatlanten für einzelne Länder (Finnland: TAMMELIN 1991) oder ganze Kontinente (Europa: TROEN & PETERSEN 1989) veröffentlicht. Alternativ ermittelten HANNAH et al. (1995) regionale Windgeschwindigkeiten über multiple Regressionsgleichungen aus den Werten entfernter Wetterstationen, wobei je nach Standort und Variablenauswahl geringe Fehlerraten von deutlich unter 10 % erzielt wurden. Eine breite Anwendbarkeit könnte mit diesem Verfahren jedoch erst erreicht werden, wenn für eine große Anzahl von Wetterstationen die in der Methode genutzten »TOPEX-to-distance«-Variablen ermittelt und veröffentlicht würden. Lokale Messungen, wie die in Kapitel 4.4.4 vorgestellten, sind ebenfalls nutzbar, um Messdaten der Wetterdienste lokal zu korrigieren. Mit Hilfe von Erhebungen an »unkonventionellen«, d. h. nicht genormten Standorten wurde beispielsweise ein landesweites Indexnetz für Großbritannien erstellt (QUINE & WHITE 1994).

Als problematisch erscheint jedoch die Anwendung von einzelnen auf den britischen Inseln gewonnenen Erfahrungen auf die Verhältnisse in Finnland (McNOLEG 1996). Die klimatologischen Bedingungen Finnlands zeichnen sich im Vergleich zu denen Großbritanniens durch geringere Windgeschwindigkeiten und eine weniger deutliche Westwinddominanz aus (FMI 1991, 2002, MÜLLER 1996). Möglicherweise spiegelt sich diese Problematik in den beiden Messkampagnen am Oulanka-Nationalpark wider. Trotz verhältnismäßig geringer Reliefunterschiede äußerte sich die Distanz von etwa 40 km zwischen den Versuchsfeldern und dem Flughafen Kuusamo als nächstgelegene, Winddaten erhebende Wetterstation bereits in deutlichen windklimatologischen Unterschieden (vgl. Kap. 4.4.4). Wie Abbildung 74 verdeutlicht, unterschieden sich die beiden Messkampagnen darüber hinaus durch diametral entgegengesetzte Hauptwindrichtungen, welche sich an den zwei Standorten in unterschiedlicher Weise auswirkten.

Auch am Beispiel des Vergleichs der Windgeschwindigkeitswerte der zwei Standorte mit Hilfe linearer Einfachregressionen lässt sich verdeutlichen, dass die Messwerte des Flughafens Kuusamo nur bedingt geeignet sind für Aussagen zu Standorten im Oulanka-Nationalpark. Zwischen den Datenreihen der beiden Standorte auf Grundlage von 3-Stunden-Mittelwerten ergaben sich Korrelationskoeffizienten von 0,61 (Sommer 1999) bzw. 0,82 (Sommer 2000). Diese deuten zwar auf einen gewissen Zusammenhang hin, die Bestimmtheitsmaße waren mit  $R^2 = 0,41$  und  $0,35$  jedoch gering. Auch die für Windschäden bedeutende Verteilung von Windereignissen höherer Windgeschwindigkeiten zeigte deutliche Unterschiede zwischen den Standorten. In den Sommermonaten der Messkampagne 1999 waren an beiden Standorten die jeweils höchsten Windgeschwindigkeiten mit Windrichtungen aus SW verbunden. Trotz abweichender Hauptwindrichtung im Folgejahr wurden auch im Sommer 2000 auf der Kahlschlagfläche die höchsten Windgeschwindigkeiten aus SW registriert, während in Kuusamo südliche und sekundär östliche

Strömungen zu Maximalwerten führten (Abb. 74). Für eine abschließende Bewertung fehlen langjährige Vergleiche sowie die Möglichkeit der Analyse von Sturmereignissen. Insgesamt erscheinen jedoch lokale Windmessungen sinnvoll für die Beurteilung von lokalen Windgefährdungen.

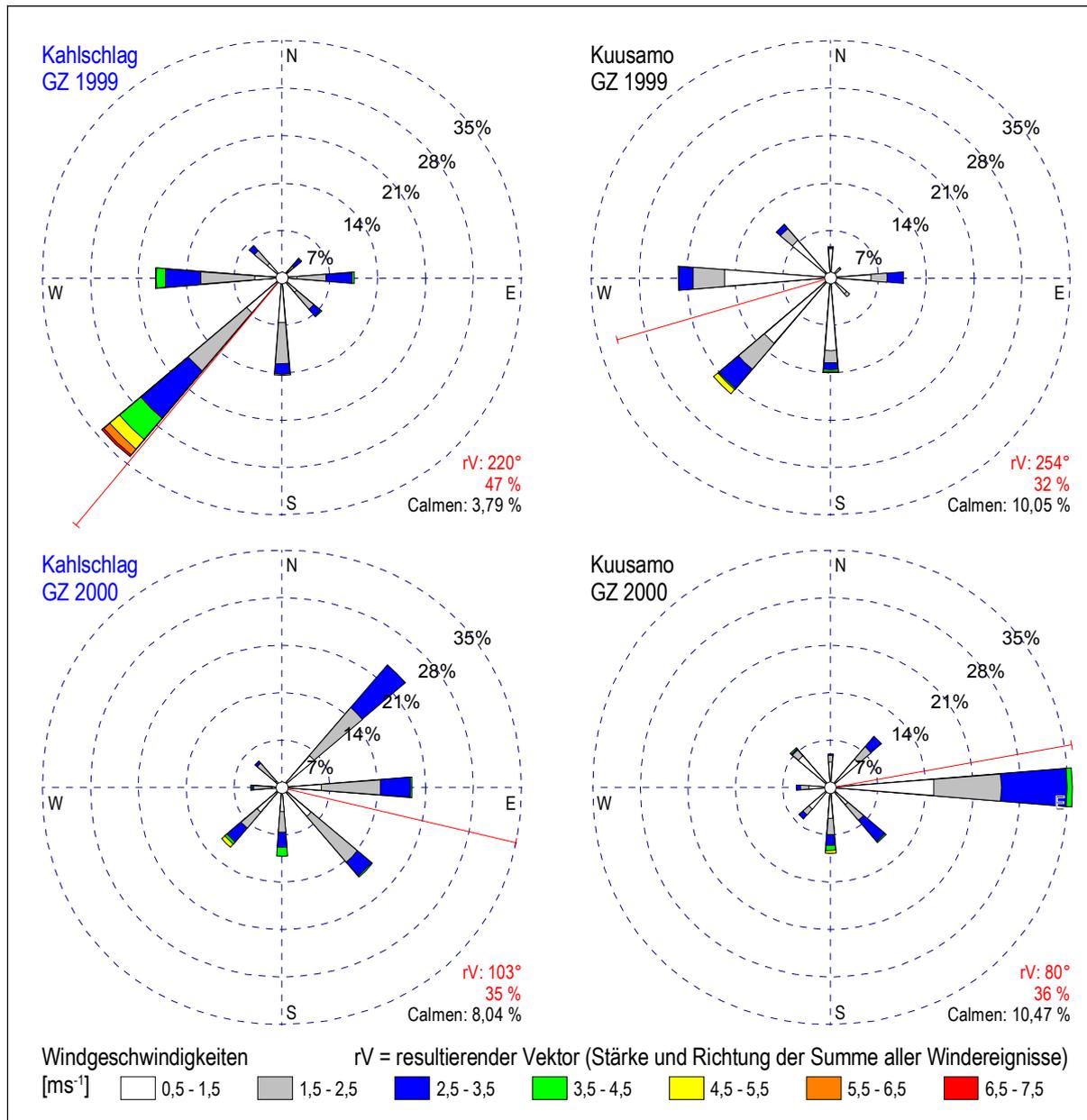


Abb. 74: Verteilung der Windrichtungen und Windgeschwindigkeitsklassen auf der Kahlschlagfläche und dem Flughafen Kuusamo während der beiden Messkampagnen; Generalisierung auf acht Hauptwindrichtungen nach TOPEX-Vorgabe (RUEL et al. 2002), (Quelldaten: Eigene Erhebung und FMI).

#### 5.4.1.2 Orographie

Die Orographie des jeweils untersuchten Raums stand unabhängig von den zuvor beschriebenen Modellvarianten im Mittelpunkt aller Ansätze. In der Regel diente ein DHM als Ausgangspunkt, von dem weitere Informationen abgeleitet wurden.

Unter den orographischen Variablen zur räumlichen Analyse der Windgefährdung wurde die »absolute Höhenlage« als Variable nur in wenigen Fällen genutzt. HANNAH et al. (1995) ermittelten recht hohe Korrelationskoeffizienten zwischen jährlicher mittlerer Windgeschwindigkeit und absoluter Höhenlage für Standorte mit dauerhaft hohen Windlasten in Schottland. Innerhalb eines Regressionsmodells zur

Prognose windbedingter Schäden in finnischen Waldstandorten konnte dagegen keine signifikante Modellverbesserung durch die Variable »absolute Höhe« erzielt werden (JALKANEN & MATTILA 2000).

Als bedeutsamer erwiesen sich relative Höhenunterschiede und die daraus resultierenden meso- und mikroskaligen Einflüsse der Orographie auf die bodennahen Windverhältnisse. Je nach Lage eines Standorts zu seiner Umgebung wirkt er sich als Windhindernis aus, unterliegt Fallwinden, Kanalisierungseffekten oder Turbulenzen (GRATKOWSKI 1956, EGGER 1983, STATHERS et al. 1994, LEKES & DANDUL 2000). Grundsätzlich bestehen an exponierten Standorten wie der windzugewandten Seite von Hügeln höhere Gefährdungen als im Lee (STATHERS et al. 1994, KRAMER et al. 2001). Ähnliche Zusammenhänge gelten für Standorte in Tallagen, deren Windexpositionsgrad je nach Windrichtung geschützt oder durch Kanalisierungseffekte hoch sein kann (ALEXANDER 1987, STATHERS et al. 1994, ROLLERSON et al. 2002). In diesem Zusammenhang wird die Bedeutung der Überschneidung von Relief- und Klimavariablen deutlich, da die Variabilität von Windgeschwindigkeit und -richtung zu einer topographischen »Windexpositionsvariabilität« führt.

In den meisten Modellansätzen zur Ermittlung der Windgefährdung stellt die Ausweisung der Windexposition eine der primären Variablen dar (SUÁREZ-MINGUEZ et al. 1999, TALKKARI et al. 2000, MITCHELL & LANQUAYE-OPOKU 2004, SCOTT 2005). Als geeignetes Werkzeug zur flächenhaften Ermittlung der Windexposition hat sich das »Distance limited-Topex«-Verfahren der britischen Forstverwaltung (British Forest Commission) erwiesen, welches ein fortgeschrittenes Entwicklungsstadium aufweist (QUINE & WHITE 1998, RUEL et al. 2000, MITCHELL et al. 2001, RUEL et al. 2002). Das Verfahren geht zurück auf eine Methode zur Erhebung der Windexposition im Gelände (WILSON 1984, MILLER 1985) und ist ein relatives Maß für den Windschutz an einem Punkt durch die umgebende Orographie. TOPEX (Topographic exposure) wird durch die Summe der Inklinationswinkel zum Horizont in den acht Hauptkompassrichtungen ermittelt, wobei große Werte auf windgeschützte Standorte verweisen, während geringe Werte exponierte Punkte wiedergeben (BELL et al. 1995, QUINE & WHITE 1998, RUEL et al. 2002). Im Zuge der Entwicklung immer leistungsfähigerer, kostengünstiger EDV-Systeme wurde es möglich, das ursprünglich für einzelne Punkte entwickelte Verfahren für jeden Punkt eines DHM zu ermitteln. RUEL et al. (2002) haben eine Erweiterung für das verbreitete Geoinformationssystem »ArcView« entwickelt, mit dem sich Windexpositionen flächenhaft als GRID ausweisen lassen. Alternativ stellt die »Windthrow Research Group« der University of British Columbia eine Version als eigenständige Anwendung zur Verfügung (MITCHELL et al. 2005).

Über das vorhandene DHM konnte das »Distance limited-Topex«-Verfahren im Untersuchungsgebiet des Oulanka-Nationalparks angewendet werden (vgl. RUEL et al. 2002). Die zuvor genannten Anwendungen ermöglichen darüber hinaus eine freie Gewichtung des Expositionsindex durch numerische Werte für die acht Hauptkompassrichtungen. Im Fall des Untersuchungsgebiets erfolgte eine Gewichtung auf Grundlage der Windrichtungen, die während des Auftretens der höchsten Windgeschwindigkeiten im Verlauf der beiden Messkampagnen maßgeblich waren. Auch wenn keine Windereignisse auftraten, die zu Schädigungen geführt haben, so gibt Abbildung 75 dennoch wieder, dass hohe Windgeschwindigkeiten vornehmlich aus südwestlichen Richtungen zu erwarten sind. Als Schwellenwert für die Definition »hoher« Windgeschwindigkeiten wurden 2,5 Standardabweichungen von den Mittelwerten der beiden Messkampagnen gewählt, da sich beide Messzeiträume in der Höhe ihrer durchschnittlichen Windgeschwindigkeiten erheblich unterschieden (Abb. 75).

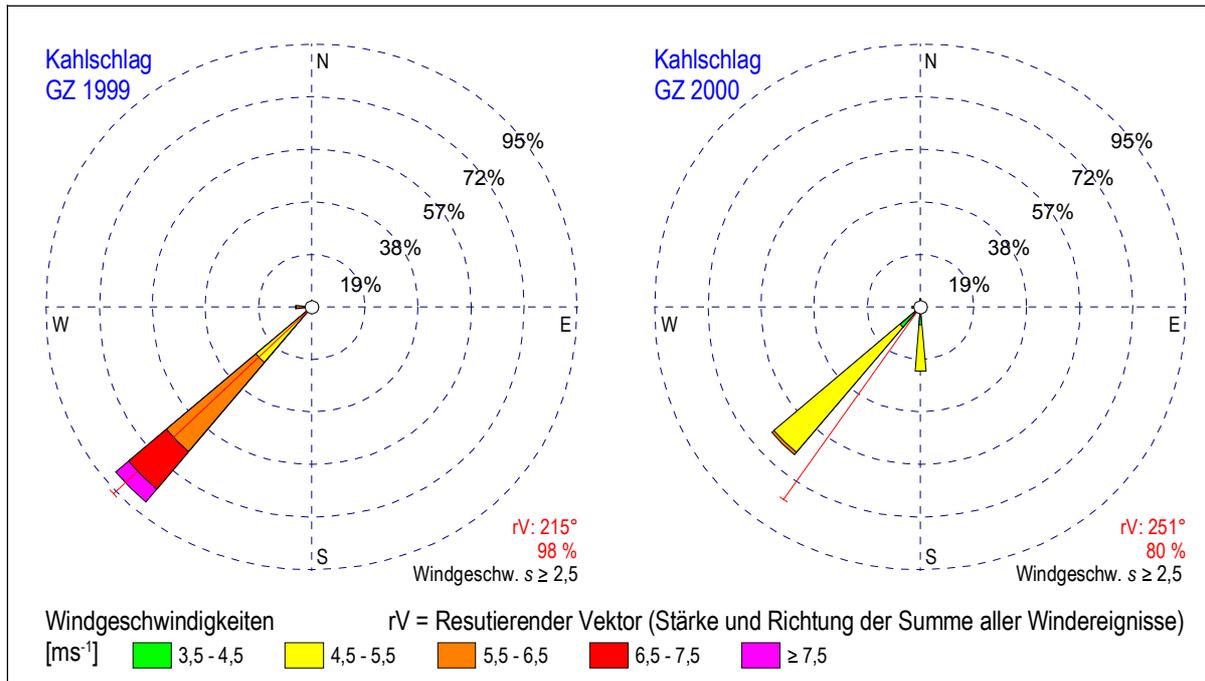


Abb. 75: Verteilung der Windrichtungen und Windgeschwindigkeitsklassen mit Werten über 2,5 Standardabweichungen auf der Kahlschlagfläche während der beiden Messkampagnen; Generalisierung auf acht Hauptwindrichtungen nach TOPEX-Vorgabe (RUEL et al. 2002)

Die Grundlage für den gewichteten topographischen Expositionindex bildeten 255 Messwerte (10-Minuten-Mittel) aus der Messreihe des Jahres 1999 und 101 Werte aus dem Folgejahr. Wie bereits genannt, entspricht der Gewichtungsfaktor für jede der Hauptkompassrichtungen dem Mittelwert der Anteile der Windrichtungen mit Windgeschwindigkeiten über 2,5 Standardabweichungen aus beiden Messkampagnen (Tab. 24).

Tab. 24: Gewichtung des topographischen Windexpositionsindex auf Basis der Windmessungen der beiden Messkampagnen

Anteil der Windgeschwindigkeiten $s \geq 2,5$ [%] an den Windrichtungen								
Windrichtung	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
1999	0,00	0,00	0,00	0,00	2,35	91,76	5,88	0,00
2000	2,97	0,99	1,98	1,98	22,77	65,35	2,97	0,99
Gewichtung	0,12	0,04	0,08	0,08	1,01	6,28	0,35	0,04

Die GRID-Erstellung wurde mittels des Programms der »Windthrow Research Group« durchgeführt. Diese Version erwies sich im Vergleich zur »Avenue«-Ausführung als erheblich schneller. Zur Eliminierung des Randfehlers wurde ein entsprechend größeres GRID (+2000 m) berechnet und anschließend beschnitten. Abbildung 76 gibt die Ergebnisse des TOPEX in kartographischer Form wieder.

Die Kartendarstellung verdeutlicht die Zunahme der Windexposition von der Tallage des Oulankajoki hin zu den Kuppen des umgebenden Hochlands (vgl. RUEL et al. 2002). Durch die hohe Auflösung des GRID heben sich auch kleinere windgeschützte Talstrukturen wie Senken und die Zuflüsse des Oulankajoki ab. Ebenso erkennbar sind die hohen Windexpositionen südwestlicher Hanglagen durch die Gewichtung der entsprechenden Windrichtungen. Entsprechend ihrer Lage weisen die Versuchsflächen höhere Windexpositionswerte auf (Abb. 63).

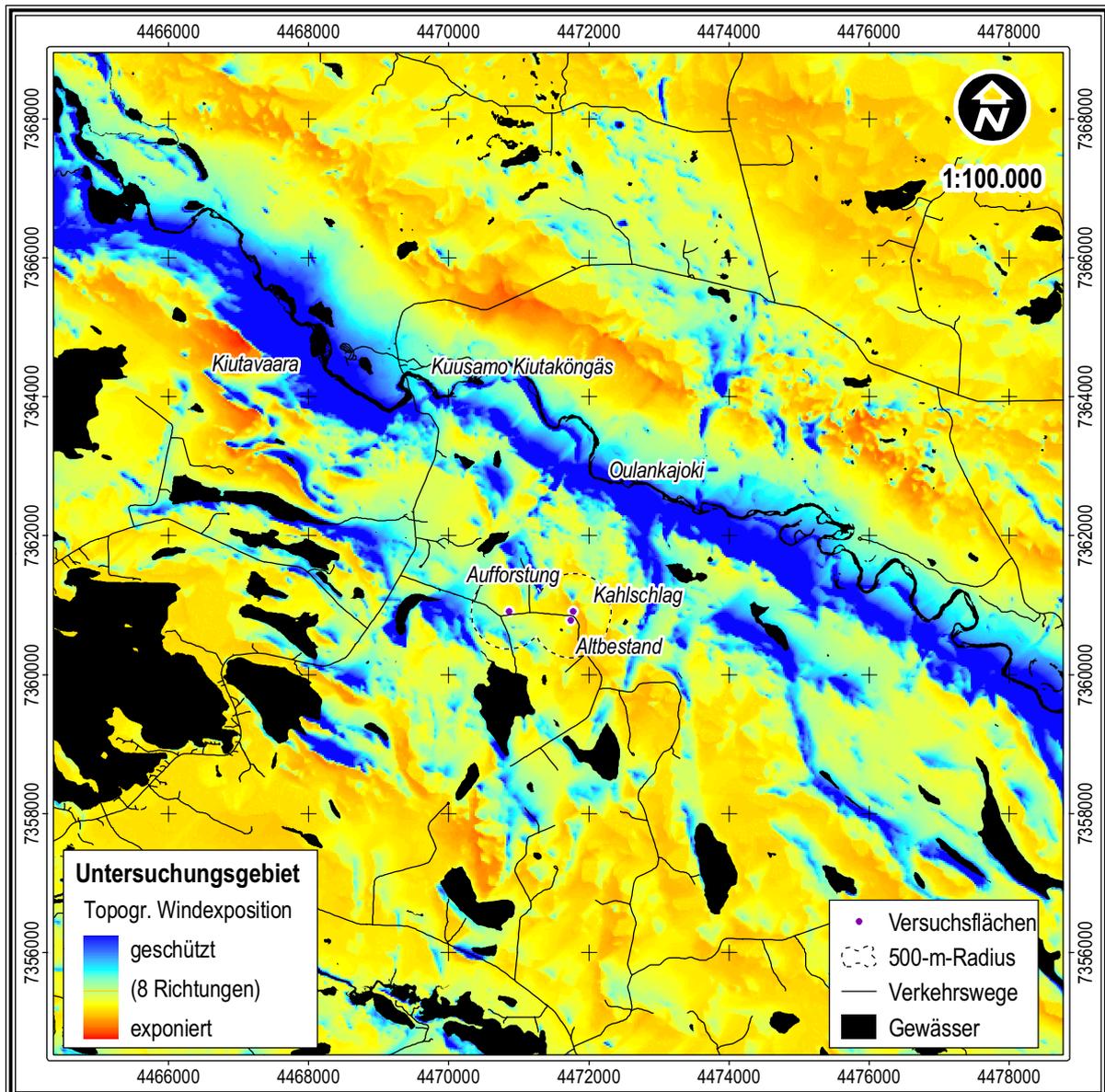


Abb. 76: Reliefbedingte Windexposition im Untersuchungsgebiet des Oulanka-Nationalparks auf Grundlage eines DHM und der höchsten Messwerte der Windgeschwindigkeit (2,5 Standardabweichungen) während der beiden Messkampagnen

#### 5.4.1.3 Böden

Obwohl weniger bedeutend als die Orographie, gelten auch die Bodenverhältnisse als Einflussfaktor für die Windwiderstandsfähigkeit von Beständen. Die Bodencharakteristik in Form der Bodentextur, dem Feuchteregime und dem Nährstoffhaushalt besitzt eine direkte Wirkung auf das Wurzel-Boden-System (STATHERS et al. 1994). Dabei gilt die Wurzeltiefe als Determinante für die Baumstabilität. Der direkte Zusammenhang zwischen Zunahme der Wurzeltiefe und Abnahme der Windgefährdung wurde mehrfach nachgewiesen (ALEXANDER 1964, ROLLERSON 1981, HOLMES 1985).

Dennoch stellt sich eine Klassifizierung der zuvor genannten Bodenparameter im Hinblick auf das Gefährdungspotenzial für Windwurf in zahlreichen Untersuchungen als überaus komplexes Problem dar und muss bis zum aktuellen Zeitpunkt als ungelöst gelten. Ursachen sind sowohl gegensätzliche Ergebnisse verschiedener Untersuchungen als auch das Problem von Autokorrelationen zwischen Boden- und Bestandseigenschaften. Beispielhaft für derartige Probleme sind die Ergebnisse der Untersuchungen von ROLLERSON & MCGOURLICK (2001), die entgegen dem zuvor genannten Zusammenhang eine höhere

Windwurfrate bei größerer Wurzeltiefe vorhanden. Als Ursache vermuteten die Autoren eine höhere Anfälligkeit als Folge der größeren Bestandshöhe trotz besserer Wurzel Ausbildung.

Der Zusammenhang zwischen Bodentextur und Windwurf ist bisher nur in wenigen Fällen untersucht worden. In einem Untersuchungsgebiet in British Columbia, Kanada, konnten in 25 bzw. 50 m breiten Waldrändern entlang von Kahlschlagflächen keine einheitlichen Gefährungskriterien für mineralische und organische Böden ermittelt werden (LANQUAYE 2003). Auf vergleichbaren Flächen in der gleichen Region fanden MITCHELL & LANQUAYE-OPOKU (2004) eine höhere Anfälligkeit für Bestände auf anmoorigen, sandigen und kiesigen Böden und eine geringere für Waldbereiche auf schluffigen und tonig-lehmigen Untergründen sowie Mischböden. Für die in Finnland vorliegenden Verhältnisse haben JALKANEN & MATTILA (2000) eine abgestufte Gefährdung auf Grundlage der in der achten Waldinventur dokumentierten Windschäden aufgestellt. Die Klassen beziehen sich jedoch auf bodenabhängige Bestandstypen und geben eine Zunahme der Windgefährdung für die Standorte »Kiefernmoor«, »Fichtenmoor« und »Mineralböden« als Folge der unterschiedlichen Entwicklungsmöglichkeiten für das Wurzelwerk an.

Der Wassergehalt des Bodens steht in keinem einheitlich definierbaren Zusammenhang zur Stabilität eines Bestands. Nach LEKES & DANDUL (2000) wirken trockene Böden stabilisierend auf Bestände. ALEXANDER (1964) sowie LOHMANDER & HELLES (1987) ermittelten ebenfalls höhere Windwurfraten auf feuchten bzw. nassen Standorten. Dagegen fanden ROLLERSON & MCGOURLICK (2001) größere Windschäden auf gut drainierten Böden. Unumstritten ist hingegen eine höhere Gefährdung von Beständen auf Standorten mit hohem Grundwasserspiegel oder häufig wassergesättigten Böden, da beide Bedingungen das Wurzelwachstum von Bäumen limitieren (GARDINER & QUINE 2000). Die zuletzt genannten Verhältnisse sind von besonderer Bedeutung, da sie sich häufig in Arealen mit geringer Reliefenergie einstellen und über DHM-basierte Modelle nicht erfassbar sind.

Auch die Beziehung zwischen dem Nährstoffgehalt von Böden und der Windwurfanfälligkeit der Bestände gilt als ungesichert bzw. als schwer zu bewerten. Zwar legen mehrere Untersuchungen eine größere Windwurfanfälligkeit von Beständen auf »reichen« Böden nahe, jedoch besteht auch in diesem Fall die Möglichkeit einer Autokorrelation über die dort üblicherweise höher ausgebildeten Bestände (ELLING & VERRY 1978, FLEMING & CROSSFIELD 1983, HARRIS 1989, MITCHELL et al. 2001).

Die Beziehung zwischen den Bodenverhältnissen und der Windgefährdung muss vor diesem Hintergrund als sehr unsicher angesehen werden. Die bisherigen Erkenntnisse erlauben somit keine numerischen Abstufungen. Für das Untersuchungsgebiet ist jedoch eine ordinal skalierte Klassifikation nach den Erkenntnissen von JALKANEN & MATTILA (2000) sowie PELTOLA et al. (2000) denkbar. Die nötigen flächenhaften Informationen lassen sich aus der »Landnutzung und Waldinventur« durch Reklassifikation gewinnen (Tab. 25).

Tab. 25: Beziehung zwischen Windgefährdung von Beständen und Bodeneigenschaften

Windgefährdung (zunehmend)	Boden/bodenabhängige Vegetation	Ausgangsklassen
1	Laubwald (Mineral- o. Torfböden)	Laubwald auf Mineralböden; auf Torfböden
2	Kiefernmoor (Torfböden)	Kieferndominanzen versch. Dichte auf Torfböden
3	Nadelmischwald (Torfböden)	Nadelmischwald versch. Dichte auf Torfböden
4	Fichtenmoor (Torfböden)	Fichtendominanzen versch. Dichte auf Torfböden
5	Nadelwald auf Mineralböden	Beliebige Nadelwaldbestände versch. Dichte auf Mineralböden; Jungbestände auf Mineralböden
NoData	unbewaldete Flächen o. keine Daten	Agrarflächen, Gewässer, Kahlschläge, Grundgestein, sonstiges

Das Ergebnis der Reklassifizierung ergibt eine relative Klassenzuordnung, die zwar eine Abstufung bzw. Sortierung erlaubt, jedoch keiner Abstufung nach metrischen Gesichtspunkten folgt (vgl. JALKANEN &

MATTILA 2000, PELTOLA et al. 2000). Die Umsetzung der Reklassifizierung ist in Abbildung 77 flächenhaft dargestellt.

Mit etwa 77 % Anteil an der bewaldeten Fläche dominieren Nadelwälder auf Mineralböden das Untersuchungsgebiet. In der Tallage des Oulankajoki dürfte die Schädigungswahrscheinlichkeit dieser gefährdetsten Klasse der Bestände jedoch gering sein. Ausgehend von der südwestlichen Hauptwindrichtung für hohe Windgeschwindigkeiten ist die Tallage vergleichsweise windgeschützt. Im Hochland sind hingegen nahezu alle windexponierten Waldflächen durch diesen Typ bestimmt. Die als geringer gefährdet ausgewiesenen Typen »Fichtenmoor« (~ 2 %), »Nadelmischwald auf Moorböden« (~ 4 %) und »Kiefernmoor« (~ 17 %) befinden sich meist in Senken oder Niederungen, was in der Regel mit einer reduzierten Windexposition verbunden ist.

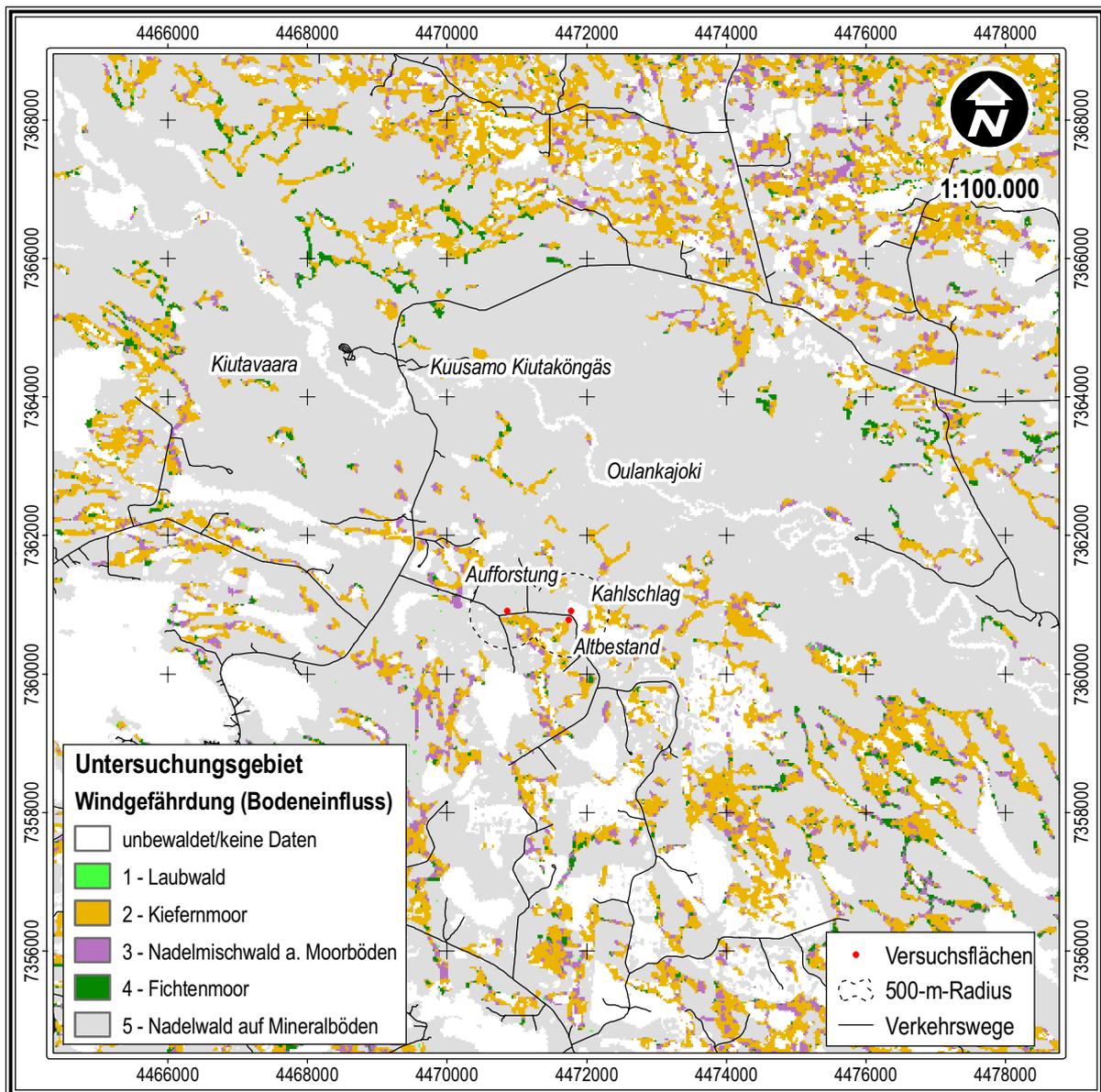


Abb. 77: Bodenabhängige Windgefährdungsklassen (aufsteigend), abgeleitet nach Ergebnissen von JALKANEN & MATTILA (2000) und PELTOLA et al. (2000)

#### 5.4.1.4 (Wald-)Vegetation

Abgesehen von den zuvor genannten Kenngrößen stellt auch die vorhandene Vegetation selbst eine Variable für das Auftreten von Windschäden dar. Das Spektrum der Vegetation als Einflussgröße ist außerordentlich vielfältig. Als primäre Kenngrößen gelten Bestandsalter, Höhe, Dichte und Artenverteilung.

Besonders in gleichaltrigen Forstbeständen wächst mit zunehmendem Alter die Windbruchgefahr durch die hohe Bestandsdichte und oft höhere Krankheitsrate (LAIHO 1987, LOHMANDER & HELLES 1987, FOSTER 1988, JALKANEN & MATTILA 2000). Demgegenüber ergeben sich in natürlichen Beständen komplexere Strukturen, die in der Regel besser an hohe Windgeschwindigkeiten angepasst sind (EVERHAM & BROKAW 1996). Auch in den Modellansätzen von GARDINER & QUINE (2000) sowie LEKES & DANDUL (2000) gilt das »Bestandsalter« als Determinante für die Baumstabilität. Ungeeignet ist die Kenngröße »Bestandsalter« jedoch als Universalvariable, da das Wachstum der Bestände regional-klimatisch stark variiert. Als Korrekturgröße schlagen GARDINER & QUINE (2000) die jährliche Wachstumsrate vor, daneben ist eine Gewichtung durch spezielle Temperatursummen möglich (JALKANEN & MATTILA 2000 nach OJANSUU & HENTTONEN 1983).

Die Bestandshöhe bestimmt in direkter Folge den Windwiderstand. Entsprechend ist die »mittlere Bestandshöhe« neben der »Fläche« eines Waldareals eine Variable zur Berechnung der Rauigkeitslänge und damit des Windwiderstands (KUTZBACH 1961, LETTAU 1969, MAZZONI 1996). Untersuchungen zu diesem Aspekt führen einheitlich zu der Schlussfolgerung, dass die Windwurfwahrscheinlichkeit mit der Bestandshöhe steigt (ROLLERSON 1981, FLEMING & CROSSFIELD 1983, LOHMANDER & HELLES 1987, MITCHELL et al. 2001). Problematisch ist hingegen die Gewichtung der Bestandshöhe, da sie in der Regel eine Autokorrelation mit den Bodeneigenschaften und dem Alter eingeht (SCOTT 2005).

Untersuchungen zum Verhältnis von Windschäden zur Bestandsdichte zeigen gegensätzliche Ergebnisse. Während FLEMING & CROSSFIELD (1983) sowie HOLMES (1985) an Waldrändern entlang von Kahlschlagkanten eine Abnahme von Schäden mit zunehmender Bestandsdichte beobachtet haben, stellten CREMER et al. (1982), TALKKARI et al. (2000) und MITCHELL et al. (2001) gegensätzliche Zusammenhänge fest. Ein Unsicherheitsfaktor besteht jedoch in den unbekanntem Windgeschwindigkeiten, die zu den Schäden geführt haben. Aus dichten Beständen ist bekannt, dass eine Schwingungsdämpfung zwischen den Bäumen und damit ein gegenseitiger Windschutz bzw. eine höhere Windfestigkeit besteht, solange es nicht zu Schäden an den Waldkanten kommt (SMITH et al. 1987, FOSTER 1988, HARRIS 1989).

Untersuchungen zur Windanfälligkeit unterschiedlicher Arten haben sich bisher auf mehr oder weniger uniforme Bestände konzentriert. Darüber hinaus wurden Zugfestigkeitsversuche mit Individuen einzelner Arten durchgeführt. Die Ergebnisse verweisen auf eine höhere Gefährdung von Koniferen im Vergleich zu Laubwaldbeständen (FOSTER 1988, JALKANEN & MATTILA 2000). Des Weiteren sind *Picea*-Bestände gefährdeter als *Pinus*-Forste, da sich *Picea abies* im Gegensatz zu *Pinus sylvestris* als Flachwurzler auszeichnet (JALKANEN & MATTILA 2000). Bestätigt werden die Ergebnisse durch die Zugfestigkeitsversuche an *Betula*-, *Pinus*- und *Picea*-individuen durch PELTOLA et al. (2000). Für den nordamerikanischen Raum wurde durch GRIZZEL & WOLFF (1998) eine artenbezogene Reihenfolge Windfestigkeit entwickelt. Mit abnehmender Stabilität wurden *Acer macrophyllum* (Oregon-Ahorn); *Thuja plicata* (Riesenlebensbaum), *Pseudotsuga menziesii* (Douglasie); *Alnus rubra* (Roterle); *Abies amabilis* (Purpurtanne) und *Tsuga canadensis* (Kanadische Hemlocktanne) aufgeführt.

Eine Reihe von Modellen verlässt die räumliche Skala der Bestandsebene und setzt Informationen zum Zustand der Baumindividuen innerhalb der Bestände voraus. Ausgangspunkt sind dabei Individueneigenschaften, welche die Aerodynamik oder die Stabilität betreffen und auf den Ergebnissen von Zugfestigkeitstests beruhen (FRASER & GARDINER 1967, BOOTH & MAYHEAD 1972, COUTTS 1986, PELTOLA et al. 2000). Die primär genutzten, individuenbasierten Variablen sind »Baumgröße«, »Verhältnis Höhe zu Durchmesser in Brusthöhe« (HDR), »Kronengröße« und »-dichte« sowie »Baumart«. Analog zu den für Bestände ermittelten Ergebnissen nimmt die Gefährdung mit der Höhe zu

(ROLLERSON 1981, HOLMES 1985, LEKES & DANDUL 2000). Das HDR stand in inverser Korrelation zur maximalen Biegefähigkeit, um Bäume zu entwurzeln oder zu brechen (PELTOLA et al. 2000). Allerdings gab es auch Untersuchungen, die keinen Zusammenhang zwischen HDR und Windfestigkeit erkennen ließen (DUNHAM & CAMERON 2000). Analysen zur Kronengröße und -dichte zeigten widersprüchliche Ergebnisse in Bezug zum Windwurfisiko (ROLLERSON 1981, VALINGER & FRIDMAN 1999). Auf die artenabhängige Gefährdung wurde bereits zuvor eingegangen.

Da eine großflächige Erhebung von Baumindividuen kaum realisierbar ist, soll an dieser Stelle nicht weiter auf Modellansätze eingegangen werden, die derartige Variablen voraussetzen. Eine Umsetzung von Belastungstests in Prognosen zu Schäden durch Windlasten an Beständen gilt darüber hinaus als problematisch, da Belastungstests in der Regel an gesunden Bäumen durchgeführt wurden (SCOTT 2005).

Ansatzpunkte und Ergebnisse der zuvor genannten Untersuchungen legen den Schluss nahe, dass Prognosen zur Windgefährdung von Beständen oder Bestandsrändern zum gegenwärtigen Zeitpunkt nicht auf der Grundlage aktuell verfügbarer Daten möglich sind. Die Fülle der notwendigen Variablen, die einleitend genannt wurden, können nur auszugsweise mit entsprechenden Daten aus der »Landnutzung und Waldinventur« hinterlegt werden. Die Ausrichtung des Datensatzes orientiert sich primär an forstwirtschaftlichen Ertragsmengen und stellt Informationen zur Artendominanz und zur Holzmenge je Fläche zur Verfügung, jedoch fehlen die in der Mehrzahl der Ansätze geforderten Variablen »Bestandshöhe« und »-alter«. Die Angabe der Holzmenge je Fläche ist darüber hinaus nur bedingt geeignet, da kein linearer Zusammenhang zur Bestandsdichte oder Struktur gegeben ist. In Plantagen kann von einem »losen« Zusammenhang zwischen Holzmenge je Fläche und zunehmender Höhe, größerer Bestandsdichte und -höhe ausgegangen werden, jedoch gilt dies nicht für naturnahe Wälder und Jungbestände, wie die Ergebnisse dieser Untersuchung gezeigt haben (vgl. Kap. 3.2.1). Beide Bestandstypen besitzen große Flächenanteile im Untersuchungsgebiet, wobei die nationale Waldinventur für Jungbestände weder eine Artenangabe noch die Holzmenge je Fläche ausweist.

#### 5.4.1.5 Bestandsmanagement und anthropogene Strukturen

Nicht zuletzt führen anthropogene Eingriffe und Nutzungsstrukturen in Beständen zu Veränderungen im Gefährdungspotenzial für Windschäden. Ein erhöhtes Risiko entsteht beispielsweise an Waldkanten am Rand frischer Kahlschläge und in ausgedünnten Bereichen (ALEXANDER 1964, NEUSTEIN 1965, LOHMANDER & HELLES 1987, GARDINER & STACEY 1995, GARDINER et al. 1997, TALKKARI et al. 2000). Betroffen ist in der Regel ein Bereich mit einer Breite von 25 bis 30 m (SCOTT 2005), wobei die Zunahme der Windwurfrate und -tiefe von der Exposition zur Windrichtung abhängt. Die Intensität des Windwurfs korreliert mit der Exposition der Waldränder im Hinblick auf die Windrichtungen bei Sturmereignissen (ROLLERSON & MCGOURLICK 2001, ROLLERSON et al. 2002). Ein von ROLLERSON & MCGOURLICK (2001) entwickelter Index gibt die Abnahme der Windwurfgefährdung von der Luvseite über die parallelen Ränder hin zur Leeseite des Bestandes wieder. Die Beobachtungen werden untermauert durch Transektmessungen der Windgeschwindigkeit in Beständen. Ausgehend von der windwärtigen Seite eines *Picea*-Bestandes ermittelte NÄGELI (1954) für die Leeseite noch Windgeschwindigkeiten von etwa 35 %. MITCHELL (o. D.) gibt für windwärtige Waldkanten eine zwei- bis dreifache Schädigungswahrscheinlichkeit als an der Leeseite an. Die Breite des windreduzierten Bereichs im Lee von Beständen entspricht ungefähr der dreifachen Bestandshöhe (FLESCH & WILSON 1998).

Ähnliche Risikopotenziale gelten auch für sog. spezielle Einschlüge, wie sie für Gräben, Straßen oder Überlandleitungen durchgeführt werden (JALKANEN & MATTILA 2000). Die dabei auftretenden Gefährdungen sind jedoch aufgrund der kleineren Flächen meist geringer. Hier ist die Größe der Öffnung mit einer Zunahme der Windlast verbunden (GARDINER et al. 1997). Eine Bestimmung der Windlast und damit der Windwurfgefährdung gilt jedoch als problematisch, da die Veränderungen von der Dichte,

der Struktur, der Ausrichtung des Waldrandes sowie von der Breite der Öffnung, dem Zeitraum seit dem Einschlag und der Form der Waldkante abhängen (GARDINER et al. 1997, NOVAK et al. 2001, RUEL et al. 2002). Nach RUEL et al. (2001) werden die genannten Effekte darüber hinaus durch das Relief überlagert, sodass dieses als bedeutender für die Ermittlung der Windwurfgefährdung anzusehen ist.

Anthropogene Nutzungsstrukturen sind in der Regel gut dokumentiert. Der forstwirtschaftlichen Ausrichtung folgend erfasst die finnische »Landnutzung und Waldinventur« Abgrenzungen von Waldarealen, deren potenzielle Ertragsraten sowie die Kahlschlagflächen. Indirekte Einflüsse anderer Nutzungen sind, wie in Kapitel 5.2.3 beschrieben, durch das nationale topographische Datenmodell Finnlands dokumentiert. Dies beinhaltet primär Nutzungsaspekte der Verkehrs- und Versorgungsinfrastruktur, aber auch forstwirtschaftliche Nutzungen wie Kahlschläge (Abb. 78).

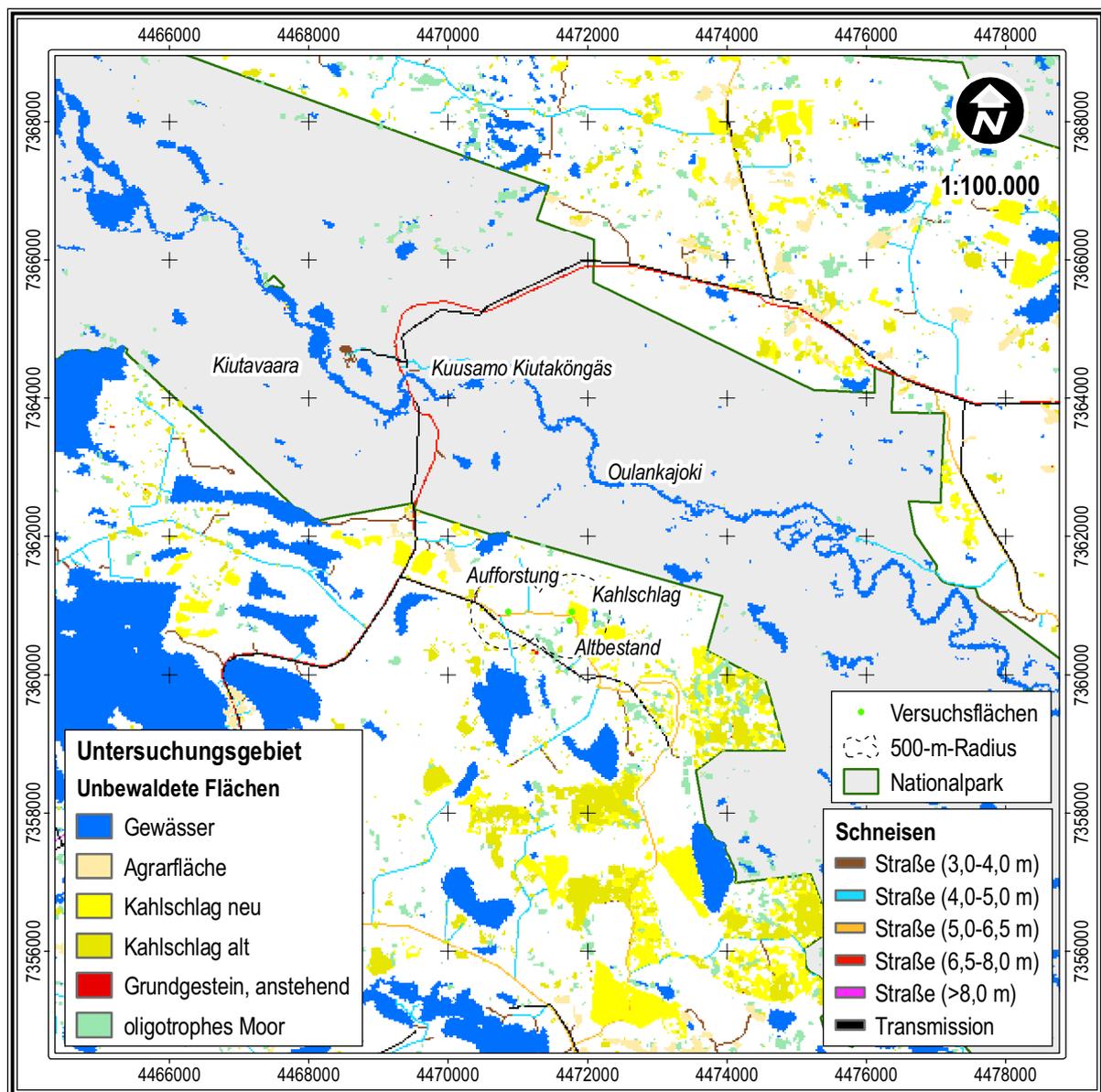


Abb. 78: Unbewaldete Flächen und Schneisen im Untersuchungsgebiet auf Grundlage der »Landnutzung und Waldinventur« Finnlands sowie des nationalen topographischen Datenmodells Finnlands (Quelldaten: NLS 1999b, 1999c)

Im vorliegenden Fall diene die zuletzt genannte Größe der Aktualisierung der Datenbestände der Waldinventurdaten, deren älterer Redaktionsstand die Versuchsfläche »Kahlschlag« noch als Waldbestand führte. Zu kleineren Strukturen wie den genannten Waldrandeigenschaften sind hingegen keine Informationen vorhanden.

Anthropogene und natürliche Flächen sind bereits Teil der »Landnutzung und Waldinventur« und konnten durch eine einfache Reklassifizierung erstellt werden. Dagegen mussten die Inhalte der Verkehrs- und Versorgungsinfrastrukturen, die Schneisen bilden, über eine Konvertierung von Raster- zu Vektordaten integriert werden. Das Ergebnis führte aufgrund der Rasterauflösung von 25 m zu einer Überbetonung, da die Verkehrswege einschließlich der Randstreifen in der Regel schmaler sind. Sofern für eine Weiterverarbeitung nötig, besteht jedoch die Möglichkeit, die Breite einer Schneise (z. B. Fahrbahnbreite) als Indexwert aus dem Vektordatensatz zu übernehmen. Abbildung 78 fasst die Ergebnisse der Konvertierung und Verschneidung in Kartenform zusammen.

Die Kartendarstellung verdeutlicht die gegensätzlichen Nutzungsstrukturen innerhalb und außerhalb der Nationalparkgrenzen. Während innerhalb des Nationalparks in einem Streifen beiderseits des Oulankajoki waldfreie Bereiche fast ausschließlich in Form oligotropher Moore und Gewässer vorliegen, befinden sich nördlich und südlich des Parks eine Vielzahl von Einschlag- und Agrarflächen. Unter den unbewaldeten Flächen im Untersuchungsgebiet nehmen Gewässer mit etwa 55 % den größten Anteil ein, gefolgt von Kahlschlagflächen (27,5 %), oligotrophen Moorbereichen (12 %) und Agrarflächen (~ 5,5 %).

#### **5.4.2 Zusammenfassung zum Anforderungskatalog von Modellen zur Windwurfgefährdung sowie Möglichkeiten ihrer Übertragbarkeit**

Analog zu den Ergebnissen der temperaturbezogenen Modellansätze verdeutlicht auch die Analyse der vorgestellten Ansätze zur Ausweisung lokaler Windverhältnisse und -gefährdungen, dass großflächige Landnutzungserhebungen zurzeit nicht in der Lage sind, den Anforderungen der Modelle vollständig gerecht zu werden. Zum Teil sind die Ursachen identisch: So ist sowohl das weitmaschige Netz an Wetterstationen im borealen Raum zu bemängeln als auch die nicht auf klimaökologische Zusammenhänge ausgerichtete Datenerhebung und -auswertung zur Landnutzung. Darüber hinaus bestehen jedoch auch ungeklärte Ursache-Wirkungsbeziehungen zwischen bestimmten Standorteigenschaften und Windgefährdungen von Beständen. Tabelle 26 fasst den Anforderungskatalog der vorgestellten Wind- und Windgefährdungsmodelle im Verhältnis zur aktuellen Datenlage am Beispiel des Untersuchungsgebiets zusammen.

Im Hinblick auf die Erfassung der Windverhältnisse gelten die gleichen Aussagen wie für die Temperaturen. Im Zuge geringer Finanzmittel ist in Zukunft kaum mit einem dichteren Stationsnetz der Wetterdienste zu rechnen. Es bleibt abzuwarten, ob numerische Modelle lokale, bodennahe Windverhältnisse ausreichend abbilden können. Möglicherweise stellen empirisch, über kürzere Zeiträume erhobene Daten als Ergänzung der Modelle einen Lösungsansatz dar. Die im Verlauf der Messkampagnen registrierten Windverhältnisse offenbarten signifikante Unterschiede zu den Daten der nächstgelegenen Wetterstation. Ohne eine derartige Erhebung muss die Datengrundlage für die meisten Modellansätze als dürftig angesehen werden. Auch die empirischen Ansätze von FRIDMAN & VALINGER (1998) oder MITCHELL et al. (2001) bzw. MITCHELL (2003) bieten nur dann eine Lösung, wenn Windwurf tatsächlich auftritt, was jedoch im Untersuchungsgebiet während der Messkampagnen nicht der Fall war.

Ein weitgehend vollständiges Bild im Anforderungskatalog der Modellansätze zur Windgefährdungsausweisung liefern die Datengrundlagen zur Topographie. Moderne Vermessungsansätze und computergestützte Geodatenverarbeitung erlauben die Ausweisung großflächiger und trotzdem hoch aufgelöster Geländeinformationen. Entsprechend weit fortgeschritten sind daraus ableitbare numerische Ansätze (RUEL et al. 2002).

Entgegen dem zuvor genannten Punkt erwiesen sich die Erkenntnisse über die Zusammenhänge zwischen den Bodeneigenschaften eines Standorts und der Windgefährdung für Bestände als widersprüchlich (vgl. Kap. 5.4.1.3). Empirische Untersuchungen zu den Einflussgrößen Bodenfeuchte und Bodensubstrat

lassen sich nicht auf andere Standorte übertragen. Problematisch erscheinen darüber hinaus Autokorrelationen bestimmter Bodenparameter wie z. B. der Nährstoffversorgung und den Bestandseigenschaften wie Höhe und Dichte. Für finnische Verhältnisse haben JALKANEN & MATTILA (2000) eine empirisch ermittelte Abstufung unterschiedlicher Gefährdungen für verschiedene Waldarten und Bodenverhältnisse veröffentlicht, die als Grundlage für das Untersuchungsgebiet geeignet ist. Zusammenfassend gilt jedoch, dass sich selbst der geringe auf Bodeneigenschaften beziehende Informationsgehalt der Landnutzungs-klassifikation nicht oder nur sehr eingeschränkt für Windgefährdungsmodelle nutzen lässt.

Tab. 26: Variablen von Modellansätzen zur Windprognose oder Windgefährdung an Standorten und Verfügbarkeit entsprechender Datengrundlagen

Klimaökologischer Parameter	Variable	Verfügbarkeit	Informations-gehalt	Quelle
Klima	Windgeschwindigkeit	punktuell	gut	Wetterdienste
	Windrichtung	punktuell	gut	Wetterdienste
	Temperatursumme	punktuell	gut	Wetterdienste
Topographie	Höhe absolut	flächendeckend	gut	DHM
	Höhe relativ	flächendeckend	gut	DHM
	Hangneigung	flächendeckend	gut	DHM
	Ortskoordinaten	flächendeckend	gut	nationale Kartographie
Bodeneigenschaften	Bodentyp, Bodenart	flächendeckend	gering	Landnutzung & Waldinventur
	Feuchteregime	flächendeckend	gering	DHM
	Nährstoffhaushalt	n. v.	n. v.	n. v.
	Bodenbearbeitung	n. v.	n. v.	n. v.
Vegetation	Bestandsalter	n. v.	n. v.	n. v.
	Bestandshöhe	n. v.	n. v.	n. v.
	Rauigkeitslänge	n. v.	n. v.	n. v.
	Bestandsdichte	flächendeckend	sehr gering	Landnutzung & Waldinventur
	Artenverteilung	flächendeckend	gering	Landnutzung & Waldinventur
	jährliches Wachstum	n. v.	n. v.	n. v.
	Stammdurchmesser	n. v.	n. v.	n. v.
	Kronenschluss	n. v.	n. v.	n. v.
	Wurzelzustand	n. v.	n. v.	n. v.
	Individuenhabitus/-zustand	n. v.	n. v.	n. v.
Waldmanagement	Bestandszustand (Ausdünnung etc.)	n. v.	n. v.	n. v.
	Waldränder	flächendeckend	gut	Landnutzung & Waldinventur
	andere anthrop. Nutzungen	flächendeckend	gut	Landnutzung & Waldinventur/ nationale Kartographie

*Abstufung Informationsgehalt: gut, gering, sehr gering, n. v. (nicht vorhanden)*

Auswahl der Variablen aus Ansätzen von HANNAH et al. (1995), GARDINER et al. (1997), SUÁREZ-MINGUEZ et al. (1999), GARDINER & QUINE (2000), JALKANEN & MATTILA (2000), LEKES & DANDUL (2000), TALKKARI et al. (2000), MITCHELL et al. (2001), ROLLERSON et al. (2002), RUEL et al. (2002), LANQUAYE (2003), MITCHELL & LANQUAYE-OPOKU (2004) und SCOTT (2005)

Im Fall der (Wald-)Vegetation ist die Diskrepanz zwischen erhobenen Daten und den Anforderungen vieler Modellansätze besonders groß. Obwohl mit dem Datensatz der finnischen »Landnutzung und Waldinventur« ein Informationsgehalt zur Verfügung steht, wie er zuvor nur für kleinere Areale erhoben wurde, reicht die Detailfülle für viele Modellansätze nicht aus. Trotz der forstwirtschaftlichen Ausrichtung der Datenerhebung in Finnland muss die Eignung der Daten im Hinblick auf Windgefährdungsmodelle als gering angesehen werden (Tab. 26). Als einzige direkte Variable ist die »Bestandsart« bzw. »-dominanz« in der Landnutzung enthalten. Die darüber hinaus erhältlichen Angaben zur Holzmenge je Fläche lassen zwar Rückschlüsse auf die Struktur der Bestände zu, eine Systematisierung ist jedoch kaum möglich. Neben Daten zur Bestandsdichte und zur Wachstumsrate fehlt besonders die Information der Bestandshöhe, die sich auch für größere Flächen einfach in das TOPEX-Modell integrieren ließen (RUEL

et al. 2002). Als überaus problematisch erwiesen sich individuenbasierte Variablen wie »Wurzelzustand« oder »Stammdurchmesser«, die sich auch auf längere Sicht kaum für große Flächen erheben lassen.

Vor dem Hintergrund einer langen kartographischen Geschichte können anthropogene Strukturen als gut dokumentiert angesehen werden. Entsprechend aktuell ist der Redaktionsstand und die Datenqualität der Verkehrs- und Versorgungsinfrastruktur. Über den vielfach genannten Datensatz der »Landnutzung und Waldinventur« werden darüber hinaus Waldareale untereinander abgegrenzt und Kahlschläge ausgewiesen. Es fehlen jedoch Variablen zum Zustand der Bestände wie beispielsweise »Ausdünnungseinschläge«.

## 5.5 Entwicklungschancen

Die Schlussfolgerung, dass ein universeller Einsatz von Modellansätzen zur Ausweisung von Frost- und Windgefährdungen zurzeit nur mit einer zusätzlichen Erhebung von klimatologischen und raumbezogenen Daten möglich ist, hinterlässt fast zwangsläufig die Frage nach den Ursachen, möglichen Alternativen bzw. einem Ausblick.

Die im Rahmen der Analysen ermittelten Diskrepanzen zwischen Modellanforderungen und Datenverfügbarkeit basieren auf fehlenden Informationen, der Struktur einzelner Modellansätze und dem aktuellen Kenntnisstand:

- *Die Wirkungszusammenhänge zwischen den Standorteigenschaften (z. B. Boden, Vegetation oder Bestandsmanagement) und den Windverhältnissen oder der Windgefährdung sind ungeklärt oder widersprüchlich.*
- *Ein Teil der Modelle erfordert Daten auf der Ebene von Baumindividuen.*
- *Es fehlen räumliche oder klimatologische Daten oder sie sind nicht in Form von Datensätzen ausgewiesen.*

Variablen der ersten Kategorie wie der Zusammenhang zwischen der Windstabilität eines Bestands und bestimmten Bodenverhältnissen sind in ihrer Wirkung zurzeit unzureichend untersucht. Hier besteht ein entsprechender Forschungsbedarf. Langfristig sollten die Erkenntnisse jedoch in Modelle einfließen, da ein Einfluss nachweislich besteht und die Bodenverhältnisse im Rahmen der finnischen Waldinventur erhoben werden (KUUSELA & SALMINEN 1969).

Variablen der zweiten Kategorie, als Beispiele seien Variablen wie die »Wurzel-« und »Stammgesundheit« oder der »Stammdurchmesser« und »-habitus« genannt, stellen für großflächige Datenerhebungen auch langfristig ein kaum lösbares Problem dar. Im Fall der finnischen »Landnutzung und Waldinventur« wird ein Teil der Parameter auf den Trainingsflächen erhoben (KUUSELA & SALMINEN 1969), jedoch fehlen geeignete Verfahren, sie beispielsweise fernerkundlich zu erheben und zu extrapolieren.

Die dritte Kategorie beinhaltet schließlich Variablen, für die aus unterschiedlichen Anlässen keine Daten erhoben werden. Als Gründe seien eine fehlende Nachfrage, eine grundsätzlich andere Fragestellung hinsichtlich des Einsatzes der Daten oder eine zu teure oder zu aufwendige Erhebung genannt. Sofern klimaökologische Modelle ihre Prognosefähigkeit unter Beweis stellen und so eine kommerzielle oder administrative Nachfrage besteht, ist davon auszugehen, dass entsprechende Datenangebote folgen, zumal einige der benötigten Daten bereits erhoben werden. Am Beispiel der »Landnutzung und Waldinventur« Finnlands wäre eine Ausweisung klimaökologischer Aspekte realisierbar. Als komplexeres Problem erscheint hingegen die bisher zu teure oder zu aufwendige Datenerhebung. Es existieren jedoch neue, hoffnungsvolle Entwicklungsansätze und alternative Methoden zur Datenaquisition, welche die Probleme in Zukunft lösen könnten.

Ein weites Spektrum an Möglichkeiten zur Erhebung von Klimadaten bieten möglicherweise fernerkundungsgestützte Systeme. Besonders die Datengrundlagen für Modelle zur Temperaturverteilung und Frostgefährdung ließen sich durch eine Ergänzung des weitmaschigen Wetterstationsnetzes verbessern. So veröffentlichten GILLESPIE et al. (1999) einen Entwurf zur Nutzung des satellitengestützten Scanners ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) zur Abschätzung von Oberflächentemperaturen. Ebenfalls vielversprechend ist die Nutzung des Thermalkanals 6 der Satelliten der »Landsat TM«-Serie zur Ausweisung der aktuellen langwelligen Ausstrahlung (METZLER & MALILA 1985, BENDIX 2004). Auf der Grundlage von Wetter- und Höhendaten sowie der satellitengestützten Aufnahme des Blattflächenindex (LAI) basiert ein Modell von KANG et al. (2000) zur Vorhersage der räumlichen Verteilung der Bodentemperatur in einer bewaldeten Landschaft in Korea. Optimierungen zur Erhebung des Blattflächenindex für boreale Räume wurden darüber hinaus von BOYD et al. (2000) oder BROWN et al. (2000) vorgestellt. Ein als Zwei-Ebenen-Modell bezeichneter fernerkundungsgestützter Ansatz von FRIEDL (2002) berücksichtigt die Mikroklimatologie sowie die thermalen Eigenschaften bewaldeter und unbewaldeter Geländeoberflächen.

Fernerkundungsdaten spielen auch eine zentrale Rolle in der Erweiterung der finnischen »Landnutzung und Waldinventur«. Inventurdaten, die in klimaökologischen Modellen eine Rolle spielen, wie die Bestandshöhe und -dichte oder auch Angaben zum Kronenraum, werden im Rahmen der Waldinventur zwar erhoben und weiterverarbeitet, aber nicht als eigenständige Informationsebenen ausgewiesen. Im Gegensatz zu Datengrundlagen für die Variablen der zweiten Kategorie besteht jedoch die Möglichkeit einer Datenerhebung über Fernerkundungsverfahren, die sich über Trainingsflächen korrigieren lässt (TOMPPU 1996, BOLDUC et al. 1999). Über moderne Entwicklungen wie dem Einsatz fluggestützter Hyperspektralscanner ist zudem eine weitere Verbesserung der Datenqualität zu erwarten (TOMPPU & HEIKKINEN 1999, HOLSTEN 2005). Im Zuge einer größeren Nachfrage nach o. g. Daten bestünde mittelfristig die gute Chance, derartige Variablen in die »Landnutzung und Waldinventur« oder vergleichbare Datenbestände aufzunehmen.

Die genannten Entwicklungen zeigen schlüssige Wege auf, Temperaturverteilungen, Frostgefährdungen, Windexpositionen oder Windwurfgefährdungen für einzelne Standorte oder flächenhaft auf der Grundlage allgemein verfügbarer Daten auszuweisen. Als Beispiel für eine derartige Anwendung sei der Ansatz des topographischen Windexpositionsindex (TOPEX) genannt (RUEL et al. 2002). Mit Hilfe der mittleren Bestandshöhen vorhandener Waldbestände wäre die Erstellung eines Expositionsindex für die zugehörigen Waldränder möglich. Abbildung 79 demonstriert am Beispiel des Untersuchungsgebiets die windwirksamen Waldrandexpositionen der Bestände als kartographische Darstellung.

Die Windexposition wurde auf der Grundlage von Messwerten zur Windgeschwindigkeit und -richtung des nationalen topographischen Datenmodells, der »Landnutzung und Waldinventur« Finnlands sowie des digitalen Höhenmodells erstellt. Ausgangspunkt waren die in Kapitel 5.4.1.1 beschriebenen Expositionsrichtungen der höchsten Windgeschwindigkeiten im Verlauf der beiden Messkampagnen, eine Extraktion der unbewaldeten Flächen und Schneisen auf der Grundlage der nationalen Kartographie sowie die Ausweisung entsprechender Waldränder. Unter der Berücksichtigung der Tatsache, dass die Bestandshöhen nicht ausgewiesen sind, wurden Pseudowerte verwendet, die auf der mittleren Bestandshöhe der Versuchsflächen basieren. Sämtliche Jungbestände wurden pauschal mit einer Höhe von fünf Metern angegeben, während ausgewachsenen Beständen eine abgestufte Höhe über die in der Waldinventur festgelegte Holzmenge zugeordnet wurde. Dabei galt die Maßgabe einer Zunahme der Bestandshöhe in Abhängigkeit von der Zuordnung zur Nutzholzmenge des Bestands (vgl. Tab. 34). Ausgehend von der Versuchsfläche Altbestand mit einer mittleren Höhe von etwa sieben Metern wurde die Höhe mit jeder Klassengrenze um zwei Meter heraufgesetzt. Die Vorgehensweise ist natürlich nicht geeignet, die realen Verhältnisse exakt wiederzugeben. Sie erzeugt jedoch räumlich strukturierte Bestandsverhältnisse, wie

sie typisch für den Untersuchungsraum sind. Abschließend erfolgte eine Addition der Bestandshöhen zum DHM und die Berechnung des TOPEX (MITCHELL et al. 2005).

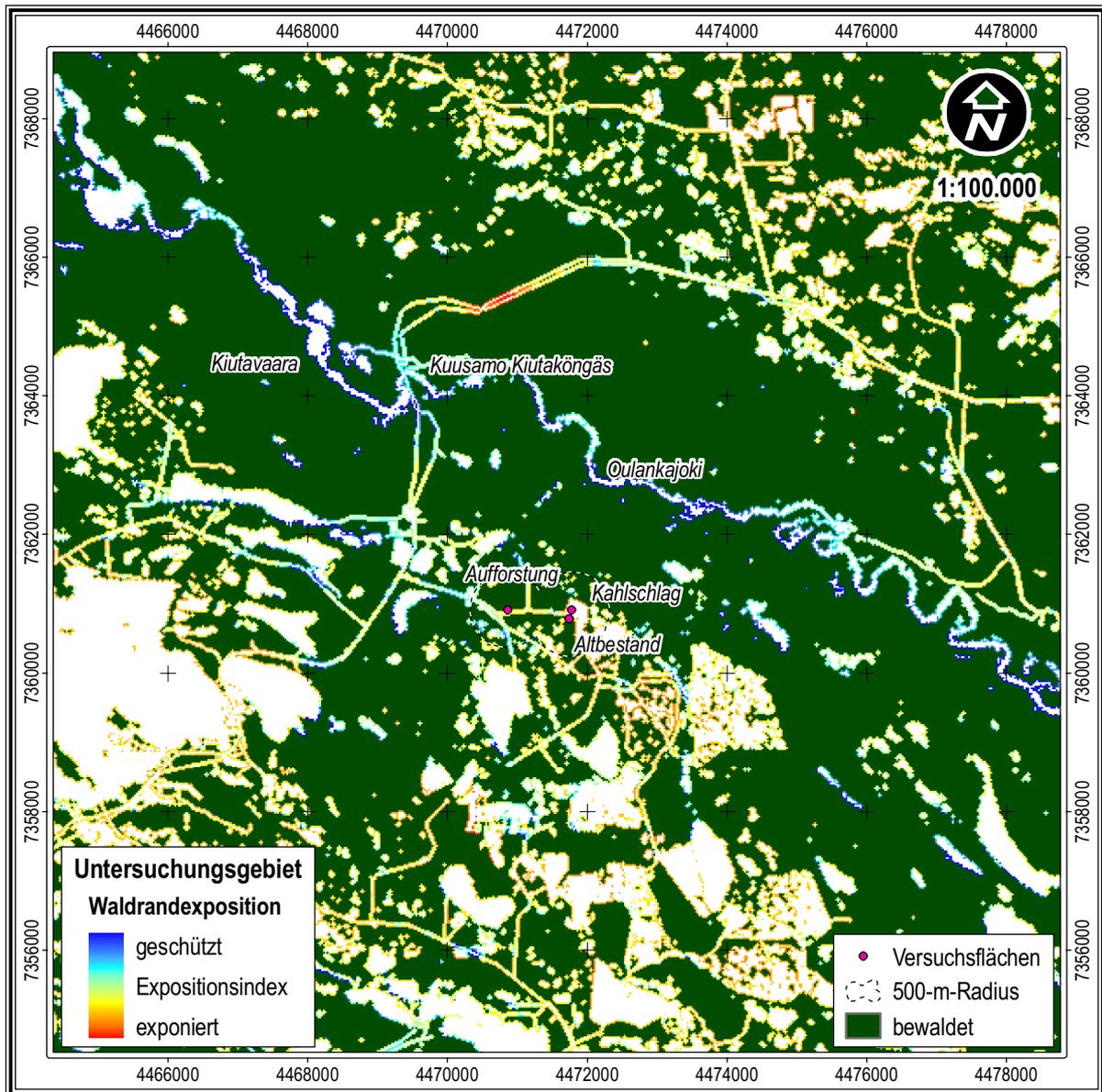


Abb. 79: Windexpositionsindex für die Waldränder im Untersuchungsgebiet am Oulankajoki

Entsprechend der Ausweisung von Windexpositionen zeigt die Karte eine Reihe von Analogien zur Darstellung der ausschließlich DHM-bezogenen TOPEX-Ausweisung (vgl. Kap. 5.4.1.2). Erkennbar ist die durchgängig geringe Expositionsrate von Waldrändern in der Tallage im Gegensatz zum Hochland. Vor dem Hintergrund einer hohen Gewichtung von Südwestwinden zeigen sich vor allem Waldrandbereiche am Nordrand der Tallage und im Umfeld größerer Kahlschlagflächen als besonders exponiert. Die Gewichtung lässt darüber hinaus erkennen, dass nordöstlich von Freiflächen gelegene Waldränder jeweils höhere Expositionsindizes aufweisen als die gegenüberliegenden oder parallelen Ränder. Ausnahmen ergeben sich bei Freiflächen, deren nordöstliche Ränder reliefbedingt im Windschatten liegen.

Die Darstellung von Abbildung 79 zeigt lediglich eine mögliche Anwendung der vorgestellten Modellansätze, sofern Daten für entsprechende Variablen großflächig zur Verfügung stehen würden. Eine Weiterentwicklung der finnischen »Landnutzung und Waldinventur« über die Holzmengenerfassung hinaus würde einem breiten Spektrum klimaökologischer Anwendungen und besonders der Erfassung von Gefährdungspotenzialen den Weg bereiten.

---

## 6 Zusammenfassung

Die borealen Nadelwälder unterliegen trotz ihrer peripheren Lage in vielen Regionen einer intensiven forstwirtschaftlichen Nutzung. Die Grundlage für Einschlagstätigkeiten bildet der Bedarf an Nutzholz für die Versorgung der industriellen Produktion von Papier, Verpackungen und Baumaterial. Mit der wirtschaftlichen Entwicklung der fernöstlichen Schwellenländer China und Südkorea ist der Bedarf seit Ende der neunziger Jahre erheblich gestiegen, was den Nutzungsdruck in der Borealis deutlich erhöht hat. Prognosen von Consultingunternehmen und der United Nations Economic Commission for Europe (UNECE) gehen darüber hinaus auch längerfristig von einem weiter steigenden Holzbedarf aus. Obwohl sich die Art der forstwirtschaftlichen Nutzung regional unterscheidet, lassen sich sämtliche Formen als industrieller Holzabbau bezeichnen, die einen erheblichen Eingriff in das Ökosystem der Borealis darstellen. Aufgrund ihrer Bedeutung sind die klimaökologischen Folgen dieser Eingriffe in den letzten Jahren Schwerpunkte einer Reihe von Modellansätzen geworden. In den Ansätzen wird versucht, potenzielle Gefährdungen nach Einschlägen oder Folgen bestehender Eingriffe zu prognostizieren oder räumlich zu extrapolieren. Ein verbreitetes Problem ist dabei eine meist eigenständig erhobene Datenbasis, die eine räumliche Übertragbarkeit der Ansätze erschwert oder verhindert.

Vor diesem Hintergrund erwachsen zwei primäre Fragestellungen zur geländeklimatologischen Relevanz von Abholzungen in borealen Wäldern:

- Zum einen versteht sich die vorliegende Arbeit als Bestandsaufnahme der geländeklimatologischen Veränderungen, die im Verlauf einer anthropogen überprägten Waldsukzession entstehen,
- zum anderen wurde die Eignung von Modellen zur Ausweisung abiotischer Gefährdungen im Hinblick auf ihre Übertragbarkeit und damit ihren universellen Einsatz untersucht.

Im Rahmen der ersten Fragestellung wurden drei Versuchsflächen untersucht, die anthropogen überprägte Waldsukzessionsstadien darstellen, wie sie typisch für die europäische Plantagenwirtschaft mit zyklischem Einschlag, folgender Bodenmelioration und Aufforstung sind. Die Erfassung geländeklimatologischer Veränderungen erfolgte im Einzugsgebiet des Oulankajoki im Nordosten Finnlands in den Vegetationsperioden der Jahre 1999 und 2000. Die nahe zueinander gelegenen Flächen repräsentierten einen im Untersuchungsraum verbreiteten *Empetrum-Myrtillus*-Altbestand, eine Kahlschlagfläche und eine *Pinus*-Aufforstung. Die Standorte wurden hinsichtlich ihres Strahlungs-, Temperatur-, Wind- und Wasserhaushalts untersucht und in den Kontext früherer Untersuchungen aus dem borealen Raum eingeordnet. Darüber hinaus erfolgte ein Vergleich mit den Daten der zwei nächstgelegenen Stationen des finnischen Wetterdienstes.

Der Vergleich aktueller Messwerte der zuletzt genannten Datenquellen mit den langjährigen Bezugszeiträumen verwies auf repräsentative Bedingungen während der beiden Messkampagnen. Die auf den Versuchsflächen gemessenen Werte waren somit auf Standorte vergleichbarer Sukzessionsstadien übertragbar. Vor dem Hintergrund, dass die Auswahl der Flächen unter dem Gesichtspunkt möglichst ähnlicher orographischer Aspekte wie Höhenlage, Hangneigung und Exposition erfolgte, erwies sich der Vegetationszustand als Haupteinflussgröße für geländeklimatologische Differenzen.

Die Auswertung der Messkampagnen ließ komplexe geländeklimatologische Unterschiede zwischen den Versuchsflächen erkennen. Sie verdeutlichte damit die bedeutenden Änderungen im Wandel von einem lockeren, aber vielschichtigen Altbestand zu einem Kahlschlag und weiter zu einer dichten, uniformen Aufforstung. Besonders der Wechsel vom Altbestand zum Kahlschlag ist durch geländeklimatologische Veränderungen geprägt, die mit einer Reihe von Gefährdungen in Verbindung gebracht werden. Die Ergebnisse bestätigen weitgehend frühere Einzeluntersuchungen und somit die Gefährdungspotenziale wie

bodennahe Fröste auf Kahlschlägen während des Auftretens von Strahlungswetterlagen oder der Windwurfgefährdung an den Rändern von Einschlagflächen. Weniger bedeutend, jedoch erwähnenswert ist darüber hinaus die Gefahr von fluvialer und äolischer Erosion auf bearbeiteten Kahlschlagflächen. Eine Analyse der aufgetretenen Strahlungs- und Frostwetterlagen verdeutlichte des Weiteren ein Frostrisiko für Aufforstungen. Trotz hoher Bestandsdichte unterlag der Aufforstungsbestand einer verhältnismäßig hohen Ausstrahlung, die im Zusammenhang mit einer effektiven Windbremsung zur Ansammlung von Kaltluft und damit zu Frostwerten in der Luft und in Bodennähe führte.

Ausgehend von der Kahlschlagfläche offenbarten sich je nach Parameter bedeutende Abweichungen in den Extremwerten im Vergleich zu den Daten der beiden nächstgelegenen Stationen des FMI. Primäre Einflussfaktoren waren die umgebende Orographie der - im Vergleich zu den Versuchsflächen - deutlich tiefer gelegenen Station Kiutaköngäs und die Distanz zur Station des Flughafens Kuusamo. Die Differenzen zwischen den Standorten verdeutlichten im Vorgriff auf den zweiten Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit die Problematik der Übertragbarkeit von geländeklimatologischen Daten auf andere Standorte.

Im Rahmen der zweiten Fragestellung wurden Modelle zur Ausweisung abiotischer Gefährdungen im Hinblick auf ihre Übertragbarkeit auf andere Räume evaluiert. Viele Modelle unterliegen hinsichtlich ihrer universellen Anwendung der bedeutenden Einschränkung, dass sie auf lokal erhobenen Daten beruhen, die an anderen Standorten nicht zur Verfügung stehen. In diesem Zusammenhang wurden 18 Ansätze zur räumlichen Temperatur- oder Frostverteilung und zur Windgefährdung hinsichtlich ihrer Anforderungen an klimatologische und räumliche Daten untersucht. Am Beispiel des Untersuchungsgebiets Oulanka galt es, die Anforderungen der Modelle mit Hilfe öffentlich oder kommerziell verfügbarer Daten abzubilden. Als Quellen dienten die Datengrundlagen der Katasterverwaltung Finnlands, des landesweiten digitalen Höhenmodells und der finnischen Landnutzung und Waldinventur.

Mittels der zuvor genannten Quellen war es möglich, wesentliche Anforderungen der Modellansätze zu erfüllen, jedoch standen nicht für sämtliche Variablen geeignete Daten zur Verfügung. Im Hinblick auf Ansätze zur Temperaturverteilung oder Frostgefährdung erwiesen sich orographie- oder bodenbezogene Daten als weitgehend vollständig. Als problematisch erwiesen sich hingegen vegetationsbezogene und meteorologische Variablen. Im Fall der Modelle zur Windgefährdung fehlten darüber hinaus Daten zum Management der anthropogenen Flächennutzung. Die Ursachen für die Diskrepanzen zwischen Modellanforderungen und Datengrundlagen bestanden in fehlenden Daten, ungeklärten Ursache-Wirkungsbeziehungen (Windmodelle) oder Ansätzen, die Daten von Baumindividuen voraussetzen.

Im Ausblick auf die weitere Entwicklung klimaökologischer Modellansätze und die Erhebung von Datengrundlagen standen fernerkundungsgestützte Verfahren im Fokus. Datengrundlagen wie die finnische »Landnutzung und Waldinventur« bieten bereits eine solide Basis für die Extrapolation von Daten mit klimaökologischen Schwerpunkten. Ansätze zur satellitengestützten Erhebung von Temperatur- oder Frostverteilungen sind in der Entwicklung und erlauben möglicherweise zukünftig die Erhebung flächendeckender Daten zur Unterstützung lokaler Messungen oder dem Ersatz lokaler Klimastationen. Weiterführende Techniken wie fluggestützte Hyperspektralscanner sollten darüber hinaus eine Verbesserung der Genauigkeit von Landnutzungs- und Waldinventurdaten ermöglichen.

---

## 7 Abstract

Boreal forests are a subject of intensive silvicultural use, even if their geographical location seems to be peripheral. Man-made influences like clear-cutting are based on the demands of the worldwide industrial production of paper, packings and building materials. The economic development of the far eastern Newly Industrializing Countries (NICs) like China or South Korea has considerably increased the anthropogenic pressure on boreal forests since the end of the last century. Furthermore the forecasts of consulting firms and the United Nations Economic Commission for Europe (UNECE) have predicted an increasing demand of wood-products in the future. Today, all kinds of silvicultural use must be described as an industrial wood production joined with a considerable impact to the boreal ecosystem. Due to the significance of the ecological consequences of these interventions, a number of explanatory models were published to predict the main hazards. Most models try to predict silvicultural hazards by extrapolating spatial data or attempt to forecast future interventions. Common problems in this context are often independently collected databases which aggravates or prevents a spatial transferability to other areas.

Two primary questions were caused to the local climate relevance of clear-cuts in boreal forests:

- On the one hand, this thesis can be considered as an inventory of local climatological changes due to silvicultural impacts in boreal forests,
- on the other hand the spatial transferability of abiotic hazard models were examined.

As a part of the first question, climatological measurements have been carried out on three test areas which represent typical stages of silvicultural controlled forests in the boreal part of Europe. The European silvicultural system is mostly characterized by a cycle of clear-cutting, a following floor melioration and reforestation. The areas represent stages like an *Empetrum-Myrtillus* old growth stock, a deforestation area and a *Pinus* reforestation. The recordings were carried out in the catchment area of the Oulankajoki in the northeast of Finland during the vegetation periods of 1999 and 2000. To avoid terrain affected climatological influences, the areas are nearby to each other. The recordings included measurements of radiation, temperature, wind and water balance and put in order into the context of earlier examinations. Furthermore a comparison with weather data of two nearby meteorological stations of the Finnish Meteorological Service (FMI) was carried out.

Comparisons of current measurements of the last mentioned data sources with long-time data periods referred representative conditions during the two vegetation periods. This indicates that the conditions on the test areas are transferable to comparable silvicultural stages. As mentioned before, the sample plot areas were chosen by most similar orographical attributes like altitude, slope and aspect, the vegetation cover proved to be the main factor for climatological differences between the plots.

The analysis of the measurements showed complex climatological differences between the test areas. Significant local climatological changes accrue during the change from a loose, but multi-layered old growth forest to a deforestation and later on to a uniform afforestation. Particularly the replacement of an old growth forest by a clear-cut is marked by climatological changes which implicates a number of hazards. The results confirm in a large extent earlier examinations and particularly potential hazard risks like near ground frosts on clear-cut areas during the appearance of calm and clear nights as well as windthrow on clear-cut edges. Hazards like fluvial erosion and aeolian erosion on clear-cut areas are less significant, however, it is worth mentioning it furthermore. The analysis of clear and calm nights as well as frost situations pointed up a frost risk for afforestations. Despite a dense stand density, a high nocturnal net radiation was recorded which causes in connection with an effective wind shelter the collection of cold air. Accordingly frost values have been recorded at a height of two meters and at the near ground level.

In comparison between the clear-cut area and the FMI meteorological stations, significant deviations in the extreme values are recorded. The primary influence factors have been »surrounding topography« and »distance«. Whereas the Kiutaköngäs meteorological station is located considerably deep in the Oulanka valley, the distance to the Kuusamo airport meteorological station is about 40 km. The differences between the locations clarified the difficulties of the transferability of local climatological data which is part of the second main emphasis of this thesis.

The core of the second question was the evaluation of abiotic risk models with regard to their transferability to different areas. The use of many models is limited because their database is explored manually at one area and so it is not available at other locations. Against the background of this problem, 18 approaches modelling spatial temperatures or frost distributions and wind hazard models were examined with regard to their requirements on climatological data and spatial information. The transferability of the models were examined in the Oulanka region with the help of publicly or commercially available data. The data was provided by the National Land Survey of Finland (NLS) and is based on the national topographic database, the nation-wide elevation dataset (digital elevation model) and the multi-source land cover and forest classification.

By means of the sources mentioned before, it was possible to fulfil essential requirements of the model approaches, however not all data were available. With regard to temperature distribution models or frost hazard attempts, orographical and soil related data proved to be largely complete. Vegetation-related and meteorological variables turned out to be problematic, however. In the case of wind hazard models, furthermore data were missing to the management of forests. The reasons for the discrepancies between model requirements and data bases consisted in missing data, unsolved relations between variables and windthrow or approaches base upon individual trees.

Remote sensing supported methods were in the view of the further development of local climate models and the investigation of data. Data bases like the multi-source land cover and forest classification already offer a unique base for extrapolation of data with climate or ecological main emphases. Attempts using satellite remote sensing data to examine temperature distributions or spatial frost variations are in the development. This may allow area-wide data collection in the future to reduce time and effort or support the substitution of local meteorological stations. Furthermore continuative technologies like airborne hyperspectral imaging should allow a precision improvement of the multi-source land cover and forest classification.

---

## 8 Literaturverzeichnis

### 8.1 Literatur allgemein

- AARIO, L. (1966): *Suomen maantiede*. - Helsinki, 301 S.
- AARIO, R. & FORSSSTRÖM, L. (1979): *Glacial stratigraphy of Koillismaa and North Kainuu, Finland*. - *Fennia* 157 (2), S. 1-49.
- AARIO, R., FORSSSTRÖM, L. & LAHERMO, P. (1974): *Glacial landforms with special reference to drumlins and fluting in Koillismaa, Finland*. - *Geological Survey of Finland, Bulletin* 273, S. 1-30.
- ADRIAN, G. (1994): *Zur Dynamik des Windfeldes über orographisch gegliedertem Gelände*. - *Berichte des Deutschen Wetterdienstes* 188, Offenbach am Main, 142 S.
- AHTI, T., HÄMET-AHTI, L. & JALAS, J. (1968): *Vegetation zones and their sections in northwestern Europe*. - *Annales Botanici Fennici* 5, S. 169-211.
- ALEXANDER, J., SCHMIDT, R.-G. & STEINRÜCKE, J. (1999): *Geländeklima*. - In: ZEPP, H. & MÜLLER, M. J. (Hrsg.): *Landschaftsökologische Erfassungsstandards - Ein Methodenbuch*. - *Forschungen zur deutschen Landeskunde* 244, Flensburg, S.169-210.
- ALEXANDER, R. (1964): *Minimizing windfall around clear cuttings in spruce-fir forests*. - *Forest Science* 10, S. 130-142.
- ALEXANDER, R. R. (1987): *Ecology, silviculture and management of Engelmann spruce and subalpine fir type in central and southern Rocky Mountains*. - *USDA Forest Service Agriculture handbook* No. 659, 144 S.
- ANDERSON, M. C. (1966): *Stand structure and light penetration. II. A theoretical analysis*. - *Journal of Applied Ecology* 3, S. 41-54.
- ANDERSON, M. C. (1970): *Interpreting the fraction of solar radiation available in forest*. - *Agricultural Meteorology* 7, S. 19-28.
- ANDERSSON, B. (1968): *Om temperaturförhållandena på kala hedar samt tall- och gran plantors känslighet för frost under vegetationsperioden (schwed.)*. - *Sveriges Skogsvårdsförbunds Tidskrift* 68 (2), S. 109-157.
- ASAHINA, E. (1956): *The freezing process of plant cell*. - *Contributions from the Institute of Low Temperature Science* No. 10, Hokkaido University, Sapporo, Japan, S. 83-126.
- AUMANN, G. (1994): *Aufbau qualitativ hochwertiger digitaler Geländemodelle aus Höhenlinien*. - *PhD thesis, Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, 411, 97 S.*
- AVISSAR, R. & MAHRER, Y. (1988): *Mapping Frost-Sensitive Areas with a Three-Dimensional Local-Scale Numerical Model. Part I: Physical and Numerical Aspects. Part II: Comparison with Observations*. - *Journal of Applied Meteorology* 27, S. 400-426.
- BARNER, J. (1961): *Die Wechselwirkungen von Wald und Wasser - im Lichte amerikanischer Forschungen*. - *Mitteilungen des Arbeitskreises "Wald und Wasser"* 4, Koblenz, 64 S.
- BAUER, J., ROHDENBURG, H. & BORK, R. (1985): *Ein digitales Reliefmodell als Voraussetzung für ein deterministisches Gebietsmodell der Wasser- und Stoffflüsse*. - *Landschaftsgenese und Landschaftsökologie*, H. 10, Braunschweig, S.1-16.
- BAUMGARTNER, A. (1952): *Die Strahlungsbilanz in einer Fichtendickung*. - *Forstwissenschaftliches Centralblatt* 71, S. 337-349.

- BAUMGARTNER, A. (1967): *Ermittlung der tatsächlichen Verdunstung aus Messungen des vertikalen Wasserdampfaustausches und der Energiebilanz.* - In: *Deutsche Gewässerkundliche Tagung Regensburg 1966, Deutsche Gewässerkundliche Mitteilungen: Sonderheft 1967, Koblenz.*
- BAUMGARTNER, A. (1979): *Verdunstung im Walde.* - *Wald und Wasser 41, Schriftenreihe d. Dt. Verbandes für Wasserwirtschaft und Kulturbau, Hamburg, Berlin, S. 39-53.*
- BELL, P. D., QUINE, C. P. & WRIGHT, J. A. (1995): *The use of digital terrain models to calculate the windiness scores for the windthrow hazard classification.* - *Scottish Forestry 49, S. 217-225.*
- BENDIX, J. (2004): *Geländeklimatologie.* - *Borntraeger, Berlin (u. a.), 282 S.*
- BERGMAN, F. (1968): *The sensitivity to frost for pine and spruce saplings during the vegetative period.* - *Swedish Forestry Society Publication 2, S. 128-157.*
- BEUKER, E., VALTONEN, E. & REPO, T. (1998): *Seasonal variation in the frost hardiness of Scots pine and Norway spruce in old provenience experiments in Finland.* - *Forest Ecology and Management 107, S. 87-98.*
- BEVEN, K. (1995): *Linking parameters across scales: subgrid parameterizations and scale dependent hydrological models.* - *Hydrological Processes 9, S. 507-525.*
- BEVEN, K. & MOORE, I. D. (1993): *Terrain analysis and distributed modelling in hydrology.* - *Wiley, New York, 249 S.*
- BINDER, W. D. & FIELDER, P. (1996a): *Seasonal changes in chlorophyll fluorescence of white spruce seedlings from different latitudes in relation to gas exchange and winter storability.* - *New Forests 11, S. 207-232.*
- BINDER, W. D. & FIELDER, P. (1996b): *Chlorophyll fluorescence as an indicator of frost hardiness in white spruce seedlings from different latitudes.* - *New Forests 11, S. 233-253.*
- BJOR, K. (1971): *Forstmeteorologiske, jordbunnsklimatiske og spireøkologiske undersøkelser.* - *Meddelelser fra det Norske Skogforsøksvesen 28, S. 429-526.*
- BLENNOW, K. (1998): *Modelling minimum air temperature in partially and clear felled forests.* - *Agricultural and Forest Meteorology 91, S. 223-235.*
- BLENNOW, K. & LINDKVIST, L. (2000): *Models of low temperature and high irradiance and their application to explaining the risk of seedling mortality.* - *Forest Ecology and Management 135 (1-3), S. 289-301.*
- BLENNOW, K. & PERSSON, P. (1998): *Modelling local-scale Frost Variations using mobile Temperature Measurements with a GIS.* - *Agricultural and Forest Meteorology 89, S. 59-71.*
- BLÜTHGEN, J. & WEISCHET, W. (1980): *Allgemeine Klimageographie.* - *Berlin, New York, 887 S.*
- BOLDUC, P., LOWELL, K. & EDWARDS, G. (1999): *Automated Estimation of Localized Forest Volume from Large-scale Aerial Photographs and Ancillary Cartographic Information in a Boreal Forest.* - *International Journal of Remote Sensing, 20 (18), S. 3611-3624.*
- BOOTH, T. C. (1977): *Windthrow Hazard Classification.* - *Forestry Commission Research Information Note 22/77/SILN, Forestry Commission, Edinburgh, 2 S.*
- BOOTH, T. C. & MAYHEAD, G. J. (1972): *Tree pulling.* - *Forestry Commission Report on Forest Research, S. 65-66.*
- BOOTSMA, A. (1976): *Estimating minimum temperature and climatological freeze risk in hilly terrain.* - *Agricultural Meteorology, 16, S. 425-443.*

- BOROWY, C. (2005a): *GrenzWerte - GrenzRäume: Entwicklung eines dreidimensionalen stadt- und landschaftsökologischen Modells der Region Jakutsk, Ost-Sibirien, als Grundlage einer nachhaltigen Raumplanung und -entwicklung in einem hochkontinental borealen, permafrostbeeinflussten, urbanen und ländlichen Milieu* Vortrag, 55. Geographentag, Trier; Fachsitzung 32.
- BOROWY, C (2005b): *Urban settlement structures in Yakutsk and their possible influences on thawing depths of the active layer. First results from urban ecology studies in the capital of the Republic Sakha (Yakutia).* - Poster, 2nd European Conference on Permafrost, Potsdam (EUCOP).
- BOYD, D. S., WICKS, T. E. & CURRAN, P. J. (2000): *Use of middle infrared radiation to estimate the leaf area index of a boreal forest.* - *Tree Physiology* 20, S. 755-760.
- BRATSEV, S. A., & BRATSEV, A. P. (1979): *The change of river-water resources in Komi ASSR subsequent to forest management.* - *Trans. Komi Branch of the Academy of Sciences of the USSR* 42, S. 48-61.
- BRINGFELT, B. (1982): *A Forest Evapotranspiration Model Using Synoptic Data.* - *RMK 36, Swedish Meteorological and Hydrological Institute, Norrköping*, 62 S.
- BROWN, L., CHEN, J. M., LEBLANC, S. G. & CIHLAR, J. (2000): *A shortwave infrared modification to the simple ratio for LAI retrieval in boreal forests: an image and model analysis.* - *Remote Sensing of Environment* 71 (1), S. 16-25.
- BUFFO, J., FRITSCHEN, L. J. & MURPHY, J. L. (1972): *Direct solar radiation on various slopes from 0 to 60 degrees north latitude.* - *USDA Forest Service research paper; PNW-142, Portland*, 74 S.
- BUKTA, E. (2001): *Bewertung des Landschaftshaushaltes und Vergleich naturnaher borealer Wälder und Forstwirtschaftsflächen im Bereich des Oulanka Nationalparks, Nord-Finnland. Ergebnisse einer geökologischen Kartierung im Maßstab 1:25.000.* - *Unveröffentlichte Diplomarbeit, Institut für Geographie, Universität Bremen*, 88 S.
- BURKE, M. J., GUST, L. V., QUAMME, H. A., WEISER, C. J. & LI, P. H. (1976): *Freezing and injury in plants.* - *Annual review of plant physiology and plant molecular biology* 27, S. 507-528.
- CAJANDER, A. K. (1909): *Ueber Waldtypen.* - *Acta Forestalia Fennica* 1, 175 S.
- CAJANDER, A. K. (1921): *Ueber Waldtypen im allgemeinen.* - *Acta Forestalia Fennica* 20, S. 1-41.
- CANNELL, M. G. R. & SHEPPARD, L. J. (1982): *Seasonal changes in the frost hardiness of provenances of Picea sitchensis in Scotland.* - *Forestry* 55, S. 137-153.
- CHANG, K.-T. & TSAI, B.-W. (1991): *The effect of DEM resolution on slope and aspect mapping.* - *Cartography and geographic information systems* 18, S. 69-77.
- CHRISTERSSON, L. (1971): *Frost damage resulting from ice crystal formation in seedlings of spruce and pine.* - *Physiologia Plantarum* 25, S. 273-278.
- CHRISTERSSON, L. (1978): *The influence of the photoperiod and the temperature on the development of frost hardiness in seedlings of Pinus silvestris and Picea abies.* - *Physiologia Plantarum* 44, S. 288-294.
- CHRISTERSSON, L., von FIRCKS, H. & PERTTU, K. (1984): *Sommarfroster: Förekomster och effekter på befintliga energiskogsodlingar (Frosts during the growing season: Frequency of occurrence and effects on current energy forestry).* - *Sveriges lantbruksuniversitet, Avdelningen för energiskogsodling, Institutionen för ekologi och miljövård, Rapport 37*, 24 S.
- CHRISTERSSON, L., & von FIRCKS, H. (1988): *Injuries to conifer seedlings caused by simulated summer frost and winter desiccation.* - *Silva Fennica* 22, S. 195-201.
- CIENCIALA, E., KUČERA, J., LINDROTH, A., ČERMÁK, J., GRELE, A. & HALLDIN, S. (1997): *Canopy transpiration from a boreal forest in Sweden during a dry year.* - *Agricultural and Forest Meteorology* 86 (3-4), S. 157-167.

- COURBAUD, B., COLIGNY DE, F. & CORDONNIER, T. (2003): *Simulating radiation distribution in a heterogeneous Norway spruce forest on a slope.* - *Agricultural and Forest Meteorology* 116, S. 1-18.
- COUTTS, M. P. (1986): *Components of tree stability in Sitka Spruce on peaty gley soil.* - *Forestry* 59 (2), S. 173-197.
- CREMER, K. W., BOROUGH, C. J., MCKINNEL, F. H. & CARTER, P. R. (1982): *Effects of stocking and thinning on wind damage in plantations.* - *New Zealand Journal of Forest Science* 12 (2), S. 245-268.
- De CHANTAL, M. LEINONEN, K. ILVESNIEMI, H. & WESTMAN, C. J. (2004): *Effects of site preparation on soil properties and on morphology of Pinus sylvestris and Picea abies seedlings sown at different dates.* - *New Forests* 27 (2), S. 159-173.
- DWD - DEUTSCHER WETTERDIENST (Hrsg.) (1963): *Richtlinien für die Kartierung der Frostgefährdung durch Dienststellen des Deutschen Wetterdienstes.* - In: SCHNELLE, F. (Hrsg.): *Frostschutz im Pflanzenbau*, Hamburg, München, S. 425-443.
- DWD - DEUTSCHER WETTERDIENST (Hrsg.) (1999a): *Wetterkarte Sonntag, den 29. Juni 1999.* - *Amtsblatt des Deutschen Wetterdienstes* 180, Offenbach, 8 S.
- DWD - DEUTSCHER WETTERDIENST (Hrsg.) (1999b): *Wetterkarte Montag, den 06. September 1999.* - *Amtsblatt des Deutschen Wetterdienstes* 249, Offenbach, 8 S.
- DWD - DEUTSCHER WETTERDIENST (Hrsg.) (1999c): *Wetterkarte Freitag, den 06. August 1999.* - *Amtsblatt des Deutschen Wetterdienstes* 218, Offenbach, 8 S.
- DWD - DEUTSCHER WETTERDIENST (Hrsg.) (1999d): *Wetterkarte Samstag, den 07. August 1999.* - *Amtsblatt des Deutschen Wetterdienstes* 219, Offenbach, 8 S.
- DWD - DEUTSCHER WETTERDIENST (Hrsg.) (1999e): *Wetterkarte Sonntag, den 08. August 1999.* - *Amtsblatt des Deutschen Wetterdienstes* 220, Offenbach, 8 S.
- DWD - DEUTSCHER WETTERDIENST (Hrsg.) (1999f): *Wetterkarte Donnerstag, den 05. August 1999.* - *Amtsblatt des Deutschen Wetterdienstes* 217, Offenbach, 8 S.
- DWD - DEUTSCHER WETTERDIENST (Hrsg.) (2000a): *Wetterkarte Mittwoch, den 26. Juli 2000.* - *Amtsblatt des Deutschen Wetterdienstes* 208, Offenbach, 8 S.
- DWD - DEUTSCHER WETTERDIENST (Hrsg.) (2000b): *Wetterkarte Donnerstag, den 27. Juli 2000.* - *Amtsblatt des Deutschen Wetterdienstes* 209, Offenbach, 8 S.
- DWD - DEUTSCHER WETTERDIENST (Hrsg.) (2000c): *Wetterkarte Freitag, den 28. Juli 2000.* - *Amtsblatt des Deutschen Wetterdienstes* 210, Offenbach, 8 S.
- DWD - DEUTSCHER WETTERDIENST (Hrsg.) (2000d): *Wetterkarte Sonntag, den 30. Juli 2000.* - *Amtsblatt des Deutschen Wetterdienstes* 212, Offenbach, 8 S.
- DWD - DEUTSCHER WETTERDIENST (Hrsg.) (2000e): *Wetterkarte Samstag, den 05. August 2000.* - *Amtsblatt des Deutschen Wetterdienstes* 218, Offenbach, 8 S.
- DWD - DEUTSCHER WETTERDIENST (Hrsg.) (2000f): *Wetterkarte Freitag, den 16. Juni 2000.* - *Amtsblatt des Deutschen Wetterdienstes* 168, Offenbach, 8 S.
- DWD - DEUTSCHER WETTERDIENST (Hrsg.) (2000g): *Wetterkarte Montag, den 14. August 2000.* - *Amtsblatt des Deutschen Wetterdienstes* 227, Offenbach, 8 S.
- DWD - DEUTSCHER WETTERDIENST (Hrsg.) (2000h): *Wetterkarte Dienstag, den 15. August 2000.* - *Amtsblatt des Deutschen Wetterdienstes* 228, Offenbach, 8 S.
- DWD - DEUTSCHER WETTERDIENST (Hrsg.) (2000i): *Wetterkarte Dienstag, den 25. Juli 2000.* - *Amtsblatt des Deutschen Wetterdienstes* 207, Offenbach, 8 S.

- DIKAU, R. & SCHMIDT, J. (1999): Georeliefklassifikation. - In: SCHNEIDER-SLIWA, R., SCHAUB, D. & GEROLD, G. (Eds.): *Angewandte Landschaftsökologie*, Berlin, S. 217-244.
- DOLL, D. (1991a): *La catastrophe sylvicole de l'hiver 1990*. - *Historiens-Geographie* 339, S. 213-218.
- DOLL, D. (1991b): *Vingt-cinq ans de grand vents dans les forêts d'Europe Occidentale: meteoeres Responsables et Ampleur des Chablis*. - *Proceedings 10th World Forestry Congress, Revue Forestiere Francaise, Hors Serie No. 2*, S. 346-354.
- DUBAYAH, R. & RICH, P. M. (1995): *Topographic solar radiation models for GIS*. - *International Journal of Geographical Information Systems* 9 (4), S. 405-419.
- DUTTMANN, R. & MOSIMANN, T. (1994): *Modellierung klimaökologischer Prozeßgrößen mit dem geoökologischen Informationssystem GOEKIS, Empirisch-statistische Modelle zur flächenhaften Abbildung von Klimaparametern*. - *Geosynthesis* 6, Hannover, 76 S.
- DVWK (Hrsg.) (1986): *Ermittlung des Interzeptionsverlustes in Waldbeständen bei Regen*. - *Merkblätter zur Wasserwirtschaft* 211, Parey, Hamburg, Berlin, 11 S.
- EGGER, J. (1983): *Kanalisation des Windes in breiten Tälern*. - *Annalen der Meteorologie N. F.* 20, S. 8-10.
- EICHE, W. (1966): *Cold damage and plant mortality in experimental provenance plantations with Scots Pine in Northern Sweden*. - *Studia Forestalia Suecica* 36, 218 S.
- ELLING, A. E. & VERRY, E. S. (1978): *Predicting wind-caused mortality in strip-cut stands of peatland black spruce*. - *Forestry Chronicle* 54, S. 249-252.
- EUROLA, S. & RUUHIJÄRVI, R. (1961): *Über die regionale Einteilung der finnischen Moore*. - *Archivum Societatis Zoologicae Botanicae Fennicae 'Vanamo'* 16 (suppl.), S. 49-63.
- EVERHAM, E. M. & BROKAW, N. V. L. (1996): *Forest damage and recovery from catastrophic wind*. - *Botanical Review* 62, S. 113-185.
- FAIRFIELD, J. & LEYMARIE, P. (1991): *Drainage networks from grid Digital Elevation Models*. - *Water Resources Res* 27 (5), S. 709-717.
- FENNER, R. (1994): *Überblick - über die Bedrohung und Vorschläge zum Schutz borealer Wälder*. - In: VENZKE, J.-F. (Hrsg.): *Zur Ökologie und Gefährdung der borealen Landschaftszone: Beiträge zu einem borealgeographischen Kolloquium an der Universität Essen im Wintersemester 1993/94*, Paderborn, S. 99-109.
- FENNER, R. (Hrsg.) (1998): *Taiga: die borealen Wälder - Holzmine für die Welt*. - *Ökozid* 14, Gießen, 213 S.
- FLEMING, R. L. & CROSSFIELD, R. M. (1983): *Strip-cutting in shallow-soil upland black spruce near Nipigon, Ontario. III. Windfall and Mortality in the leave-strips: preliminary results*. - *Great Lakes Forest Research Centre, Canadian Forestry Service*, 28 S.
- FLEMMING, G. (1994): *Wald-Wetter-Klima: Einführung in die Forstmeteorologie*. - 4. Auflage, Berlin, 136 S.
- FLESCH T. K. & WILSON J. D. (1998): *Wind and remnant tree sway in forest cutblocks. I. Measured winds in experimental cutblocks*. - *Agricultural and Forest Meteorology* 93, S. 229-242.
- FLOHN, H. (1954): *Witterung und Klima in Mitteleuropa*. - 2. Auflage, *Forschungen zur Deutschen Landeskunde* 78, Stuttgart, S. 1-214.
- FLORINSKY, I. V. & KURYAKOVA, G. A. (2000): *Determination of Grid Size for Digital Terrain Modelling in Landscape Investigations - exemplified by Soil Moisture Distribution at a Micro-Scale*. - *International Journal of Geographical Information Science*, 14 (8), S. 815-832.

- FMI - FINNISH METEOROLOGICAL INSTITUTE (Hrsg.) (1991): *Tilastoja Suomen Ilmastosta 1961-1990; Climatological Statistics in Finland 1961-1990*. - Liite Suomen Meteorologiseen Vuosikirjaan 90 (1); *Supplement to the Meteorological Yearbook of Finland 90 (1)*, Helsinki, 125 S.
- FMI - FINNISH METEOROLOGICAL INSTITUTE (Hrsg.) (2002): *Tilastoja Suomen ilmastosta 1971-2000 (Climatological statistics of Finland 1971-2000)*. - *Ilmastotilastoja Suomesta 2002 (1)*, Helsinki, 99 S.
- FMI - FINNISH METEOROLOGICAL INSTITUTE (Hrsg.) (1999a): *Ilmastokatsaus 6/1999*. - *Ilmasto Katsaus, Klimatologisk översikt (finn.)*, 12 S.
- FMI - FINNISH METEOROLOGICAL INSTITUTE (Hrsg.) (1999b): *Ilmastokatsaus 7/1999*. - *Ilmasto Katsaus, Klimatologisk översikt (finn.)*, 12 S.
- FMI - FINNISH METEOROLOGICAL INSTITUTE (Hrsg.) (1999c): *Ilmastokatsaus 8/1999*. - *Ilmasto Katsaus, Klimatologisk översikt (finn.)*, 12 S.
- FMI - FINNISH METEOROLOGICAL INSTITUTE (Hrsg.) (1999d): *Ilmastokatsaus 9/1999*. - *Ilmasto Katsaus, Klimatologisk översikt (finn.)*, 12 S.
- FMI - FINNISH METEOROLOGICAL INSTITUTE (Hrsg.) (2000a): *Ilmastokatsaus 6/2000*. - *Ilmasto Katsaus, Klimatologisk översikt (finn.)*, 12 S.
- FMI - FINNISH METEOROLOGICAL INSTITUTE (Hrsg.) (2000b): *Ilmastokatsaus 7/2000*. - *Ilmasto Katsaus, Klimatologisk översikt (finn.)*, 12 S.
- FMI - FINNISH METEOROLOGICAL INSTITUTE (Hrsg.) (2000c): *Ilmastokatsaus 8/2000*. - *Ilmasto Katsaus, Klimatologisk översikt (finn.)*, 12 S.
- FOSTER, D. R. (1988): *Species and stand response to catastrophic wind in central New England, U.S.A.*. - *Journal of Ecology* 76, S. 135-151.
- FRASER, A. I. & GARDINER, J. B. H. (1967): *Rooting and tree stability in Sitka spruce*. - *Forestry Commission Bulletin* 40, HMSO, London, 28 S.
- FRAZER, G. W., FOURNIER, R. A., TROFYMOW, J. A. & HALL, R. J. (2001): *A comparison of digital and film fisheye photography for analysis of forest canopy structure and gap light transmission*. - *Agricultural and Forest Meteorology* 109 (4), S. 249-263.
- FREEMAN, G. T. (1991): *Calculating catchment area with divergent flow based on a regular grid*. - *Computers and Geosciences* 17, S. 413-422.
- FRIDMAN, J. & VALINGER, E. (1998): *Modelling probability of snow and wind damage using tree, stand, and site characteristics from Pinus sylvestris sample plots*. - *Scandinavian Journal of Forest Research* 13, S. 348-356.
- FRIEDL, M. A. (2002): *Forward and inverse modeling of land surface energy balance using surface temperature measurements*. - *Remote Sensing of Environment* 79 (2-3), S. 344-354.
- FRIEDRICH, K. (1996): *Digitale Reliefgliederungsverfahren zur Ableitung bodenkundlich relevanter Flächeneinheiten*. - *Frankfurter Geowissenschaftliche Arbeiten*, D, 21, Frankfurt, 213 S.
- FU, P. & RICH, P. M. (1999): *Design and Implementation of the Solar Analyst: an ArcView Extension for Modeling Solar Radiation at Landscape Scales*. - *WWW-Publikation der University of Kansas* (<http://www.gemlab.ukans.edu/solaranalyst/index.html>), 32 S.
- FU, P. & RICH, P. M. (2000): *The Solar Analyst 1.0, User manual*. - *Helios Environmental Modeling Institute, LLS*, 49 S.

- FUCHINOUE, H. (1982): *The winter desiccation damage of tea plant in Japan.* - In: LI, P. H. & SAKAI, A. (Eds.): *Plant cold hardiness and freezing stress - mechanisms and crop implications 2*, Academic Press Inc., S. 499-510.
- GARBRECHT, J. & MARTZ, L. (1993): *Case Application of the Automated Extraction of Drainage Network and Subwatershed Characteristics from Digital Elevation Models by DEDNM.* - *Geographic Information Systems and Water Resources - American Water Resources Association*, S. 221-229.
- GARBRECHT, J. & MARTZ, L. (1994): *Grid size dependency of parameters extracted from digital elevation models.* - *Computers & Geosciences 20*, S. 85-87.
- GARDINER, B. A. & STACEY, G. R. (1996): *Designing Forest Edges to Improve Wind Stability.* - *Forestry Commission Technical Paper 16*, HMSO, London, 8 S.
- GARDINER, B. A. & QUINE, C. P. (2000): *Management of forests to reduce the risk of abiotic damage - a review with particular reference to the effects of strong winds.* - *Forest Ecology and Management 135 (1-3)*, S. 261-277.
- GARDINER, B. A., PELTOLA, H. & KELLOMÄKI, S. (2003): *Comparison of two models for predicting the critical wind speeds required to damage coniferous trees.* - *Ecological Modelling 129 (1)*, S. 1-23.
- GARDINER, B. A., STACEY, G. R., BELCHER, R. E. & WOOD, C. J. (1997): *Field and wind tunnel assessments of the implications of respacing and thinning for tree stability.* - *Forestry 70 (3)*, S. 233-252.
- GEIGER, R. (1961): *Das Klima der bodennahen Luftschicht.* - *Lehrbuch der Mikroklimatologie*, Braunschweig, 646 S.
- GILLESPIE, A. R., ROKUGAWA, S., HOOK, S. J., MATSUNAGA, T. & KAHLE, A. B. (1999): *Temperature/Emissivity Separation Algorithm Theoretical Basis Document, Version 2.4.* - *NASA Contract NAS5-31372*, 64 S.
- GILLIES, S. L. & BINDER, W. D. (1997): *The effect of sub-zero temperatures in the light and dark on cold-hardened, dehardened and newly flushed white spruce (Picea glauca [Moench.] Voss) seedlings.* - *New Forests 13*, S. 91-104.
- GJERTSEN, A. K., TOMTER, S. & TOMPPÖ, E. (2000): *Combined use of NFI sample plots and Landsat TM data to provide forest information on municipality level.* - In: ZAWILA-NIEDZWIECKI, T. AND BRACH, M., Editors, 2000. *Remote sensing and forest monitoring. Proceedings of IUFRO conference, 1-3 Jun. 1999, Rogow, Poland, Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg*, S. 167-174.
- GLERUM, C. (1985): *Frost hardiness of coniferous seedlings: principles and applications.* - In: DURYEY, M. L. (Hrsg.): *Evaluating seedling quality: Principles, procedures, and predictive abilities of major tests.* - *Forest Research Laboratory, Oregon State University*, S. 107-123.
- GLÜCKERT, G. (1974): *The Kuusamo drumlin field, northern Finland.* - *Bulletin of the Geological Society of Finland 46*, S. 37-42.
- GONCHARUK, N. YU., KARPACHEVSKY, L. O., KYRAEVA E. N., MINAEVA, T. YU. & SHAPOSHNIKOV, E. S. (1997): *Demutatsionnye protsessy v narushennykh sploshnymi vetrovalami elovykh lesakh. (Regeneration successions in windfall disturbed spruce forests).* - In: SMIRNOVA, O.V., SHAPOSHNIKOV, E.S. (Hrsg.): *Successional processes in forests of Russian Reserves and problems of biodiversity conservation. Russian Botanical Society, S.- Petersburg*, S. 116-123.

- GRANBERG, H. B., OTTOSSON-LÖFVENIUS, M. & ODIN, H. (1993): Radiative and aerodynamic effects of an open pine shelterwood on calm, clear nights. - *Agricultural and Forest Meteorology* 63 (3-4), S. 171-188.
- GRATKOWSKI, H. J. (1956): Windthrow around staggered settings in old-growth Douglas-fir Forest. - *Science* 2, S. 60-74.
- GRELLE, A., LUNDBERG, A., LINDROTH, A., MORÉN, A.-S., & CIENCIALA, E. (1996): Evaporation components of a boreal forest: variations during the growing season. - *Journal of Hydrology* 197, S. 70-87.
- GRIZZEL, J. D. & WOLFF, N. (1998): Occurrence of windthrow in forest buffer strips and its effect on small streams in Northwest Washington. - *Northwest Science* 72, S. 214-223.
- GROSS, G. (1985): Numerische Simulation nächtlicher Kaltluftabflüsse und Tiefsttemperaturen in einem Moselseitental. - *Meteorologische Rundschau* 38 (6), S. 161-171.
- GROSS, G. (1987): Some Effects of deforestation on local climate and nocturnal drainage flow - a numerical study. - *Boundary-Layer Meteorology* 37, S. 315-339.
- HÄCKEL, H. (1999): *Meteorologie*. - 4. Auflage, UTB, Ulmer, Stuttgart, 448 S.
- HAGNER, M. & HÄLLSTRÖM, H. (1997): Crown closure meter: a computer model for automatic estimation of forest density from fish-eye photos. - *Working reports / Department of Silviculture, Swedish University of Agricultural Sciences* 124, Umeå.
- HAGNER, S. (1962): Naturlig förnygring under skärm. (Natural regeneration under shelterwood stands, engl. Abstr.). - *Meddelanden från Statens Skogsforsknings-institut* 52 (4), S. 1-263.
- HAKE, G. (1982): *Kartographie I*. - 6. Auflage, Walter de Gruyter, Berlin, New York, 342 S.
- HÄKKILÄ, M. (1999): Zu den Veränderungen landwirtschaftlicher Nutzflächen in Finnland und deren Zukunftsperspektiven. - *Europa regional* 7(2), Leipzig, S.19-26.
- HALLDIN, S. & GRIP, H. (1979): Actual forest evapotranspiration by a simple model. - *Transactions, American Geophysical Union* 60 (32), S. 580.
- HÄLLGREN, J.-E., LUNDMARK, T. & STRAND, M. (1990): Photosynthesis of Scots pine in the field after night frosts during summer. - *Plant Physiology and Biochemistry* 28, S. 437-445.
- HALME, M. & TOMPPO, E. (2001): Improving the accuracy of multisource forest inventory estimates to reducing plot location error - a multicriteria approach. - *Remote Sensing of Environment* 78 (3), S. 321-327.
- HÄMET-AHTI, L. (1973): Die Bioklimatischen Zonen und die Baumarten im Kuusamo-Gebiet, Nordfinnland. - *Publications of the Finnish Dendrological Society* 1, Helsinki, S. 1-8.
- HANNAH, P., PALUTIKOF, J. P. & QUINE, C. P. (1995): Predicting windspeeds for forest areas in complex terrain. - In: COUTTS, M. P. & GRACE, J. (Hrsg.), *Wind and Trees [selection from papers presented at a conference, Wind and Wind-Related Damage to Trees, held at Heriot-Watt University, Edinburgh, in July 1993]*, Cambridge University Press, 1995, Cambridge, S. 113-129.
- HANNELIUS, S. & KUUSELA, K. (1995): Finnland ein Land der borealen Nadelwälder. - *IUFRO World Congress* 20, Tampere, 192 S.
- HANNERZ, M. (1994): Damage to Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst) seedlings caused by a late spring frost. - *Forestry Research Institute of Sweden, Report* 5, Uppsala, 19 S.
- HÄNNINEN, K. (1912): Havaintoja Paanajärvestä (Referat: Beobachtungen betreffs des Paanajärvi-Sees). - *Meddelanden av Geografiska Föreningen i Finland* IX, 33 S.
- HARE, F. K. & RITCHIE, J. C. (1972): The boreal bioclimates. - *Geographical Review* 62, S. 333-365.

- HÄRME, M. (1961): *On the fault lines in Finland*. - *Bulletin de la Commission géologique de Finlande* 196, S. 437-444.
- HARRIS, A. S. (1989): *Wind in the forests of southeast Alaska and guides for reducing damage*. - U.S.D.A. Forest Service PNW-GTR-224, 63 S.
- HAVAS, P. (1961): *Vegetation und Ökologie der ostfinnischen Hangmoore*. - *Annales Botanici Societatis 'Vanamo'* 31, S. 1-188.
- HEIKINHEIMO, O. (1912): *Metsämaitten kosteussuhteista. I. Kuivien kangasmaitten kosteussuhteet*. - *Suomen Metsänhoitoyhdistyksen Julkaisuja* 29, Helsinki.
- HEIKKINEN, O. (1988): *Human impact on the forests in Finland*. - *Nordia* 22 (1), Oulu, S. 17-25.
- HEIKKINEN, O. & KURIMO, H. (1977): *The postglacial history of Kitkajärvi, North-eastern Finland, as indicated by trend-surface analysis and ratio-carbon dating*. - *Fennia* 153, S. 1-32.
- HEIKURAINEN, L. (1967): *Forest hydrology research in Finland*. - In: SOPPER, W. E. & LULL, H. N. (Hrsg.): *Forest hydrology. Proceedings of a national science foundation advanced science seminar (Univ. Park/Pa.)*, Pergamon Press, Oxford [u.a.], S. 41-43.
- HEINO, R. (1994): *Climate in Finland during the period of meteorological observations*. - *Finnish Meteorological Institute, Helsinki*, 209 S.
- HEINO, R. & HELLSTEIN, E. (1983): *Tilastoja Suomen Ilmastosta 1961-1980; Climatological Statistics in Finland 1961-1980*. - *Liite Suomen Meteorologiseen Vuosikirjaan 80 (1a); Supplement to the Meteorological Yearbook of Finland 80 (1a)*, Helsinki, 560 S.
- HENNINGSEN, T. & THIES, C. (1998): *Wo landet das Taigaholz?*. - In: FENNER, R. (Hrsg.): *Taiga: die borealen Wälder - Holzmine für die Welt*, Ökozid 14, Gießen, S. 99-107.
- HIBBERT, A. R. (1967): *Forest treatment effects on water yield*. - In: SOPPER, W. E. & LULL, H. N. (Hrsg.): *Forest hydrology. Proceedings of a national science foundation advanced science seminar (Univ. Park/Pa.)*, Pergamon Press, Oxford [u.a.], S. 527-543.
- HOLBO, H. R., CHILDS, S. W. & Mc NABB, D. H. (1987): *Summertime radiation balances of clearcut and shelterwood slopes in southwest Oregon*. - *Forest Science* 33 (2), S. 504-516.
- HOLDAWAY, M. R. (1996): *Spatial modeling and interpolation of monthly temperature using kriging*. - *Climate Research* 6 (3), S. 215-225.
- HOLMES, S. R. (1985): *An analysis of windthrow along clearcut boundaries in the Tsitika watershed*. - B. A. Thesis. University of British Columbia, 104 S.
- HOLSTEN, S. (2005): *Multisensorielle, erdnahe Erdbeobachtung - Entwicklung und Anwendung*. - Dissertation, Universität Bremen, 107 S.
- HOLTMEIER, F.-K. (1985): *Die klimatische Waldgrenze - Linie oder Übergangsraum (Ökoton)?*. - *Erdkunde*, 39 (4), S. 271-285.
- HOMÉN, T. (1896): *Über die Bodentemperatur in Mustiala*. - *Acta Societatis Scientiarum Fennicae* 21 (9), 184 S.
- HUOVILA, S. (1964): *On precautions against crop damage due to radiation frost within hilly regions*. - *Commentationes physico-mathematicae* 29 (4), 21 S.
- HUOVILA, S. (1970): *Some features of the microclimate within hilly regions in Finland*. - In: *Ecology of the subarctic regions. UNESCO, Proceedings of the Helsinki Symposium 1966, Ecological Conservation I*, S. 63-66.
- HUOVILA, S. (1987): *On Temperature inversions in Finnish Lapland*. - *Uppsala Universitetets Naturgeoograriska Institution, UNGI-Rapport 65, Uppsala*, S. 43-51.

- HUTCHISON, B. A. & MATT, D. R. (1976): *Beam enrichment of diffuse radiation in a deciduous forest.* - *Agricultural Meteorology* 17, S. 93-110.
- HUTCHISON, B. A., MATT, D. R. & McMILLEN, R. (1980): *Effects of sky brightness distribution upon penetration of diffuse radiation through canopy gaps in a deciduous forest.* - *Agricultural Meteorology* 22, S. 137-147.
- HÜTTE, P. (1968): *Experiments on windflow and wind damage in Germany; site and susceptibility of spruce forests to storm damage.* - *Forestry (Suppl.)* 41, S. 20-26.
- HYVÄRINEN, H. (1973): *The deglaciation history of eastern Fennoscandia - recent data from Finland.* - *Boreas* 2, S. 85-102.
- IQBAL, M. (1983): *An Introduction to solar radiation.* - Toronto, New York, London, 390 S.
- ISAACS, E. H. & SRIVASTAVA, M. R. (1989): *An introduction to Applied geostatistics.* - Oxford University Press, 561 S.
- JACKSON, P. S. & HUNT, J. C. R. (1975): *Turbulent wind flow over a low hill.* - *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 101, S. 929-955.
- JALKANEN, A. & MATTILA, U. (2000): *Logistic regression models for wind and snow damage in northern Finland based on the National Forest Inventory data.* - *Forest Ecology and Management* 135 (1), S. 315-330.
- JOHANNESSON, T. W. (1970): *The climate of Scandinavia.* - In: WALLÉN, C. C. (Hrsg.): *Climates of the Northern and Western Europe. World Survey of Climatology, Vol. 5, Amsterdam, London, New York, S. 23-80.*
- KAISER, C. (1993): *Der glaziale und postglaziale Formenschatz in Finnland.* - In: ACHENBACH, H. (Hrsg.), *Suomi/Finnland - Naturpotential und Lebensräume im hohen Norden Europas, Kieler Arbeitspapiere zur Landeskunde und Raumordnung* 27, Kiel, S. 21-31.
- KALELA, A. (1958): *Über die Waldvegetationszonen Finnlands.* - *Botaniska Notiser* 111, Lund, S. 353-368.
- KALELA, A. (1961): *Waldvegetationszonen Finnlands und ihre klimatischen Paralleltypen.* - *Archivum Societatis Zoologicae Botanicae Fennicae 'Vanamo'* 16, Helsinki, S. 65-83.
- KALLIOLA, R. (1980): *Kuusamon kasvot.* - Teoksessa: VIRAMO, J., HELMINEN, M. & LAMPI, M. (Toim.): *Oulangan kansallispuisto: 5-7, Metsähallitus. Valtion painatuskeskus, Helsinki.*
- KALMA, J. D., LAUGHLIN, G. P., GREEN, A. A. & O'BRIEN, M. T. (1986): *Minimum temperature surveys based on near-surface temperature measurements and airborne thermal scanner data.* - *Journal of Climatology* 6, S. 413-430.
- KANG, S., KIM, S., OH, S. & LEE, D. (2000): *Predicting spatial and temporal patterns of soil temperature based on topography, surface cover and air temperature.* - *Forest Ecology and Management* 136 (1-3), S. 173-184.
- KARLSSON, M., NILSSON, U. & ÖRLANDER, G. (2002): *Natural Regeneration in Clear-cuts: Effects of Scarification, Slash Removal and Clear-cut Age.* - *Scandinavian Journal of Forest Research* 17 (2), S. 131-138.
- KATILA, M. & TOMPPO, E. (2001): *Selecting estimation parameters for the Finnish multisource National Forest Inventory.* - *Remote Sensing of Environment* 76 (1), S. 16-32.
- KATILA, M., HEIKKINEN, J. & TOMPPO, E. (2000): *Calibration of small-area estimates for map errors in multi-source forest inventory.* - *Canadian Journal of Forest Research* 30, S. 1329-1339.

- KAUTTU, K. (1952): *Havaintoja valaistuksen, ilman lämpötilan ja suhteellisen kosteuden vaihteluista eräässä kuusikossa (finn.); Beobachtungen über Schwankungen von Beleuchtung, Lufttemperatur und relativer Feuchtigkeit in einem Fichtenbestand. - Metsätieteellisen Tutkimuslaitoksen julkaisuja 40 (31), Helsinki, 21 S.*
- KERÄNEN, J. (1920): *Über die Temperatur des Bodens und der Schneedecke in Sodankylä nach Beobachtungen mit Thermoelementen. - Suomalaisen Tiedeakatemia Toimituksia A, 13, 7, Helsinki, 197 S.*
- KIHLMAN, A. OSW. (1893): *Nattfrosterna i Finland 1892. - Fennia 8 (4), Helsinki, S. 1-42.*
- KITTREDGE, J. (1948): *Forest influences. - McGraw-Hill, New York u.a., 394 S.*
- KLAASSEN, W., BOSVELD, F. & De WATER, E. (1998): *On water storage and evaporation as constituents of rainfall interception. - Journal of Hydrology Volumes 212-213 (1-4), S. 36-50.*
- KLEIN, G. (1994): *Regionalisierung von Niederschlag mit Hilfe digitaler Geländeinformationen, Entwicklung eines geoökologischen Modells zur routinemäßigen Ableitung hochauflösender Niederschlagskarten. - Freiburger Geographische Hefte 44, Freiburg, 112 S.*
- KNYAZIKHIN, Yu., MARSHAK, A., SCHULZE, D., MYNENI, R., GRAVENHORST G. (1994): *Optimization of solar radiation input in forest canopy as a tool for planting/cutting of trees. - Transport Theory and Statistical Physics 23 (5), S. 671-700.*
- KÖNIG, G. (1995): *Entwicklung einer GIS-gestützten Methode klimaökologischer Standortbewertung am Beispiel Bremens. - Bremer Beiträge zur Geographie und Raumplanung, Bremen, 209 S.*
- KÖPPEN, W. (1931): *Grundriß der Klimakunde (2. Aufl.). - Berlin, Leipzig, S. 1-388.*
- KOUTANIEMI, L. (1979): *Late-glacial and post-glacial development of the valleys of the Oulanka river basin, north-eastern Finland. - Fennia 157, Oulu, S. 13-73.*
- KOUTANIEMI, L. (1983): *Climatic characteristics of the Kuusamo Uplands. - Oulanka Reports 3, Oulu, S. 3-29.*
- KOUTANIEMI, L. (1984): *The Oulanka Valley. - Oulanka Reports 5, Oulu, S. 50-53.*
- KOUTANIEMI, L. (1999): *Physical characteristics of Oulanka-Panajärvi region on the Finnish-Karelian border. - Fennia 177 (1), S. 3-9.*
- KOUTANIEMI, L. & RONKAINEN, R. (1983): *Palaeocurrents from 5000 and 1600-1500 B.P. in the main rivers of the Oulanka Basin, North-eastern Finland. - Publicationes Instituti Geographici Universitatis Oulensis, Oulu, S. 145-158.*
- KOUTANIEMI, L., HUTTUNEN, A. & EKMAN, I. & LUKASHOV, A. (1994): *Nuorusen nunatakki? (Abstract: Nunatak of the Nuorunen fell, Eastern Fennoscandia?). - Terra 106 (3), S. 232-237.*
- KRESTOVSKY, O. I. & SOKOLOVA, N. V. (1980): *Spring runoff and the loss of melt water in the forest and in the field (in russ.). - Trans. GGI 265, S. 32-60.*
- KRESTOVSKY, O. I. (1969): *Investigation of runoff and water balance of watersheds (in russ.). - Trans. GGI 176, S. 22-50.*
- KUBIN, E. & KEMPPAINEN, L. (1991): *Effect of clearcutting of boreal spruce forest on air and soil temperature conditions. - Acta Forestalia Fennica 225, 42 S.*
- KUBIN, E. & KEMPPAINEN, L. (1994): *Effect of Soil Preparation of Boreal Spruce Forest on Air and Soil Temperature Conditions in Forest Regeneration Areas. - Acta Forestalia Fennica 244, 56 S.*
- KUCHARIK, C. J., NORMAN, J. M. & GOWER, S. T. (1999): *Characterization of radiation regimes in nonrandom forest canopies: theory, measurements, and a simplified modeling approach. - Tree Physiology 19, S. 695-707.*

- KUITTINEN, R. & SUCKSDORFF, Y. (1987): *Inventory of river basin characteristics in finnish conditions using satellite imagery*. - *Aqua Fennica* 17 (2), S. 97-114.
- KULLMAN, L. & HÖGBERG, N. (1989): *Rapid natural decline of upper montane forests in the Swedish Scandes*. - *Arctic* 42 (3), S. 217-226.
- KÜNKEL, K.-J., BACHMANN, G., BÖKEN, H., SOMMER, C., BRANDHUBER, R., BRUNOTTE, J., BUCHNER, W., FRIELINGHAUS, M., SCHMIDT, W. & GULLICH, P. (2001): *Gute fachliche Praxis zur Vorsorge gegen Bodenschadverdichtungen und Bodenerosion*. - Bundesministerium für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft (Hrsg.), Bonn, 105 S.
- KUTZBACH, J. (1961): *Investigations of the modifications of wind profiles by artificially controlled surface roughness*. - *Annual Report, Department of Meteorology, University of Wisconsin, Madison*, S. 77-113.
- KUUSELA, K. & SALMINEN, S. (1969): *The 5th National Forest Inventory in Finland. General design, instructions for field work and data processing*. - *Commununicationes Instituti Forestalis Fenniae* 69 (4), S. 1-72.
- KUUSELA, K., HUTTUNEN, A., ISOHERRANEN, E. & SIIKAMÄKI, P. (2002): *Koillismaan Luonnontieteellinen Bibliografia 1980-2001*. - *Oulanka Reports* 26, 58 S.
- KUUSIPALO, J. (1996): *Suomen Metsätyypit*. - Kirjayhtymä Oy, Rauma, 144 S.
- LAASASENAHO, J. (1982): *Taper curve and volume functions for pine, spruce and birch*. - *Communicationes Instituti forestalis Fenniae* 108, S. 1-74.
- LAFLEUR, P. M., RENZETTI, A. V. & BELLO, R. (1993): *Seasonal changes in the radiation balance of subarctic forest and tundra*. - *Arctic and Alpine Research* 25, S. 32-36.
- LAFLEUR, P. M., WURTELE, B. A. & DUGUAY, C. R. (1997): *Comparison of spatial and temporal variation in albedo in the subarctic using ground-based measurements and remote sensing*. - *Arctic and Alpine Research* 29, S. 261-269.
- LAGERGREN, F., LANKREIJER, H., KUCERA, J., CIENCIALA, E., MÖLDER, M. & LINDROTH, A. (2001): *Effects of thinning on transpiration in a mixed pine and spruce forest in central Sweden*. - In: LAGERGREN, F.: *Effects of thinning, weather and soil moisture on tree and stand transpiration in a Swedish forest*, 22 S.
- LAIHO, O. (1987): *Metsiköiden alttius tuulituhaille Etelä-Suomessa. (Summary: Susceptibility of forest stands to windthrow in southern Finland)*. - *Folia Forestalia* 706, 24 S.
- LANGVALL, O. (2000): *Interactions between near-ground temperature and radiation, silvicultural treatments and frost damage to Norway spruce*. - Ph.D. dissertation, Swedish University of Agricultural Science, Southern Swedish Research Centre, Alnarp. *Silvestria* 140, 35 S.
- LANGVALL, O. & ÖRLANDER, G. (2001): *Effects of pine shelterwoods on microclimate and frost damage to Norway spruce seedlings*. - *Canadian Journal of Forest Research* 31 (1), S. 155-164.
- LANGVALL, O., NILSSON, U. & ÖRLANDER, G. (2001): *Frost damage to planted Norway spruce seedlings - influence of site preparation and seedling type*. - *Forest ecology and management* 141 (3), S. 223-236.
- LANQUAYE, C. O. (2003): *Empirical modelling of windthrow risk using GIS*. - Master's Thesis, University of British Columbia, Vancouver, BC., 126 S.
- LAPPI, J. (2001): *Forest inventory of small areas combining the calibration estimator and a spatial model*. - *Canadian Journal of Forest Research* 31, S. 1551-1560.
- LÄSSIG, R. & SCHÖNEBERGER, W. (2000): *Nach 'Lothar' und 'Vivian'-Erfahrungen profitieren*. - *Wald und Holz* 81 (3), S. 31-35.

- LAUER, W. & FRANKENBERG, P. (1988): Klimaklassifikationen der Erde. - *Geographische Rundschau* 40 (6), Braunschweig, S. 55-59.
- LAUGHLIN, G. P. & KALMA, J. D. (1987): Frost hazard assessment from local weather and terrain data. - *Agricultural and Forest Meteorology* 40, S. 1-16.
- LAUGHLIN, G. P. & KALMA, J. D. (1990): Frost risk mapping for landscape planning: a methodology. - *Theoretical and Applied Climatology* 42, S. 41-51.
- LEE, X. (2000): Air motion within and above forest vegetation in non-ideal conditions. - *Forest Ecology and Management* 135 (1-3), S. 3-18.
- LEIKOLA, M. & PYLKKÖ, P. (1969): Verhopuuston tiheyden vaikutus metsikön minimilämpötiloihin hallaöinä. Summary: On the influence of stand density on the minimum temperatures during frost nights. - *Silva Fennica* 3 (1), S. 20-32.
- LEKES, V. & DANDUL, I. (2000): Using airflow modelling and spatial analysis for defining wind damage risk classification (WINDARC). - *Forest Ecology and Management* 135 (1-3), S. 331-344.
- LEMEUR, R. & ROSENBERG, N. J. (1979): Simulating the quality and quantity of short-wave radiation within and above canopies. - In: HALLDIN, S. (Hrsg.): *Comparison of Forest Water and Energy Exchange Models*. International Society for Ecological Modelling, Kopenhagen, S. 77-100.
- LESER, H. & KLINK, H.-J. (Hrsg.) (1988): *Handbuch und Kartieranleitung Geoökologische Karte 1:25000 (KA GÖK 25)*. - *Forschungen zur deutschen Landeskunde* 228, Trier, 349 S.
- LETTAU, H. H. (1969): Note on Aerodynamic Roughness-Parameter Estimation on the Basis of Roughness Element Description. - *Journal of Applied Meteorology* 8, S. 828-832.
- LEVITT, J. (1980): *Responses of plants to environmental stresses, vol. 2: water, radiation, salt, and other stresses*. - Academic Press, 2nd ed., Orlando [u.a.], 607 S.
- LEYTON, L., REYNOLDS, E. R. C. & THOMPSON, F. B. (1967): Rainfall interception in forest and moorland. - In: SOPPER, W. E. & LULL, H. N. (Hrsg.): *Forest hydrology. Proceedings of a national science foundation advanced science seminar (Univ. Park/Pa.)*, Pergamon Press, Oxford [u.a.], S. 163-178.
- LI, P. H. & SAKAI, A. (Hrsg.) (1981): *Plant cold hardiness and freezing stress: Mechanisms and crop implications*. - Vol. 2: Part 3, S. 199-527.
- LINDAHL, K. (1998): Waldnutzung in der Taiga - Richtung Nachhaltigkeit?. - In: FENNER, R. (Hrsg.): *Taiga: die borealen Wälder - Holzmine für die Welt*, Ökozid 14, Gießen, S. 83-96.
- LINDKVIST, L. (1997): Respiration equivalents and frost intensity in relation to tree cover - geostatistical modelling of spatial distributions. - In: LINDKVIST, L.: *Investigations of local climate variability in a mountainous area - including case studies on air, soil and soil surface properties in complex terrain*, Earth Sciences Centre Göteborg University publications: A22, Göteborg, 21 S.
- LINDKVIST, L. & CHEN, D. (1997): Air and soil frost indices in relation to plant mortality in elevated complex terrain. - In: *Investigations of local climate variability in a mountainous area - including case studies on air, soil and soil surface properties in complex terrain*, Earth Sciences Centre Göteborg University publications A22, Göteborg, S.1-20.
- LINDKVIST, L. & CHEN, D. (1999): Air and soil frost indices in relation to plant mortality in elevated clear-felled terrain in Central Sweden. - *Climate Research* 12 (1), S. 65-75.
- LINDKVIST, L. & LINDQVIST, S. (1997): Spatial and temporal variability of nocturnal summer frost in elevated complex terrain. - *Agricultural and Forest Meteorology* 87 (2-3), S. 139-153.
- LINDKVIST, L., GUSTAVSSON, T. & BOGREN, J. (2000): A frost assessment method for mountainous areas. - *Agricultural and Forest Meteorology* 102 (1), S. 51-67.

- LINDROTH, A. & PERTTU, K (1981): *Simple calculation of extinction coefficients of forest stands.* - *Agricultural Meteorology* 25, S. 97-110.
- LOHMANDER, P. & HELLES, F. (1987): *Windthrow probability as a function of stand characteristics and shelter.* - *Scandinavian Journal of Forest Research* 2, S. 227-238.
- LUKKALA, O. J. (1942): *Sateen mittauksia erilaisissa metsiköissä: Niederschlagsmessungen in verschiedenartigen Beständen.* - *Acta Forestalia Fennica* 50, Helsinki, 13 S.
- LUKKALA, O. J. (1946): *Korpimetsien luontainen uudistaminen; Die natürliche Verjüngung der Bruchwälder (finn.).* - *Metsätieteellisen Tutkimuslaitoksen Julkaisuja* 34 (3), Helsinki, 150 S.
- LUNDMARK, T. & HÄLLGREN, J. E. (1987): *Effects of frost on shaded and exposed spruce and pine seedlings planted in the field.* - *Canadian Journal of Forest Research* 17 (10), S. 1197-1202.
- MACHENHAUER, B., WINDELBAND, M., BOTZET, M., CHRISTENSEN, J. H., DÉQUÉ, M., JONES, R. G., RUTI, P. M., & VISCONTI, G. (1998): *Validation and analysis of regional present-day climate and climate change simulations over Europe.* - *MPI Rep. 275*, Max-Planck Institut für Meteorologie, 80 S.
- MacIVER, D. C. (1986): *Thermal Stress in the New Forest.* - In: MacIVER, D. C., STREET, R. B. & AUCLAIR, A. N. (Eds.): *Climate applications in forest renewal and forest production - Proceedings of forest climate 1986, Nov. 17-20, 1986 Geneva Park, Ovilla, Ontario*, S. 111-116.
- MÄLKÖNEN, E. (2000): *Importance of forests in Finland.* - In: MÄLKÖNEN, E. (Hrsg.): *Forest condition in a changing environment - the Finnish case.* - *Forestry Sciences, Vol. 65*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Boston, London, S. 1-4.
- MARTYN, D. (1992): *Climates of the world.* - Elsevier, Amsterdam [u.a.], 435 S.
- MATHERON, G. (1971): *The theory of regionalized variables and its applications.*, Les Cahiers du Centre de morphologie mathématique de Fontainebleau. - *Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris*, 198 S.
- MATTSSON, J. O. & BÖRJESSON, L. (1978): *Lokalklimatiska Temperaturstudier inom ett skånskt fruktodlingsdistrikt: med särskilt beaktande av frostilltheten (in schwed.).* - *Meddelanden från Lunds Universitets Geografiska Institution: Avhandlingar* 82, Sveriges Lantbruksuniversitet, Trädgård 131, 152 S.
- MATUSZKIEWICZ, W., MATUSZKIEWICZ, A., & MATUSZKIEWICZ, J.-M. (1995): *Zur Syntaxonomie der Waldgesellschaften Nationalpark Oulanka, Nordost-Finnland.* - *Aquilo Series Botanica* 35, S. 1-29.
- MAZZONI, R. (1996): *Turbulenzstruktur im gestörten Nachlauf einer künstlichen Oberflächenmodifikation. Ein Feldexperiment.* - *Zürich, Eidgenössische Technische Hochschule, Dissertation*, 133 S.
- McCAUGHEY, J. H. (1981): *Impact of clearcutting of coniferous forest on the surface energy balance.* - *Journal of Applied Ecology* 18, S. 815-826.
- McCAUGHEY, J. H. (1985): *A radiation and energy balance study of mature forest and clear-cut sites.* - *Boundary Layer Meteorology* 32, S. 1-24.
- McNOLEG, O. (1996): *The integration of GIS, remote sensing, expert systems and adaptive co-kriging for environmental habitat modeling of the Highland Haggis using object-oriented, fuzzy-logic and neural-network techniques.* - *Computers & Geosciences* 22 (5), S. 585-588.
- METZLER, M. D. & MALILA, W. A. (1985): *Characterization and comparison of Landsat-4 and Landsat-5 Thematic Mapper data.* - *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 51, S. 1315-1330.

- MILLER, K. F. (1985): *Windthrow hazard classification*. - Forestry Commission leaflet 85, Forestry Commission, London.
- MITCHELL, S. J. (2000): *Forest health: preliminary interpretations for wind damage*. - Forest Practices Branch, British Columbia, Ministry of Forests, Victoria, B.C. *Stand Density Management Diagrams*, 40 S.
- MITCHELL, S. J. (2003): *Windthrow hazard mapping using GIS*. - Weyerhaeuser West Island Timberlands. *Final Report prepared for Bill Beese, Weyerhaeuser Ltd., Nanaimo, BC.*, 30 S.
- MITCHELL, S. J. (o. D.) *Windthrow Assessment and Management*. - Department of Forest Sciences, The University of British Columbia, 54 S.
- MITCHELL, S. J., HAILEMARIAM, T. & KULIS, Y. (2001): *Empirical modeling of cutblock edge windthrow risk on Vancouver Island, Canada, using stand level information*. - *Forest Ecology and Management* 154, S. 117-130.
- MITCHELL, S. J., PEARSON, A., KIMMINS, J. P., LANQUAYE, N. & ORTLEPP, S. (2004): *Investigation of windthrow as a natural disturbance agent in coastal BC forests*. - FII Technical Report, Project R04-074, Vancouver, BC, 53 S.
- MITCHELL, S. & LANQUAYE-OPOKU, N. (2004): *Windthrow Hazard Mapping using GIS, Canadian Forest Products TFL 30, McGregor Model Forest, Final Report – September 2004*. - Faculty of Forestry, UBC, 25 S.
- MÖLG, T. (2002): *Modellierung der kurzwelligen Einstrahlung mit GIS am Beispiel eines tropischen Hochgebirges*. - In: STROBL, J.: *Angewandte geographische Informationsverarbeitung XIV : Beiträge zum AGIT-Symposium Salzburg 2002*, S. 347-356.
- MUINONEN, E. & TOKOLA, T. (1990): *An application of Remote Sensing for communal Forest Inventory*. - *The Usability of Remote Sensing for Forest inventory and Planning, Proceedings from SNS/IUFRO workshop in Umeå 26-28, February 1990*, S. 35-42.
- MÜLLER, J. M. (1996): *Handbuch ausgewählter Klimastationen der Erde*. - Forschungsstelle Boden-erosion der Universität Trier, Mertesdorf (Ruwertal) Nr. 5, Trier, 400 S.
- NÄGELI, W. (1954): *Die Windbremsung durch einen großen Waldkomplex*. - In: IUFRO 1953, S. 240-246.
- NEUSTEIN, S. A. (1965): *Windthrow on the margins of various sizes of felling area. Report on forest research for the year ended March 1964*. - Forestry Commission, S. 166-171.
- NEWELL, J. (2004): *The Russian Far East: a reference guide for conservation and development*. - 2nd ed., McKinleyville, Calif., 466 S.
- NILSSON, U. & ÖRLANDER, G. (1995): *Effects of regeneration methods on drought damage to newly planted Norway spruce seedlings*. - *Canadian Journal of Forest Research* 25 (5), S. 790-802.
- NLS - NATIONAL LAND SURVEY OF FINLAND (Hrsg.): (1996): *Topographic Data Model*. - National Land Survey of Finland Publications 71, Helsinki, 62 S.
- NORDSETH, K. (1987): *Climate and Hydrology of Norden*. - In: VARJO, U. & TIETZE, W. (Hrsg.): *Norden - Man and Environment*, Berlin, Stuttgart, S. 159-183.
- NOVAK, M. D., ORCHANSKY, A. L., WARLAND, J. S. & KETLER, R. (2001): *Wind tunnel modelling of partial cuts and cutblock edges for windthrow*. - In: MITCHELL, S. J. & RODNEY, J. (Hrsg.): *Windthrow Assessment and Management in British Columbia: Proceedings of the Windthrow Researchers' Workshop Jan. 31-Feb. 1, 2001, Richmond, B. C.*, S. 176-192.
- NOWOK, C. (1993): *Leitlinien des Geologisch-Tektonischen Aufbaus Finnlands*. - In: ACHENBACH, H. (Hrsg.), *Suomi/Finnland - Naturpotential und Lebensräume im hohen Norden Europas*, Kieler Arbeitspapiere zur Landeskunde und Raumordnung 27, Kiel, S. 3-12.

- NUNEZ, D. & SANDER, M. (1982): *Protection from cold stress in a Eucalyptus shelterwood*. - *Journal of Climatology* 2, S. 141-146.
- O'CALLAGHAN, J. & MARK, D. M. (1984): *The extraction of drainage networks from digital elevation data*. - *Computer Vision, Graphics, and Image Processing* 28, S. 323-344.
- ODEH, I. O. A., McBRATNEY, A. B. & CHITTLEBOROUGH, D. J. (1994): *Spatial Prediction of Soil Properties from Landform. Attributes Derived from a Digital Elevation Model*. - *Geoderma* 63, S. 197-214.
- ODIN, H. (1979): *Meteorology in forest operations*. - In: *WMO symposium on forest meteorology in Ottawa 21-25 August 1978*. WHO. No 527, S. 167-177.
- ODIN, H. (1976): *Skogsmeteorologiska faktorers förändring med kalhuggning. Del I: Vinden och avdunstningen. Biometeorologisk introduktionen*. - *Institutionen för Skogsföryngring, Rapporter och Uppsatser* 73, Stockholm, 237 S.
- ODIN, H. & PERTTU, K. (1966): *Strålningsmätningar nära skogsgränsen i norra Sverige*. - *Meteorologiska Institutionen vid Uppsala Universitet, Rapport 2, Institutionen för Skogsföryngring, Skogshögskolan, Rapporter och Uppsatser* 7, Stockholm.
- OJANSUU, R. & HENTTONEN, H. (1983): *Kuukauden keskilämpötilan, lämpösumman ja sademäärän paikallisten arvojen johtaminen ilmatieteen laitoksen mittautiedoista*. (finn.: *Estimation of local values of monthly mean temperature*). - *Silva Fennica* 17 (2), S. 143-160.
- OKER-BLOM, P. (1986): *Photosynthetic radiation regime and canopy structure in modelled forest stands*. - *Acta Forestalia Fennica* 197, S. 1-44.
- OKSANEN, J. & JAAKKOLA, O. (2000): *Interpolation and accuracy of contour-based raster dems*. - *Reports of the Finnish Geodetic Institute* 2, 32 S.
- OLSSON, R. (Hg.) (1995): *The Taiga Trade - a report on the production, consumption and trade of boreal wood products*. - *Taiga Rescue Network, Jokkmokk*.
- ÖRLANDER, G. (1993): *Shading reduces both visible and invisible frost damage to Norway spruce seedlings in the field*. - *Forestry* 66, S. 27-36.
- ÖRLANDER, G., GEMMEL, P. & HUNT, J. (1990): *Site preparation: a swedish overview*. - *Canada-British Columbia Partnership Agreement on Forest Resource Development (FRDA) Report 105, Forestry Canada and British Columbia Ministry of Forests, Victoria, British Columbia*, 61 S.
- ÖSTLUND, L., ZACKRISSON, O. & AXELSSON, A.-L. (1997): *The history and transformation of a Scandinavian boreal forest landscape since the 19th century*. - *Canadian Journal of Forest Research* 27, S. 1198-1206.
- OTTOSSON-LÖFVENIUS, M. (1987): *Effects of high pine shelterwood on temperature near the ground*. - *UNGI-rapport* 65, Uppsala Universitetets Naturgeogr. Inst., Uppsala, S. 69-77.
- OTTOSSON-LÖFVENIUS, M. (1993a): *Observed and simulated global radiation in pine shelterwoods*. - In: *OTTOSSON-LÖFVENIUS, M.: Temperature and radiation regimes in pine shelterwood and clear-cut area, Ph.D. thesis, Department of Forest Ecology, Swedish University of Agricultural Sciences, Umeå*, 20 S.
- OTTOSSON-LÖFVENIUS, M. (1993b): *Temperature and radiation regimes in pine shelterwood and clear-cut area*. - *Ph.D. thesis, Department of Forest Ecology, Swedish University of Agricultural Sciences, Umeå*, 27 S.

- OTTOSSON-LÖFVENIUS, M. (1993c): *Observations of the nocturnal temperature regime in pine shelterwoods and a nearby clear-cut area.* - In: OTTOSSON-LÖFVENIUS, M.: *Temperature and radiation regimes in pine shelterwood and clear-cut area, Ph.D. thesis, Department of Forest Ecology, Swedish University of Agricultural Sciences, Umeå, 19 S.*
- OTTOSSON-LÖFVENIUS, M. & GRANBERG, G. (1993): *Spatial observations of nocturnal net radiation in an open pine shelterwood.* - In: OTTOSSON-LÖFVENIUS, M.: *Temperature and radiation regimes in pine shelterwood and clear-cut area, Ph.D. thesis, Department of Forest Ecology, Swedish University of Agricultural Sciences, Umeå, 23 S.*
- PELTOLA H. & KELLOMÄKI, S. (1993): *A mechanistic model for calculating windthrow and stem breakage of Scot pines at stand edge.* - *Silva Fennica* 27, S. 99-111.
- PELTOLA, H., KELLOMÄKI, S., VÄISÄNEN, H. & IKONEN, V.-P. (1999): *A mechanistic model for assessing the risk of wind and snow damage to single trees and stands of Scots pine, Norway spruce, and birch.* - *Canadian Journal of Forest Research* 29 (6), S. 647-661.
- PELTOLA, H., KELLOMÄKI, S., HASSINEN, A. & GRANANDERA, M. (2000): *Mechanical stability of Scots pine, Norway spruce and birch: an analysis of tree-pulling experiments in Finland.* - *Forest Ecology and Management* 135 (1-3), S. 143-153.
- PELTOLA, H., NYKÄNEN, M.-L. & KELLOMÄKI, S. (1997): *Model computations on the critical combination of snow loading and windspeed for snow damage of Scots pine Norway spruce and birch sp. at stand edge.* - *Forest Ecology and Management* 95, S. 229-241.
- PERRIER, A. (1979): *Physical model to simulate energy exchange of plant canopies.* - In: HALLDIN, S. (Hrsg.): *Comparison of Forest Water and Energy Exchange Models. International Society for Ecological Modelling, Copenhagen, S. 101-113.*
- PERTTU, K. (1970): *Radiation measurements above and in forest.* - *Studia Forestalia Suecica* 72, S. 1-49.
- PERTTU, K., BISHOP, W., GRIP, H., JANSSON, P.-E. LINDGREN, A. LINDROTH, A. & NORÉN, B. (1980): *Micrometeorology and hydrology of pine forest ecosystems. 1. Field studies.* - In: PERSSON, T. (Hrsg.): *Structure and function of northern coniferous forest. - An Ecosystem Study. Ecological Bulletins* 32, S. 75-121.
- PESOLA, V. (1934): *Über die Felsenvegetation in NE-Kuusamo und SE-Kuolajärvi.* - *Annales Botanici Societatis 'Vanamo'* 5 (7), S. 1-18.
- PEUCKER, T. K. & DOUGLAS, D. H. (1975): *Detection of surface-specific points by local parallel processing of discrete terrain elevation data.* - *Computer Graphics and Image Processing* 4, S. 375-387.
- POHTILA, E. (1980): *Climatic fluctuations and forestry in Lapland.* - *Holarctic Ecology* 3, S. 91-98.
- PRÉVOST, M. (1992): *Effets du scarifiage sur les propriétés du sol, la croissance des semis et la compétition: revue des connaissances actuelles et perspectives de recherches au Québec.* - *Annales des Sciences Forestières* 46, S. 273-296.
- QUINE, C. P. & WHITE, I. M. S. (1994): *Using the relationship between rate of tatter and topographic variables to predict site windiness in upland Britain.* - *Forestry* 67, S. 245-256.
- QUINE, C. P. & WHITE, I. M. S. (1998): *The potential of distance-limited topex in the prediction of site windiness.* - *Forestry* 71, S. 325-332.
- QUINN, P., BEVEN, K., CHEVALLIER, P. & PLANCHON, O. (1991): *The prediction of hillslope flow paths for distributed hydrological modeling using Digital Terrain Models.* - *Hydrologic Processes* 5 (1), S. 59-79.

- RAITIO, H. (2000): *Weather conditions during 1989-1995 and tree damage directly attribute to weather.* - In: MÄLKÖNEN, E. (Hrsg.) *Forest condition in a changing environment - the Finnish case.* - *Forestry Sciences, Vol. 65, Dordrecht, Boston, London, S. 41-48.*
- RAVN, H. P. (1985): *Expansion of the populations of Ips typographus (L.) (Coleoptera, Scolytidae) and their local dispersal following gale disaster in Denmark.* - *Zeitschrift für angewandte Entomologie 99 (1), S. 27-33.*
- REIFSNYDER, W. E. (1967): *Radiation geometry in the measurement and interpretation of radiation balance.* - *Agricultural Meteorology 4, S. 255-265.*
- REIFSNYDER, W. K., FURNIVAL, G. M. & HOROWITZ, J. L. (1971/72): *Spatial and temporal distribution of solar radiation beneath forest canopies.* - *Agricultural Meteorology 9, S. 21-37.*
- RICHTER, D. (1995): *Ergebnisse methodischer Untersuchungen zur Korrektur des systematischen Meßfehlers des Hellmann-Niederschlagsmessers.* - *Berichte des deutschen Wetterdienstes 194, Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes, Offenbach, 93 S.*
- ROESCHMANN, G. & LEHMEIER, F. (1993): *Vorschläge zur morphographischen Kennzeichnung des Oberflächenreliefs für punktbezogene geowissenschaftliche Profilaufnahmen (REPA).* - *Geologisches Jahrbuch, F 26, Hannover, 135 S.*
- ROLLERSON, T. P. (1981): *Queen Charlotte Woodlands Division Windthrow Study.* - *MacMillan-Bloedel Limited Woodland Services, Nanaimo, BC, 32 S.*
- ROLLERSON, T. P. & MCGOURLICK, K. (2001): *Riparian Windthrow - Northern Vancouver Island.* - In: MITCHELL, S. J. & RODNEY, J. (Hrsg.): *Proceedings of the Windthrow Researchers Workshop, January 31-February 1, 2001, Richmond, BC., S. 139-156.*
- ROLLERSON, T. P., BEESE, W. J. & PETERS, C. M. (2002): *Variable Retention Windthrow Monitoring Pilot Project 2001-2002, Progress Report.* - *Weyerhaeuser BC Coastal Group, 75 S.*
- ROSÉN, K. (1984): *Effect of clear-felling on runoff in two small watersheds in Central Sweden.* - *Forest Ecology and Management 9, S. 267-281.*
- RUEL, J.-C., MITCHELL, S. J. & DORNIER, M. (2002): *A GIS based approach to map wind exposure for windthrow hazard rating.* - *Northern Journal of Applied Forestry 19 (4), S. 183-187.*
- RUEL, J.-C., PIN, D. & COOPER, K. (2001): *Windthrow in riparian buffer strips: Effect of wind exposure, thinning and strip width.* - *Forest Ecology and Management 143, S. 105-113.*
- RUEL, J.-C., QUINE, C. P., MEUNIER, S. & SUAREZ, J. (2000): *Estimating windthrow risk in balsam fir stands with the ForestGales model.* - *Forestry Chronicle 76, S. 329-337.*
- RUTTER, A. J., KERSHAW, K. A., ROBINS, P. C. & MORTON, A. J. (1971): *A predictive model of rainfall interception in forests. I. Derivation of the model from observations in a plantation of Corsican pine.* - *Agricultural Meteorology 9, S. 367-384.*
- RUUHIJÄRVI, R. (1960): *Über die regionale Einteilung der nordfinnischen Moore.* - *Annales Botanici Societatis 'Vanamo' 31 (1), 360 S.*
- SAARI, V. (1978): *Pohjois-Kuusamon kasviston erikoispiirteistä. (Abstract: Special features of the flora of northern Kuusamo).* - *Acta Universitatis Ouluensis A 68, S. 85-90.*
- SAKAI, A. & LARCHER, W. (1987): *Frost survival of plants - responses and adaptation to freezing stress.* - *Ecological Studies 62, Springer-Verlag, Berlin, S. 39-172.*
- SARVAS, R. (1970): *Temperature sum as a restricting factor in the development of forest in the Subarctic.* - In: *Ecology of the subarctic regions. UNESCO, Proceedings of the Helsinki Symposium 1966, Ecological Conservation 1, S. 79-82.*

- SCHAAB, G. (2000): *Modellierung und Visualisierung der räumlichen und zeitlichen Variabilität der Einstrahlungsstärke mittels eines Geo-Informationssystems*. - *Kartographische Bausteine* 17, Dresden, 160 S.
- SCHROEDER, L. M. & EIDMANN, H. H. (1993): *Attacks of bark- and wood-boring Coleoptera on snow-broken conifers over a two-year period*. - *Scandinavian Journal of Forest Research* 8, S. 257-265.
- SCHWANTZ, S. (1999): *Untersuchungen zu Veränderungen des Standortklimas durch Kompostaufbringung auf landwirtschaftlichen Nutzflächen der Wildeshäuser Geest, Niedersachsen*. - Unveröffentlichte Diplomarbeit, Institut für Geographie, Universität Bremen, 127 S.
- SCHWANTZ, S. (2003): *Untersuchungen zur regionalklimatischen Relevanz von Kahlschlagflächen im Bereich des Oulanka Nationalparks in Nordfinnland*. - *Norden* 15, Beiträge zur geographischen Nordeuropaforschung, S. 87-101.
- SCHWANTZ, S. (2004): *»Ein bisschen Norden, ein Stückchen Osten!« Der Oulanka-Nationalpark, Nordfinnland*. - *Norden* 16, Beiträge zur geographischen Nordeuropaforschung, S. 105-115.
- SCHWEDLER, F. (1993): *Klimatische Differenzierung und dynamische Einordnung Finnlands in die nordeuropäische Klimazone*. - In: ACHENBACH, H. (Hrsg.), *Suomi/Finnland - Naturpotential und Lebensräume im hohen Norden Europas*, Kieler Arbeitspapiere zur Landeskunde und Raumordnung 27, Kiel, S. 32-42.
- SCOTT, R. E. (2005): *Modelling windthrow risk in coastal variable retention using tree, neighbourhood, and stand attributes*. - Thesis, Department of Forest Sciences, The University of British Columbia, 98 S.
- SEIFERT, V. (1979): *Bericht über pedologische Studien im Gebiet der Biologischen Forschungsstation der Universität Oulu (Oulangan biologinen asema) im Oulanka-Nationalpark (Oulangan kansallispuisto), Nordfinnland*. - Gesamthochschule Kassel, Kassel, S. 1-27.
- SEIFERT, V. (1981): *Zur Bodenbildung auf Karbonat unter kalt-borealen Klimabedingungen*. - *Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft* 32, Göttingen, S. 599-608.
- SHIKLOMANOV, I. A. & KRESTOVSKI, O. I. (1988): *The Influence of Forest Reclamation Practice on Streamflow and Water Balance*. - In: EVAN, R. C., REYNOLDS, R. C. & THOMPSON, B., *Forests, Climate and Hydrology, Regional Impacts*, The United Nations University, Tokio, S78-116.
- SILVENNOINEN, A. (1972): *On the stratigraphic and structural geology of the Rukatunturi area, northeastern finland*. - *Geological Survey of Finland, Bulletin* 257, 48 S.
- SILVENNOINEN, A. (1991): *Pre-Quaternary rocks of the Kuusamo and Rukatunturi map-sheet areas (finn.)*. - *Explanation to the maps of pre-quaternary rocks (sheets 4524 +4542 and 4613), Geological map of finland 1:100.000*, Espoo, 62 S.
- SIMONEN, A. (1971): *Das finnische Grundgebirge*. - *Geologische Rundschau* 60, S. 1406-1421.
- SIRÉN, G. (1955): *The development of spruce forest on raw humus sites in Northern Finland and its ecology*. - *Acta Forestalia Fennica* 62, 363 S.
- SKOGSSTYRELSEN (Hrsg.) (2005): *The Storm in Sweden and measures taken by the Swedish forest administration*. - Skogsstyrelsen, National Board of Forestry, 25.01.2005, [http://www.svo.se/episerver4/dokument/sks/stormfakta/allman/Swedish\\_Storm\\_in\\_English.pdf](http://www.svo.se/episerver4/dokument/sks/stormfakta/allman/Swedish_Storm_in_English.pdf), 3 S.
- SLAUGHTER, C. W. (1983): *Summer shortwave radiation at a subarctic forest site*. - *Canadian Journal of Forest Research* 13, Fairbanks, S. 740-746.
- SMITH, V. G., WATTS, M. & JAMES, D. F. (1987): *Mechanical stability of black spruce in the clay belt region of northern Ontario*. - *Canadian Journal of Forest Research* 17, S. 1080-1091.

- SÖDERSTRÖM, M. & MAGNUSSON, B. (1995): *Assessment of local agricultural conditions - a methodology*. - *Agricultural and Forest Meteorology* 72 (3-4), S. 243-260.
- SÖDERSTRÖM, V. (1974): *Markberedning. Summary: Soil Treatment*. - *Sveriges Skogsvårdsförbunds Tidskrift* 72 (1), S. 157-166.
- SÖDERSTRÖM, V. (1975): *Ekologiska verkningar av hyggesplogning. Summary: Ecological effects of ploughing mineral soil before planting on clearfelled areas*. - *Sveriges Skogsvårdsförbunds Tidskrift* 73 (5), S. 443-472.
- SÖDERSTRÖM, V. (1976): *Analys av markberedningseffekterna vid plantering på några färska hyggen. Summary: Analysis of the effects of scarification before planting conifers on some newly clearfelled areas in Sweden*. - *Sveriges Skogsvårdsförbunds Tidskrift* 74 (2-3), S. 59-333.
- SOKOLLEK, V. (1985): *Hydrologische Forschung im Nadelwald Nordschwedens*. - *DFG-Bericht, Gießen*, 26 S.
- SOLANTIE, R. (1975): *Talvikauden sademäärän ja maaliskuun lumensyvyiden alueellinen jakautuma Suornessa (Summary: The areal distribution of winter precipitation and snow depth in March in Finland)*. - *Ilmatieteen laitoksen tiedonantoja* 28, S. 1-66.
- SOLANTIE, R. (1998): *Lämpö-, sade- ja tuuliolot*. - In: Mälikönen, E. (Hrsg.): *Ympäristömuutos ja metsien kunto. Metsien terveydentilan tutkimusohjelman loppuraportti. Finnish Forest Research Institute. Research Papers* 691, S. 39-46.
- SOLANTIE, R. K. & JOUKOLA, M. P. J. (2001): *Evapotranspiration 1961-1990 in Finland as function of meteorological and land-type factors*. - *Boreal Environment Research* 6, S. 261-273.
- SÖYRINKI, N. & SAARI, V. (1980): *Die Flora im Nationalpark Oulanka, Finnland*. - *Acta Botanica Fennica* 114, Helsinki, 150 S.
- SÖYRINKI, N., SALMELA, R. & SUVANTO, J. (1977): *The Forest and Mire Vegetation of the Oulanka Nationalpark, Northern Finland*. - *Acta Forestalia Fennica* 154, Helsinki, 150 S.
- STATHERS, R. J., ROLLERSON, T. P., & MITCHELL, S. J. (1994): *Windthrow handbook for British Columbia forests*. - *B.C. Min. For., Victoria, B.C. Working Paper* 9401, 32 S.
- STEINECKE, K. (1995): *Stadtökologische Untersuchungen in Reykjavik, Island*. - *Essener Ökologische Schriften* 7, Essen, 289 S.
- STONER, W. A., MILLER, P. C. & MILLER, P. M. (1978): *A test of a model of irradiance within vegetation canopies at northern latitudes*. - *Arctic and Alpine Research* 10 (4), S. 761-767.
- STRAND, M. & LUNDMARK, T. (1987): *Effects of low night temperature and light on chlorophyll fluorescence of field-grown seedlings of Scots pine*. - *Tree Physiology* 3, S. 211-224.
- SUÁREZ-MINGUEZ, J. C., GARDINER, B. A. & QUINE, C. P. (1999): *A comparison of methods for predicting wind speeds in complex forested terrain*. - *Meteorological Applications* 6, S. 1-14.
- SUTTON, R. F. (1993): *Mounding site preparation: a review of European and North American experience*. - *New Forests* 7, S. 151-192.
- SWANSON, R. H. (1986): *Microclimate in the Establishment, Growth, and Development of Man-Made Forests*. - In: MacIVER, D. C., STREET, R. B. & AUCLAIR, A. N. (Eds.): *Climate applications in forest renewal and forest production - Proceedings of forest climate 1986, Nov. 17-20, 1986 Geneva Park, Ovilla, Ontario*, S. 139-144.
- SZEICZ, G., PETZOLD, D. E. & WILSON, R. G. (1979): *Wind in the Subarctic Forest*. - *Journal of Applied Meteorology* 18, S. 1268-1274.

- TAJCHMAN, S. J. (1972): *The radiation and energy balances of coniferous and deciduous forests.* - *Journal of Applied Ecology* 9 (2), S. 359-375.
- TALKKARI, A., PELTOLA, H., KELLOMÄKI, S. & STRANDMAN, H. (2000): *Integration of component models from the tree, stand and regional levels to assess the risk of wind damage at forest margins.* - *Forest Ecology and Management* 135 (1-3), S. 303-313.
- TAMMELIN, B. (1991): *Finnish Wind Atlas (summary in English), National NEMO Wind Energy Programme.* - Finnish Meteorological Institute, Helsinki, Finland, 356 S.
- TARBOTON, D. G. (1997): *A new method for the determination of flow directions and contributing areas in grid digital elevation models.* - *Water Resources Research* 33 (2), S. 309-319.
- TEIVAINEN, L. (1952): *Pohjois-Suomen tuoreiden kangasmetsien kasvillisuudesta: Über die Vegetation der frischen Heidewälder in Nordfinland.* - *Annales Botanici Societatis 'Vanamo'* 25 (2), Helsinki., S. 1-168.
- THIEKEN, A. H., LUCKE, A., DIEKKRUGER, B. & RICHTER, O. (1999): *Scaling input data by GIS for hydrological modeling.* - *Hydrological Processes* 13, S. 611-630.
- THIERMANN, A. (2000): *Entwicklung einer GIS-gestützten Methode zur Ermittlung winderosionsgefährdeter Gebiete in Niedersachsen.* - Unveröff. Diplomarbeit, Universität Bremen, Institut für Geographie.
- THIES CLIMA (Hrsg.) (1992): *Temperaturgeber, Bedienungsanleitung 2.1235.00.000.* - Adolf Thies GmbH & Co.KG, 020749/12/92, Göttingen, 1 S.
- THIES CLIMA (Hrsg.) (1993): *Windgeber, Bedienungsanleitung 4.3303.10.000.* - Adolf Thies GmbH & Co.KG, 020752/01/93, Göttingen, 6 S.
- THIES CLIMA (Hrsg.) (1996): *Niederschlagsgeber, Bedienungsanleitung 5.4032.30.008.* - Adolf Thies GmbH & Co.KG, 020762/10/96, Göttingen, 4 S.
- THIES CLIMA (Hrsg.) (1995a): *Pyranometer CM 3, Bedienungsanleitung 7.1415.03.000.* - Adolf Thies GmbH & Co.KG, 020844/10/95, Göttingen, 2 S.
- THIES CLIMA (Hrsg.) (1995b): *Strahlungsbilanzgeber, Bedienungsanleitung 7.1415.10.000.* - Adolf Thies GmbH & Co.KG, 020611/01/95, Göttingen, 4 S.
- THIES CLIMA (Hrsg.) (1997a): *Hygro-Thermogeber-compact, Bedienungsanleitung 1.1005.54.141.* - Adolf Thies GmbH & Co.KG, 020887/02/97, Göttingen, 4 S.
- THIES CLIMA (Hrsg.) (1997b): *Kombinierter Windgeber, Bedienungsanleitung 4.336.31.000/001.* - Adolf Thies GmbH & Co.KG, 020907/01/97, Göttingen, 6 S.
- THIES CLIMA (Hrsg.) (1997c): *Datalogger DL 15 V. 2.01 - Dokumentation/Bedienungsanleitung.* - Adolf Thies GmbH & Co.KG, 759.0 Kn D3.08/97, Göttingen, 34 S.
- THOMPSON, J. A., BELL, J. C. & BUTLER, C. A. (2001): *Digital Elevation Model Resolution: Effects on Terrain Attribute Calculation and Quantitative Soil-Landscape Modeling.* - *Geoderma*, 100, S. 67- 89.
- THOMPSON, W. F. (1969): *A test of the Holdridge system at the subarctic timberlines.* - *Proceedings of the Association of American Geographers* 1, S. 149-153.
- THORNTHWAITE, C. W. (1931): *The climates of North America according to a new classification.* - *Geographical Review* 23, S. 433-440.
- TOKOLA, T. (2000): *The Influence of Field Sample Data Location on Growing Stock Volume Estimation in Landsat TM-Based Forest Inventory in Eastern Finland.* - *Remote Sensing of Environment* 74 (3), S. 422-431.

- TOKOLA, T. & HEIKKILÄ, J. (1997): *Improving satellite image based forest inventory by using a priori site quality information.* - *Silva Fennica* 31, S. 67-78.
- TOLVANEN, A. & KUBIN, E. (1990): *The effect of clear felling and site preparation on microclimate, soil frost and forest regeneration at elevated sites in Kuusamo.* - *Aquilo Series Botanica* 29, S. 77-86.
- TOMPPU, E. (1990): *Satellite Image-Based National Forest Inventory of Finland.* - *The Photogrammetric Journal of Finland* 12 (1), Helsinki, S. 115-120.
- TOMPPU, E. (1991): *Satellite image-based national forest inventory of Finland.* - In: *Proceedings of the symposium on global and environmental monitoring, techniques and impacts, 17-21 Sept. 1990, Victoria, British Columbia, Canada. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing* 28, S. 419-424.
- TOMPPU, E. (1993): *Multi-source National Forest Inventory of Finland.* - *Proceedings of Ilvessalo Symposium on National Forest Inventories, Finland 17-21 August 1992*, S. 52-60.
- TOMPPU, E. (1996): *Multi-source national forest inventory of Finland. New thrusts in forest inventory.* - In: PÄIVINEN, R., VANCLAY, J. AND MIINA, S., (Eds), (1996): *New thrusts in forest inventory. Proceedings of IUFRO XX World Congress, 6-12 Aug. 1995, Tampere, Finland, European Forest Institute, Joensuu, Finland*, S. 27-41.
- TOMPPU, E. (2000): *National Forest Inventory of Finland and its role estimating the carbon balance of forests.* - *Biotechnology, Agronomy, Society and Environment* 4 (4), S. 281-284.
- TOMPPU, E. & HEIKKINEN, J. (1999): *National Forest Inventory of Finland - past, present and future.* - In: ALHO, J. (Ed.). *Statistics, registries, and science. Experiences from Finland*, Statistics Finland, S. 89-108.
- TOMPPU, E., HENTTONEN, H., KORHONEN, K. T., AARNIO, A., AHOLA, A., HEIKKINEN, J., IHALAINEN, A., MIKKELÄ, H., TONTERI, T. & TUOMAINEN, T. (1998): *Etelä-Pohjanmaan metsäkeskuksen alueen metsävarat ja niiden kehitys 1968-97.* - *Folia Forestalia* 2B, in Finnish, S. 293-374.
- TRANQUILLINI, W. (1979): *Physiological ecology of the alpine timberline.* - *Ecological Studies* 31, Springer Verlag, Heidelberg, New York, 137 S.
- TRETER, U. (1993): *Die borealen Waldländer.* - Westermann, Braunschweig, 210 S.
- TROEN, I. & PETERSEN, E. L. (1989): *European Wind Atlas.* - Riso National Laboratory, Roskilde, Denmark, 656 S.
- TROLL, C. & PAFFEN, K. H. (1964): *Karte der Jahreszeitenklimate der Erde.* - *Erdkunde*, 18, Bonn, S. 5-28.
- TROLL, C. & PAFFEN, K. H. (1964): *Karte der Jahreszeitenklimate der Erde.* - *Erdkunde*, 18, Bonn, S. 5-28.
- TVEITO, O. E., FØRLAND, E. J., ALEXANDERSSON, H., DREBS, A., JONSSON, T. & VAARBYLAURSEN, E. (2001): *Nordic climate maps.* - DNMI-Report 06/2001, Norwegian Meteorological Institute, Oslo, 28 S.
- TVEITO, O. E., FØRLAND, E., HEINO, R., HANSEN-BAUER, I., ALEXANDERSSON, H., DAHLSTRÖM, B., DREBS, A., KERN-HANSEN, C., JÓNSSON, T., VAARBYLAURSEN, E. & WESTMAN, Y. (2000): *Nordic temperature maps.* - DNMI-Report 09/2000, Norwegian Meteorological Institute, Oslo, 54 S.
- ULANOVA, N. G. (2000): *The effects of windthrow on forests at different spatial scales: a review.* - *Forest Ecology and Management* 135 (1-3), S. 155-167.

- VAARTAJA, O. (1954): *Temperature and evaporation at and near ground level on certain forest sites.* - *Canadian Journal of Botany* 32, S. 760-783.
- VALES, D. J. & BUNNELL, F. L. (1988): *Relationships between transmission of solar radiation and coniferous forest stand characteristics.* - *Agricultural and Forest Meteorology* 43, S. 201-223.
- VAN EIMERN, J. & HÄCKEL, H. (1984): *Wetter- und Klimakunde. Ein Lehrbuch der Agrarmeteorologie.* - Ulmer, Stuttgart, 275 S.
- VASARI, Y. (1990): *The ecological background of the livelihood of peasants in Kuusamo (NE Finland) during the period 1670-1970.* - In: BRIMBLECOMBE, P. & PFISTER, C. (Eds.): *The Silent Countdown*, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, S. 125-134.
- VASARI, Y. (1999): *Paanajärvi - Oulanka valley - a pathway across the northern taiga.* - *Fennia* 177 (1), S. 1-2.
- VENN, K. & SOLHEIM, H. (1990): *Drought of spruce trees in frozen soils in Norway.* - *Aquilo Series Botanica* 29, S. 87-90.
- VENZKE, J.-F. (1990): *Beiträge zur Geoökologie der borealen Landschaftszone. Geländeklimatologische und pedologische Studien in Nord-Schweden.* - *Essener Geographische Arbeiten* 21, Paderborn, 254 S.
- VÉZINA, P. E. & PÉCH, G. Y. (1964): *Solar radiation beneath conifer canopies in relation to crown closure.* - *Forest Science* 10, S. 443-451.
- VIRAMO, J. (1995): *The Koillismaa Region - A chunk of the north, a piece of the east.* - *Aktuumi* 4, Oulu, S. 8-11.
- VIRAMO, J. (o. D.): *Nationalpark Oulanka - ein bißchen Norden, ein Stückchen Osten.* - *Informationsblatt der Biologischen Forschungsstation Oulanka*, 4 S.
- VUORELA, A. (1992): *Maankiyytd- ja puustotulkinnan kehittämisestä maanmittaushallituksessa (On developing the land cover and forest classification in the National Board of Survey).* - *M.Sc. thesis, Helsinki University of Technology (in Finnish).*
- VUORELA, A. (1997): *Satellite image based land cover and forest classification of Finland.* - *Reports of the Finnish Geodetic Institute* 97 (2), S. 42-52.
- WAGNER, S. & NAGEL, J. (1992): *Ein Verfahren zur PC-gesteuerten Auswertung von Fisheye-Negativ-Photos für Strahlungsschätzungen.* - *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung* 163, Jg. 6, S. 110-116.
- WALLÉN, C. C. (1974): *Das Klima.* - In: SÖMME, A. (Hrsg.): *Die nordischen Länder*, Braunschweig, S. 52-63.
- WEISCHET, W. (1991): *Einführung in die Allgemeine Klimatologie.* - Teubner, Stuttgart, 275 S.
- WELLNER, C. A. (1948): *Light intensity related to stand density in mature stands of the western white pine type.* - *Journal of Forestry* 46, S. 16-19.
- WENDLING, U., SCHELLIN, H.-G. & THOMÄ, M. (1991): *Bereitstellung von täglichen Informationen zum Wasserhaushalt des Bodens für die Zwecke der agrarmeteorologischen Beratung.* - *Zeitschrift für Meteorologie* 41 (6), S. 468-475.
- WILSON, J. D. (1984): *Determining a topex score.* - *Scottish Forestry* 38, S. 251-256.
- WINDHORST, H.-W. (1979): *Neuere Versuche der Bestimmung der Primärproduktion der Wälder und forstlicher Ertragspotentiale.* - *Erdkunde* 33, S. 10-23.
- WOLOCK, D. M. & PRICE, C. V. (1994): *Effects of digital elevation model map scale and data resolution on a topography based watershed model.* - *Water Resources Research* 30, S. 3041-3052.

- WYSZKOWSKI, A. (1987): *Microclimatic temperature characteristics around the Oulanka Biological Station, NE Finland*. - *Oulanka Reports* 7, Oulu, S. 3-24.
- YAMADA, T. (1981): *A numerical simulation of nocturnal drainage flow*. - *Journal of the Meteorological Society of Japan* 59, S. 108-122.
- YAMADA, T. (1983): *Simulation of nocturnal drainage flows by a q2l turbulence closure model*. - *Journal of Atmospheric Sciences* 40 (1), S. 91-106.
- YERG, D. G. (1990): *Low-frequency wind fluctuations within an irregular forest*. - *Agricultural and Forest Meteorology* 51, S. 123-144.
- YLI-VAKKURI, P. (1963): *Kokeellisia tutkimuksia taimien syntymisestä ja ensi kehityksestä kuusikoissa ja männiköissä. Summary: Experimental studies on the emergence and initial development of tree seedlings in spruce and pine stands*. - *Acta Forestalia Fennica* 75, 122 S.
- YRJÖLÄ, T. (2002): *Forest Management Guidelines and Practices in Finland, Sweden and Norway*. - *European Forest Institute, Internal Report 11, 2002, 46 S.*
- ZHANG, W. & MONTGOMERY, D. R. (1994): *Digital elevation model grid size, landscape representation, and hydrological simulations*. - *Water Resources Research* 30, S. 1019-1028.

## 8.2 Kartengrundlagen

- NLS - NATIONAL LAND SURVEY OF FINLAND (Hrsg.) (1998): *Topografinen kartta 1:50:000, 4613 Rukatunturi, Maastokartta*.

## 8.3 Datengrundlagen

- DUNDEE SATELLITE RECEIVING STATION (Hrsg.) (1999a): *Quicklooks for AVHRR-Scene, 7.8.1999, 1242 UTC, Chn. 7*. - <http://www.sat.dundee.ac.uk/>
- DUNDEE SATELLITE RECEIVING STATION (Hrsg.) (1999b): *Quicklooks for AVHRR-Scene, 8.8.1999, 1230 UTC, Chn. 7*. - <http://www.sat.dundee.ac.uk/>
- DUNDEE SATELLITE RECEIVING STATION (Hrsg.) (1999c): *Quicklooks for AVHRR-Scene, 7.8.1999, 1219 UTC, Chn. 7*. - <http://www.sat.dundee.ac.uk/>
- DUNDEE SATELLITE RECEIVING STATION (Hrsg.) (2000a): *Quicklooks for AVHRR-Scene, 26.7.2000, 1349 UTC, Chn. 7*. - <http://www.sat.dundee.ac.uk/>
- DUNDEE SATELLITE RECEIVING STATION (Hrsg.) (2000b): *Quicklooks for AVHRR-Scene, 27.7.2000, 1337 UTC, Chn. 7*. - <http://www.sat.dundee.ac.uk/>
- DUNDEE SATELLITE RECEIVING STATION (Hrsg.) (2000c): *Quicklooks for AVHRR-Scene, 28.7.2000, 1325 UTC, Chn. 7*. - <http://www.sat.dundee.ac.uk/>
- GSF - GEOLOGICAL SURVEY OF FINLAND (Hrsg.) (1999): *Bedrock Map 1:100 000, Sheet 4613 Rukatunturi, ArcView Shape-format*
- NCDC (Hrsg.) (1999): *The Global Historical Climatology Network (GHCN)*. - <http://www.ncdc.noaa.gov/>
- NCDC (Hrsg.) (2000): *The Global Historical Climatology Network (GHCN)*. - <http://www.ncdc.noaa.gov/>
- NLS - NATIONAL LAND SURVEY OF FINLAND (Hrsg.) (1999a): *Digital Elevation Model - Nationwide elevation dataset, Datensatz für den Raum des Kartenblatts 4613 (1:50000)*
- NLS - NATIONAL LAND SURVEY OF FINLAND (Hrsg.) (1999b): *Land Cover and Forest Classification, Datensatz für den Raum des Kartenblatts 4613 (1:50000)*.

- NLS - NATIONAL LAND SURVEY OF FINLAND (Hrsg.) (1999c): NLS Topographic database, administrative boundaries, transmission and transport networks, nomenclature, cultivated areas, man-made structures, boglands, roads and waters, Datensatz für den Raum des Kartenblatts 4613 (1:50000)
- NLS - NATIONAL LAND SURVEY OF FINLAND (Hrsg.): (2000): Arkistokappale N:o 92M9202. - Dokumentation zum Trigonometrischen Punkt Nr. 92M9202, 1 S.
- NOAA AIR RESOURCES ARCHIVE (Hrsg.) (1999a): FNL-Archive, Wind-Vectors 00 UTC 29 Jun 1999. - National Oceanic & Atmospheric Administration (NOAA) ARL PLOT-Meteorological Mapping, <http://www.arl.noaa.gov/ready/amet.html>.
- NOAA AIR RESOURCES ARCHIVE (Hrsg.) (1999b): FNL-Archive, Wind-Vectors 00 UTC 06 Sep 1999. - National Oceanic & Atmospheric Administration (NOAA) ARL PLOT-Meteorological Mapping, <http://www.arl.noaa.gov/ready/amet.html>.
- NOAA AIR RESOURCES ARCHIVE (Hrsg.) (1999c): FNL-Archive, Wind-Vectors 00 UTC 06 Aug 1999. - National Oceanic & Atmospheric Administration (NOAA) ARL PLOT-Meteorological Mapping, <http://www.arl.noaa.gov/ready/amet.html>.
- NOAA AIR RESOURCES ARCHIVE (Hrsg.) (1999d): FNL-Archive, Wind-Vectors 00 UTC 07 Aug 1999. - National Oceanic & Atmospheric Administration (NOAA) ARL PLOT-Meteorological Mapping, <http://www.arl.noaa.gov/ready/amet.html>.
- NOAA AIR RESOURCES ARCHIVE (Hrsg.) (1999e): FNL-Archive, Wind-Vectors 00 UTC 09 Aug 1999. - National Oceanic & Atmospheric Administration (NOAA) ARL PLOT-Meteorological Mapping, <http://www.arl.noaa.gov/ready/amet.html>.
- NOAA AIR RESOURCES ARCHIVE (Hrsg.) (2000a): FNL-Archive, Wind-Vectors 00 UTC 30 Jul 2000. - National Oceanic & Atmospheric Administration (NOAA) ARL PLOT-Meteorological Mapping, <http://www.arl.noaa.gov/ready/amet.html>.
- NOAA AIR RESOURCES ARCHIVE (Hrsg.) (2000b): FNL-Archive, Wind-Vectors 00 UTC 05 Aug 2000. - National Oceanic & Atmospheric Administration (NOAA) ARL PLOT-Meteorological Mapping, <http://www.arl.noaa.gov/ready/amet.html>.
- NOAA AIR RESOURCES ARCHIVE (Hrsg.) (2000c): FNL-Archive, Wind-Vectors 00 UTC 26 Jul 2000. - National Oceanic & Atmospheric Administration (NOAA) ARL PLOT-Meteorological Mapping, <http://www.arl.noaa.gov/ready/amet.html>.
- NOAA AIR RESOURCES ARCHIVE (Hrsg.) (2000d): FNL-Archive, Wind-Vectors 00 UTC 25 Jul 2000. - National Oceanic & Atmospheric Administration (NOAA) ARL PLOT-Meteorological Mapping, <http://www.arl.noaa.gov/ready/amet.html>.
- UNECE/FAO (UNITED NATIONS ECONOMIC COMMISSION FOR EUROPE/FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS) (2005): Timber Committee Forest Products Statistics, Forest Products Statistics 2000-2004. - <http://www.unece.org/trade/timber/mis/fp-stats.htm>.
- USGS - UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (Hrsg.) (2000): Landsat 7 ETM+ Scene, 26.7.2000, Path 188, Row 014, Level 1, Sioux Falls, South Dakota. - <http://glcf.umiacs.umd.edu/>

## 8.4 Weitere Quellen

- FORSVIK, E. (2005): Erläuterungen zur Erstellung des DHM in Finnland. - Schriftliche Mitteilung (Mitarbeiterin des NLS).

- HUTTUNEN, A. (2002): *Erhebung aus Probebohrungen. - Mündliche Mitteilung (Mitarbeiter der Forschungsstation Oulanka).*
- METLA (Hrsg.) (2005): *The variables measured in the Finnish NFI. - <http://www.metla.fi/hanke/3401/vmi-muuttujat-en.htm>.*
- MITCHELL, S. J., LANQUAYE-OPOKU, N., BYRNE, K. & NISHIO, G. (2005): *TOPEX-Script. - <http://faculty.forestry.ubc.ca/mitchell/downloads/topexscript.zip>.*
- MYLLYS, H. (2002): *Ergänzende Informationen zu den Daten des finnischen Wetterdienstes. - Schriftliche Mitteilung (Mitarbeiterin des FMI).*
- NLS - NATIONAL LAND SURVEY OF FINLAND (Hrsg.) (2005): *NLS Topographic database, <http://www.maanmittauslaitos.fi/default.asp?id=488#A1>.*

---

## 9 Anhang

Im Rahmen dieser geländeklimatologischen Untersuchung wurden etwa 875000 Datenwerte erhoben. Eine Darstellung konnte vor diesem Hintergrund nur auszugsweise in Form von Tabellen und Abbildungen im Textteil bzw. im Anhang erfolgen. Interessenten können die Messdaten ggf. unter nachstehender Adresse beziehen.

Steffen Schwantz  
AG Venzke, UFT, Institut für Geographie  
Leobenerstraße  
Universität Bremen  
28359 Bremen  
Tel. +49 (0)421 218-7401 (Sekretariat)  
Fax +49 (0)421 218-9265 (Sekretariat)  
[schwantz@uni-bremen.de](mailto:schwantz@uni-bremen.de)

## 9.1 Tabellen

Tab. 27: Übersicht der Versuchsflächen Altbestand, Kahlschlag und Aufforstung

Vermessung der Versuchsflächen	Altbestand	Kahlschlag	Aufforstung
Aufnahmebereich [m <sup>2</sup> ]	2602,6	2894,0	2438,1
mittlere Höhe [m] (Vermessung)	282,4	294,2	272,4
mittlere Höhe [m] (GRID)	282,1	293,9	272,5
mittlere Hangneigung [°] (GRID)	10,9	9,5	14,6
mittlere Exposition [°] (GRID)	237,7	230,4	192,3
Anzahl Bäume (Baumschicht > 2 m)	253	44	631
Stämme ha <sup>-1</sup>	972	152	2588
mittlere Baumhöhe [m]	7,1	4,7	4,7
maximale Baumhöhe [m]	19,3	15,2	8,4
mittlere Baumhöhe [s]	4,6	3,7	1,2
Holzvolumen [m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup> ]*	85,9	6,5	33,7
Artenanteile Baumschicht	[%]	[%]	[%]
<i>Betula spec.</i>	34,5	53,5	24,4
<i>Picea abies</i>	30,2	18,6	2,9
<i>Pinus sylvestris</i>	11,5	-	70,5
<i>Salix spec.</i>	10,3	23,3	0,5
<i>Juniperus communis</i>	6,0	-	0,2
<i>Populus tremula</i>	3,6	2,3	0,3
Baum (tot)	3,2	2,3	-
<i>Sorbus aucuparia</i>	0,4	-	1,3
Artenanteile Strauchschicht	[%]	[%]	[%]
<i>Juniperus communis</i>	87,5	3,8	19,4
<i>Sorbus aucuparia</i>	2,8	3,2	9,9
<i>Salix spec.</i>	2,6	4,8	15,3
<i>Pinus sylvestris</i>	2,5	51,6	3,5
<i>Betula spec.</i>	1,8	15,6	46,2
<i>Populus tremula</i>	1,8	6,5	-
<i>Picea abies</i>	1,1	14,5	5,6

\*nach LAASASENAHO (1982)

Tab. 28: Vermessungsdaten der Wetterstation, der Lage der Messwertgeber und der Niederschlagssammler im Altbestand

Messpunkt	Rechtswert [m]	Hochwert [m]	Höhe [m]	Antenne [m]	Typ
ALT-ST	4471737,85	7360783,42	282,85	2,6	Station
ALT-01	4471737,42	7360788,65	283,00	1,5	N-Sammler
ALT-02	4471737,12	7360794,22	282,94	1,5	N-Sammler
ALT-03	4471734,90	7360800,67	282,48	2,0	N-Sammler
ALT-04	4471736,10	7360808,06	282,93	1,5	N-Sammler
ALT-05	4471734,55	7360814,90	283,07	2,5	N-Sammler
ALT-06	4471731,76	7360784,99	282,37	2,5	N-Sammler
ALT-07	4471725,34	7360787,14	281,42	2,5	N-Sammler
ALT-08	4471717,94	7360788,50	280,29	2,5	N-Sammler
ALT-09	4471708,81	7360792,29	279,07	2,0	N-Sammler
ALT-10	4471704,09	7360792,31	278,11	2,0	N-Sammler
ALT-11	4471732,49	7360780,44	282,29	2,0	N-Sammler
ALT-12	4471725,73	7360776,42	281,06	2,5	N-Sammler
ALT-13	4471720,17	7360772,21	280,43	2,0	N-Sammler
ALT-14	4471715,74	7360770,33	279,70	2,5	N-Sammler
ALT-15	4471710,14	7360767,39	278,11	2,0	N-Sammler
ALT-16	4471737,91	7360776,82	282,49	2,0	N-Sammler
ALT-17	4471737,90	7360771,72	282,42	2,0	N-Sammler
ALT-18	4471736,94	7360763,10	281,39	2,0	N-Sammler
ALT-19	4471737,83	7360757,02	281,07	2,0	N-Sammler
ALT-20	4471742,46	7360748,50	281,09	2,0	N-Sammler
ALT-21	4471742,09	7360779,78	282,84	2,0	N-Sammler
ALT-22	4471747,58	7360776,28	282,99	2,0	N-Sammler
ALT-23	4471753,54	7360771,04	283,66	2,0	N-Sammler
ALT-24	4471760,22	7360765,60	284,32	2,0	N-Sammler
ALT-25	4471767,61	7360763,16	284,86	2,0	N-Sammler
ALT-26	4471741,77	7360785,76	283,19	2,0	N-Sammler
ALT-27	4471745,69	7360789,07	283,53	2,0	N-Sammler
ALT-28	4471750,07	7360790,62	284,15	2,0	N-Sammler
ALT-29	4471757,95	7360790,38	284,93	2,5	N-Sammler
ALT-30	4471762,15	7360793,43	285,85	2,0	N-Sammler
ALT-NW	4471695,49	7360821,50	277,36	2,5	Eckpunkt
ALT-NE	4471777,80	7360822,60	286,94	2,5	Eckpunkt
ALT-SW	4471695,67	7360736,46	272,73	2,5	Eckpunkt
ALT-SE	4471779,27	7360733,07	282,71	2,5	Eckpunkt
ALT-BT	4471739,58	7360785,55	282,85	-	Geber
ALT-EOT	4471736,66	7360781,88	282,85	-	Geber
ALT-NS	4471735,90	7360787,59	282,85	-	Geber

Tab. 29: Vermessungsdaten der Wetterstation, der Lage der Messwertgeber und der Niederschlagsammler auf der Kahlschlagfläche

Messpunkt	Rechtswert [m]	Hochwert [m]	Höhe [m]	Antenne [m]	Typ
KAS-ST	4471779,25	7360910,65	295,05	2,0	Station
KAS-01	4471788,20	7360910,02	295,52	1,5	N-Sammler
KAS-02	4471794,16	7360908,75	295,65	1,5	N-Sammler
KAS-03	4471799,65	7360908,64	295,92	1,5	N-Sammler
KAS-04	4471806,63	7360907,96	296,67	1,5	N-Sammler
KAS-05	4471813,45	7360905,53	298,35	1,5	N-Sammler
KAS-06	4471781,59	7360904,81	295,42	1,5	N-Sammler
KAS-07	4471783,95	7360899,92	295,15	2,0	N-Sammler
KAS-08	4471786,18	7360894,57	295,25	2,0	N-Sammler
KAS-09	4471788,88	7360887,11	295,20	2,0	N-Sammler
KAS-10	4471793,97	7360877,38	295,28	2,0	N-Sammler
KAS-11	4471774,12	7360908,11	294,48	2,0	N-Sammler
KAS-12	4471769,47	7360906,38	293,46	2,0	N-Sammler
KAS-13	4471762,21	7360903,43	290,54	2,0	N-Sammler
KAS-14	4471758,30	7360899,86	290,32	2,0	N-Sammler
KAS-15	4471748,90	7360894,46	289,54	2,0	N-Sammler
KAS-16	4471774,47	7360913,51	294,37	2,0	N-Sammler
KAS-17	4471770,00	7360913,85	293,06	2,0	N-Sammler
KAS-18	4471762,29	7360915,28	291,45	2,0	N-Sammler
KAS-19	4471756,16	7360916,44	291,46	2,0	N-Sammler
KAS-20	4471745,38	7360918,64	291,28	2,0	N-Sammler
KAS-21	4471775,40	7360918,38	294,32	2,0	N-Sammler
KAS-22	4471771,57	7360922,26	292,33	2,0	N-Sammler
KAS-23	4471769,45	7360930,01	292,96	2,0	N-Sammler
KAS-24	4471764,44	7360940,02	292,84	2,0	N-Sammler
KAS-25	4471755,54	7360949,56	293,54	2,0	N-Sammler
KAS-26	4471784,79	7360915,88	295,11	2,0	N-Sammler
KAS-27	4471787,00	7360924,95	293,70	2,0	N-Sammler
KAS-28	4471794,50	7360932,48	294,10	2,0	N-Sammler
KAS-29	4471798,23	7360943,10	294,80	2,0	N-Sammler
KAS-30	4471799,01	7360951,37	294,97	2,0	N-Sammler
KAS-NW	4471743,41	7360954,68	294,03	2,0	Eckpunkt
KAS-NE	4471823,06	7360952,03	297,56	2,5	Eckpunkt
KAS-SW	4471741,85	7360876,00	288,17	2,5	Eckpunkt
KAS-SE	4471816,22	7360871,53	298,38	2,5	Eckpunkt
KAS-BT	4471776,18	7360910,22	295,05	-	Geber
KAS-EOT	4471779,88	7360912,37	295,05	-	Geber
KAS-NS	4471781,63	7360912,64	295,05	-	Geber

Tab. 30: Vermessungsdaten der Wetterstation, der Lage der Messwertgeber und der Niederschlagssammler im Aufforstungsbestand

Messpunkt	Rechtswert [m]	Hochwert [m]	Höhe [m]	Antenne [m]	Typ
AUF-ST	4470855,57	7360909,74	272,89	2,6	Station
AUF-01	4470856,93	7360908,26	273,19	2,5	N-Sammler
AUF-02	4470859,34	7360905,04	273,29	2,5	N-Sammler
AUF-03	4470862,72	7360901,08	273,10	2,5	N-Sammler
AUF-04	4470865,32	7360897,28	272,85	2,5	N-Sammler
AUF-05	4470868,44	7360894,14	272,31	2,0	N-Sammler
AUF-06	4470862,38	7360909,25	274,00	2,5	N-Sammler
AUF-07	4470867,91	7360910,47	274,45	2,5	N-Sammler
AUF-08	4470873,57	7360911,25	274,37	2,5	N-Sammler
AUF-09	4470880,11	7360912,43	274,57	2,5	N-Sammler
AUF-10	4470885,73	7360913,23	274,24	2,5	N-Sammler
AUF-11	4470859,53	7360912,70	273,54	2,5	N-Sammler
AUF-12	4470858,96	7360918,22	273,62	2,5	N-Sammler
AUF-13	4470861,10	7360923,70	274,21	2,5	N-Sammler
AUF-14	4470864,41	7360930,30	274,67	2,5	N-Sammler
AUF-15	4470865,32	7360934,90	275,01	2,5	N-Sammler
AUF-16	4470851,04	7360916,11	273,14	2,5	N-Sammler
AUF-17	4470847,66	7360922,14	273,61	2,5	N-Sammler
AUF-18	4470843,39	7360928,34	274,45	2,5	N-Sammler
AUF-19	4470839,11	7360933,11	274,87	2,5	N-Sammler
AUF-20	4470835,26	7360936,90	275,14	2,5	N-Sammler
AUF-21	4470852,18	7360907,45	272,45	2,5	N-Sammler
AUF-22	4470847,81	7360904,43	271,47	2,5	N-Sammler
AUF-23	4470842,19	7360898,56	270,56	2,5	N-Sammler
AUF-24	4470836,80	7360892,43	269,76	2,5	N-Sammler
AUF-25	4470829,08	7360887,96	268,38	2,5	N-Sammler
AUF-26	4470853,70	7360904,00	272,77	2,5	N-Sammler
AUF-27	4470852,46	7360896,17	271,50	2,5	N-Sammler
AUF-28	4470853,39	7360887,91	269,96	2,5	N-Sammler
AUF-29	4470853,52	7360879,25	268,51	2,5	N-Sammler
AUF-30	4470852,19	7360872,43	267,11	2,0	N-Sammler
AUF-NW	4470818,60	7360946,78	275,71	2,5	Eckpunkt
AUF-NE	4470897,04	7360943,15	276,33	2,5	Eckpunkt
AUF-SW	4470819,51	7360864,89	265,05	2,5	Eckpunkt
AUF-SE	4470896,68	7360872,79	266,44	2,5	Eckpunkt
AUF-BT	4470852,87	7360909,11	272,89	-	Geber
AUF-EOT	4470852,12	7360909,19	272,89	-	Geber
AUF-NS	4470852,32	7360910,31	272,89	-	Geber

Tab. 31: Übersicht der Datenausfälle während der geländeklimatologischen Messungen 1999 und 2000

Versuchs- fläche	Messwert	Beginn	Ende	Zeitraum [h:min.]	Bearbeitung
AUF	Niederschlag, Sammler 8	*08.07.1999		-	interpoliert
KAS	Niederschlag, Sammler 8	*25.07.1999		-	interpoliert
ALT	Niederschlag, Sammler 8	*02.08.1999		-	interpoliert
KAS	Niederschlag, Sammler 6	*29.08.1999		-	interpoliert
ALT	Niederschlag	17.06.00 00:00	23.06.00 10:20	154:20	interpoliert
KAS	Windgeschwindigkeit	24.06.00 03:20	24.06.00 15:10	11:50	fehlend
KAS	Windgeschwindigkeit	24.06.00 16:30	24.06.00 16:50	0:20	fehlend
KAS	Windgeschwindigkeit	24.06.00 19:00	27.06.00 12:40	65:40	fehlend
AUF	Windgeschwindigkeit	27.06.00 08:20	05.07.00 12:40	196:20	fehlend
KL	Erdoberflächentemperatur (min)	01.07.00 00:00	20.08.00 0:00	bis Ende	fehlend
KAS	Niederschlag, Sammler 10	14.07.00 00:00		-	interpoliert
ALT	Niederschlag, Sammler 21	*17.07.2000		-	interpoliert

\* Ablesetermin

Tab. 32: Überblick naturräumlicher Begriffe in der finnischen Sprache

naturräuml. Begriff	Übersetzung
-aapa	normalerweise großes, baumloses boreale-subarktisches minerotrophes Moor***
-jänne	Reihe kleinerer Erhebungen in minerotrophem Moor***
-järvi	See*
-joki	Fluss*
-kangas	trockene Heidefläche o. trockener Heidewald*
-köngäs	Wasserfall*
-lampi	kleiner See, Teich, Tümpel*; auch Gebirgssee***
-mutka	Biegung, Mäander*
-niemi	Vorgebirge*; auch Kuppe, Kap***
-niva	Furt, Untiefe, seichte Stelle im Gewässer*
-oja	Bach*
-palo	Brand**
-puro	schnell fließender Bach*; auch kleine Bucht***
-rimpi	Schlenke, Senke in minerotrophem Moor***
-suo	Moor, Morast***
-tunturi	unbewachsener Berg
-vaara	hoher, gestreckter Hügel, meist bewaldet*

\* KOUTANIEMI (1979); \*\* SÖYRINKI &amp; SAARI (1980); \*\*\* VASARI (1999)

Tab. 33: Im Untersuchungsgebiet vorkommende Klassen der finnischen »Landnutzung und Waldinventur« und Reklassifizierung der Waldtypen

Klasse	Bezeichnung	Reklassifikation	Nutzungstyp/Waldtyp
7	Gewässer	0	unbewaldet
13	Agrarfläche	0	unbewaldet
20	Kahlschlag alt a. Mineralboden	0	unbewaldet
21	Kahlschlag neu a. Torfboden	0	unbewaldet
22	Kahlschlag alt a. Torfboden	0	unbewaldet
23	Mineralboden, Grundgestein	0	unbewaldet
40	oligotrophes Moor	0	unbewaldet
45	Fichtenwald <52 m <sup>3</sup> /ha (Torf)	1	Fichtendominanz
46	Fichtenwald 52-101 m <sup>3</sup> /ha (Torf)	1	Fichtendominanz
47	Fichtenwald 102-151 m <sup>3</sup> /ha (Torf)	1	Fichtendominanz
48	Fichtenwald 152-201 m <sup>3</sup> /ha (Torf)	1	Fichtendominanz
49	Fichtenwald >201 m <sup>3</sup> /ha (Torf)	1	Fichtendominanz
50	Laubwald <52 m <sup>3</sup> /ha (Torf)	2	Laubwald
51	Laubwald 52-101 m <sup>3</sup> /ha (Torf)	2	Laubwald
55	Mischwald <52 m <sup>3</sup> /ha (Torf)	3	Mischwald
56	Mischwald 52-101 m <sup>3</sup> /ha (Torf)	3	Mischwald
57	Mischwald 102-151 m <sup>3</sup> /ha (Torf)	3	Mischwald
58	Mischwald 152-201 m <sup>3</sup> /ha (Torf)	3	Mischwald
59	Mischwald >201 m <sup>3</sup> /ha (Torf)	3	Mischwald
66	Kiefernwald <12 m <sup>3</sup> /ha (Torf)	4	Kieferndominanz
67	Kiefernwald 12-51 m <sup>3</sup> /ha (Torf)	4	Kieferndominanz
68	Kiefernwald 52-101 m <sup>3</sup> /ha (Torf)	4	Kieferndominanz
69	Kiefernwald 102-151 m <sup>3</sup> /ha (Torf)	4	Kieferndominanz
70	Kiefernwald 152-201 m <sup>3</sup> /ha (Torf)	4	Kieferndominanz
71	Kiefernwald >201 m <sup>3</sup> /ha (Torf)	4	Kieferndominanz
77	Kiefernwald <52 m <sup>3</sup> /ha (Mineralboden)	4	Kieferndominanz
78	Kiefernwald 52-101 m <sup>3</sup> /ha (Mineralboden)	4	Kieferndominanz
79	Kiefernwald 102-151 m <sup>3</sup> /ha (Mineralboden)	4	Kieferndominanz
80	Kiefernwald 152-201 m <sup>3</sup> /ha (Mineralboden)	4	Kieferndominanz
81	Kiefernwald >201 m <sup>3</sup> /ha (Mineralboden)	4	Kieferndominanz
88	Fichtenwald <52 m <sup>3</sup> /ha (Mineralboden)	1	Fichtendominanz
89	Fichtenwald 52-101 m <sup>3</sup> /ha (Mineralboden)	1	Fichtendominanz
90	Fichtenwald 102-151 m <sup>3</sup> /ha (Mineralboden)	1	Fichtendominanz
91	Fichtenwald 152-201 m <sup>3</sup> /ha (Mineralboden)	1	Fichtendominanz
92	Fichtenwald >201 m <sup>3</sup> /ha (Mineralboden)	1	Fichtendominanz
99	Laubwald <52 m <sup>3</sup> /ha (Mineralboden)	2	Laubwald
100	Laubwald 52-101 m <sup>3</sup> /ha (Mineralboden)	2	Laubwald
101	Laubwald 102-151 m <sup>3</sup> /ha (Mineralboden)	2	Laubwald

(wird fortgesetzt)

(Fortsetzung der Reklassifizierungstabelle der Waldtypen)

Klasse	Bezeichnung	Reklassifikation	Nutzungstyp/Waldtyp
115	Mischwald <52 m <sup>3</sup> /ha (Mineralboden)	3	Mischwald
116	Mischwald 52-101 m <sup>3</sup> /ha (Mineralboden)	3	Mischwald
117	Mischwald 102-151 m <sup>3</sup> /ha (Mineralboden)	3	Mischwald
118	Mischwald 152-201 m <sup>3</sup> /ha (Mineralboden)	3	Mischwald
119	Mischwald >201 m <sup>3</sup> /ha (Mineralboden)	3	Mischwald
132	junger Nadelwald o. Unterwuchs (Mineralboden)	6	junger Nadelwald
133	junger Nadelwald m. Unterwuchs (Mineralboden)	6	junger Nadelwald
142	junger Nadelwald o. Unterwuchs (Torf)	6	junger Nadelwald
143	junger Nadelwald m. Unterwuchs (Torf)	6	junger Nadelwald

(Quelldaten: FMI 1999b)

Tab. 34: Im Untersuchungsgebiet vorkommende Klassen der finnischen »Landnutzung und Waldinventur« und Reklassifizierung der Holzmengen

Klasse	Bezeichnung	Reklassifikation	Nutzung/Holzmenge
7	Gewässer	0	kein Bestand
13	Agrarfläche	0	kein Bestand
20	Kahlschlag alt a. Mineralboden	0	kein Bestand
21	Kahlschlag neu a. Torfboden	0	kein Bestand
22	Kahlschlag alt a. Torfboden	0	kein Bestand
23	Mineralboden, Grundgestein	0	kein Bestand
40	oligotrophes Moor	0	kein Bestand
45	Fichtenwald <52 m <sup>3</sup> /ha (Torf)	2	<52 m <sup>3</sup> /ha
46	Fichtenwald 52-101 m <sup>3</sup> /ha (Torf)	3	52-101 m <sup>3</sup> /ha
47	Fichtenwald 102-151 m <sup>3</sup> /ha (Torf)	4	102-151 m <sup>3</sup> /ha
48	Fichtenwald 152-201 m <sup>3</sup> /ha (Torf)	5	152-201 m <sup>3</sup> /ha
49	Fichtenwald >201 m <sup>3</sup> /ha (Torf)	6	>201 m <sup>3</sup> /ha
50	Laubwald <52 m <sup>3</sup> /ha (Torf)	2	<52 m <sup>3</sup> /ha
51	Laubwald 52-101 m <sup>3</sup> /ha (Torf)	3	52-101 m <sup>3</sup> /ha
55	Mischwald <52 m <sup>3</sup> /ha (Torf)	2	<52 m <sup>3</sup> /ha
56	Mischwald 52-101 m <sup>3</sup> /ha (Torf)	3	52-101 m <sup>3</sup> /ha
57	Mischwald 102-151 m <sup>3</sup> /ha (Torf)	4	102-151 m <sup>3</sup> /ha
58	Mischwald 152-201 m <sup>3</sup> /ha (Torf)	5	152-201 m <sup>3</sup> /ha
59	Mischwald >201 m <sup>3</sup> /ha (Torf)	6	>201 m <sup>3</sup> /ha
66	Kiefernwald <12 m <sup>3</sup> /ha (Torf)	1	<12 m <sup>3</sup> /ha
67	Kiefernwald 12-51 m <sup>3</sup> /ha (Torf)	2	<52 m <sup>3</sup> /ha
68	Kiefernwald 52-101 m <sup>3</sup> /ha (Torf)	3	52-101 m <sup>3</sup> /ha
69	Kiefernwald 102-151 m <sup>3</sup> /ha (Torf)	4	102-151 m <sup>3</sup> /ha
70	Kiefernwald 152-201 m <sup>3</sup> /ha (Torf)	5	152-201 m <sup>3</sup> /ha
71	Kiefernwald >201 m <sup>3</sup> /ha (Torf)	6	>201 m <sup>3</sup> /ha
77	Kiefernwald <52 m <sup>3</sup> /ha (Mineralboden)	2	<52 m <sup>3</sup> /ha

(wird fortgesetzt)

(Fortsetzung der Reklassifizierungstabelle der Holzmengen)

Klasse	Bezeichnung	Reklassifikation	Nutzungstyp/Waldtyp
78	Kiefernwald 52-101 m <sup>3</sup> /ha (Mineralboden)	3	52-101 m <sup>3</sup> /ha
79	Kiefernwald 102-151 m <sup>3</sup> /ha (Mineralboden)	4	102-151 m <sup>3</sup> /ha
80	Kiefernwald 152-201 m <sup>3</sup> /ha (Mineralboden)	5	152-201 m <sup>3</sup> /ha
81	Kiefernwald >201 m <sup>3</sup> /ha (Mineralboden)	6	>201 m <sup>3</sup> /ha
88	Fichtenwald <52 m <sup>3</sup> /ha (Mineralboden)	2	<52 m <sup>3</sup> /ha
89	Fichtenwald 52-101 m <sup>3</sup> /ha (Mineralboden)	3	52-101 m <sup>3</sup> /ha
90	Fichtenwald 102-151 m <sup>3</sup> /ha (Mineralboden)	4	102-151 m <sup>3</sup> /ha
91	Fichtenwald 152-201 m <sup>3</sup> /ha (Mineralboden)	5	152-201 m <sup>3</sup> /ha
92	Fichtenwald >201 m <sup>3</sup> /ha (Mineralboden)	6	>201 m <sup>3</sup> /ha
99	Laubwald <52 m <sup>3</sup> /ha (Mineralboden)	2	<52 m <sup>3</sup> /ha
100	Laubwald 52-101 m <sup>3</sup> /ha (Mineralboden)	3	52-101 m <sup>3</sup> /ha
101	Laubwald 102-151 m <sup>3</sup> /ha (Mineralboden)	4	102-151 m <sup>3</sup> /ha
115	Mischwald <52 m <sup>3</sup> /ha (Mineralboden)	2	<52 m <sup>3</sup> /ha
116	Mischwald 52-101 m <sup>3</sup> /ha (Mineralboden)	3	52-101 m <sup>3</sup> /ha
117	Mischwald 102-151 m <sup>3</sup> /ha (Mineralboden)	4	102-151 m <sup>3</sup> /ha
118	Mischwald 152-201 m <sup>3</sup> /ha (Mineralboden)	5	152-201 m <sup>3</sup> /ha
119	Mischwald >201 m <sup>3</sup> /ha (Mineralboden)	6	>201 m <sup>3</sup> /ha
132	junger Nadelwald o. Unterwuchs (Mineralboden)	7	junger Nadelwald - k. A.
133	junger Nadelwald m. Unterwuchs (Mineralboden)	7	junger Nadelwald - k. A.
142	junger Nadelwald o. Unterwuchs (Torf)	7	junger Nadelwald - k. A.
143	junger Nadelwald m. Unterwuchs (Torf)	7	junger Nadelwald - k. A.

(Quelldaten: FMI 1999b)

Tab. 35: Im Untersuchungsgebiet vorkommende Klassen der finnischen »Landnutzung und Waldinventur« und Reklassifizierung der Bodenklassen

Klasse	Bezeichnung	Reklassifikation	Bodenklasse
7	Gewässer	13	Gewässer
13	Agrarfläche	12	Agrarfläche (meist Torfboden)
19	Kahlschlag neu a. Mineralboden	1	Mineralboden
20	Kahlschlag alt a. Mineralboden	1	Mineralboden
21	Kahlschlag neu a. Torfboden	2	Torfboden
22	Kahlschlag alt a. Torfboden	2	Torfboden
23	Mineralboden, Grundgestein	3	Grundgestein
40	Oligotrophes Moor	4	Oligotrophes Moor
45	Fichtenwald <52 m <sup>3</sup> /ha (Torf)	2	Torfboden
46	Fichtenwald 52-101 m <sup>3</sup> /ha (Torf)	2	Torfboden
47	Fichtenwald 102-151 m <sup>3</sup> /ha (Torf)	2	Torfboden
48	Fichtenwald 152-201 m <sup>3</sup> /ha (Torf)	2	Torfboden
49	Fichtenwald >201 m <sup>3</sup> /ha (Torf)	2	Torfboden

(wird fortgesetzt)

(Fortsetzung der Reklassifizierungstabelle der Bodenklassen)

Klasse	Bezeichnung	Reklassifikation	Bodenklasse
50	Laubwald <52 m <sup>3</sup> /ha (Torf)	2	Torfboden
51	Laubwald 52-101 m <sup>3</sup> /ha (Torf)	2	Torfboden
52	Laubwald 102-151 m <sup>3</sup> /ha (Torf)	2	Torfboden
55	Mischwald <52 m <sup>3</sup> /ha (Torf)	2	Torfboden
56	Mischwald 52-101 m <sup>3</sup> /ha (Torf)	2	Torfboden
57	Mischwald 102-151 m <sup>3</sup> /ha (Torf)	2	Torfboden
58	Mischwald 152-201 m <sup>3</sup> /ha (Torf)	2	Torfboden
59	Mischwald >201 m <sup>3</sup> /ha (Torf)	2	Torfboden
66	Kiefernwald <12 m <sup>3</sup> /ha (Torf)	2	Torfboden
67	Kiefernwald 12-51 m <sup>3</sup> /ha (Torf)	2	Torfboden
68	Kiefernwald 52-101 m <sup>3</sup> /ha (Torf)	2	Torfboden
69	Kiefernwald 102-151 m <sup>3</sup> /ha (Torf)	2	Torfboden
70	Kiefernwald 152-201 m <sup>3</sup> /ha (Torf)	2	Torfboden
71	Kiefernwald >201 m <sup>3</sup> /ha (Torf)	2	Torfboden
77	Kiefernwald <52 m <sup>3</sup> /ha (Mineralboden)	1	Mineralboden
78	Kiefernwald 52-101 m <sup>3</sup> /ha (Mineralboden)	1	Mineralboden
79	Kiefernwald 102-151 m <sup>3</sup> /ha (Mineralboden)	1	Mineralboden
80	Kiefernwald 152-201 m <sup>3</sup> /ha (Mineralboden)	1	Mineralboden
81	Kiefernwald >201 m <sup>3</sup> /ha (Mineralboden)	1	Mineralboden
88	Fichtenwald <52 m <sup>3</sup> /ha (Mineralboden)	1	Mineralboden
89	Fichtenwald 52-101 m <sup>3</sup> /ha (Mineralboden)	1	Mineralboden
90	Fichtenwald 102-151 m <sup>3</sup> /ha (Mineralboden)	1	Mineralboden
91	Fichtenwald 152-201 m <sup>3</sup> /ha (Mineralboden)	1	Mineralboden
92	Fichtenwald >201 m <sup>3</sup> /ha (Mineralboden)	1	Mineralboden
99	Laubwald <52 m <sup>3</sup> /ha (Mineralboden)	1	Mineralboden
100	Laubwald 52-101 m <sup>3</sup> /ha (Mineralboden)	1	Mineralboden
101	Laubwald 102-151 m <sup>3</sup> /ha (Mineralboden)	1	Mineralboden
102	Laubwald 152-201 m <sup>3</sup> /ha (Mineralboden)	1	Mineralboden
112	Kiefern-Fichtenwald <102-151 m <sup>3</sup> /ha (Mineralboden)	1	Mineralboden
113	Kiefern-Fichtenwald 152-201 m <sup>3</sup> /ha (Mineralboden)	1	Mineralboden
115	Mischwald <52 m <sup>3</sup> /ha (Mineralboden)	1	Mineralboden
116	Mischwald 52-101 m <sup>3</sup> /ha (Mineralboden)	1	Mineralboden
117	Mischwald 102-151 m <sup>3</sup> /ha (Mineralboden)	1	Mineralboden
118	Mischwald 152-201 m <sup>3</sup> /ha (Mineralboden)	1	Mineralboden
119	Mischwald >201 m <sup>3</sup> /ha (Mineralboden)	1	Mineralboden
132	Junger Nadelwald o. Unterwuchs (Mineralboden)	1	Mineralboden
133	Junger Nadelwald m. Unterwuchs (Mineralboden)	1	Mineralboden
142	Junger Nadelwald o. Unterwuchs (Torf)	2	Torfboden
143	Junger Nadelwald m. Unterwuchs (Torf)	2	Torfboden
255	Andere Bedeutung	14	unbekannt

(Quelldaten: FMI 1999b)

Tab. 36: Nationales topographisches Datenmodell - Layer »Transmission« und »Transport«

Klasse	Legende	Typ	Sonstiges
Transmission			
22312	Überlandleitung, lokal	Linie	20 - 110 kV
22311	Überlandleitung, Fernleitung	Linie	> 110 kV
22100	Transformator	Punkt	
22391	Überlandleitung, Z-Symbol	Punkt	
22392	Hochspannungsmast	Punkt	
Transport			
12121	Straße IIa	Linie	Breite 6,5 - 8,0 m
12122	Straße IIb	Linie	Breite 5,0 - 6,5 m
12131	Straße IIIa	Linie	Breite 4,0 - 5,0 m
12132	Straße IIIb	Linie	Breite 3,0 - 4,0 m
12141	Nebenstraße	Linie	Breite < 3,0 m
12311	Weg, befahrbar	Linie	
12312	Winterweg	Linie	
12313	Pfad	Linie	
12104	Kreuzung; Abzweig	Punkt	
12200	Hindernis; Sperrung	Punkt	
12500	Parkplatz	Punkt	

(Quelldaten: FMI 1999c)

Tab. 37: Nationales topographisches Datenmodell - Layer Flächennutzung »Terrain/1«

Klasse	Legende	Typ	Sonstiges
32111	Kiesgrube	Polygon	$\geq 1000 \text{ m}^2$
32200	Friedhof	Polygon	
32300	Deponie	Polygon	$\geq 5000 \text{ m}^2$
32411	Flugplatz, asphaltiert	Polygon	$\geq 1000 \text{ m}^2$
32413	Flugplatz, übrige Fläche	Polygon	$\geq 1000 \text{ m}^2$
32421	Parkplatz; Verkehrsplatz	Polygon	$\geq 1000 \text{ m}^2$
32500	Steinbruch	Polygon	$\geq 1000 \text{ m}^2$
32611	Agrarfläche	Polygon	$\geq 1000 \text{ m}^2$
32800	Wiese	Polygon	$\geq 5000 \text{ m}^2$
33000	Aufschüttung	Polygon	$\geq 5000 \text{ m}^2$
33100	Sportplatz; Erholungsfläche	Polygon	$\geq 1000 \text{ m}^2$
34100	Gestein, anstehend	Polygon	$\geq 1000 \text{ m}^2$
34300	Sandfeld; Sandbank	Polygon	$\geq 1000 \text{ m}^2$
34700	Geröll; Blockfeld	Polygon	$\geq 1000 \text{ m}^2$
35300	Vernässungsfläche	Polygon	
35411	Moor, begehbar, baumlos	Polygon	$\geq 1000 \text{ m}^2$ ; $<25 \%$ Heideanteil, 0,3 m Torfschicht
35412	Moor, begehbar, bewaldet	Polygon	$\geq 1000 \text{ m}^2$ ; $<25 \%$ Heideanteil, 0,3 m Torfschicht
35421	Moor, schwer begehbar, baumlos	Polygon	$\geq 1000 \text{ m}^2$ ; $<25 \%$ Heideanteil, 0,3 m Torfschicht
35422	Moor, schwer begehbar, bewaldet	Polygon	
36200	Stillgewässer	Polygon	$\geq 1000 \text{ m}^2$
36313	Fließgewässer, Breite $> 5 \text{ m}$	Polygon	$\geq 1000 \text{ m}^2$
30211	Abgrenzung, eindeutig	Linie	
30212	Abgrenzung, ungenau	Linie	
30300	Damm	Linie	
34400	Steilhang; Klippe	Linie	$h \geq 4 \text{ m}$ ; $\geq 45^\circ$ ; $L=10 \text{ m}$
34800	Böschung	Linie	
35500	Torfflächen auf offenen Mooren	Linie	
36311	Fliessgewässer, Breite $< 2 \text{ m}$	Linie	
36312	Fliessgewässer, Breite 2-5 m	Linie	
32291	Friedhof, Symbol	Punkt	
32591	Steinbruch, Symbol	Punkt	
32710	Nadelwald	Punkt	
32713	Laubwald	Punkt	
32714	Mischwald	Punkt	
32722	Baugrube; Baugebiet	Punkt	
32891	Wiese, Symbol	Punkt	

(wird fortgesetzt)

(Fortsetzung Nationales topographisches Datenmodell - Layer Flächennutzung »Terrain/1«)

Klasse	Legende	Typ	Sonstiges
33091	Symbol Grube; Ausfuchung	Punkt	
34100	Gestein, anstehend	Punkt	
34200	Geröll, licht/spärlich	Punkt	
34600	Stein; Block	Punkt	
36100	Quelle	Punkt	
36391	Fließgewässer, Fließrichtung	Punkt	
36400	Tümpel	Punkt	

(Quelldaten: FMI 1999c)

Tab. 38: Nationales topographisches Datenmodell - Layer Flächennutzung »Terrain/2«

Klasse	Legende	Typ	Sonstiges
38300	Gewässer, verlandend	Polygon	≥ 10000 m <sup>2</sup>
38400	Überschwemmungsgebiet	Polygon	≥ 1000 m <sup>2</sup>
38600	Steinschüttung im Gewässer	Polygon	
38700	Untiefe	Polygon	≥ 5000 m <sup>2</sup>
38900	Deponiefläche	Polygon	≥ 5000 m <sup>2</sup>
39110	Offene Waldfläche, Kahlschlag	Polygon	≥ 5000 m <sup>2</sup> /≥ 20000 m <sup>2</sup> für Kahlschläge; Bei Aufforstung ≤ 1 m Baumhöhe
39130	Offene Fläche	Polygon	≥ 5000 m <sup>2</sup>
38100	Schilf	Punkt	
38511	Steinschüttung, unter Wasser	Punkt	
38512	Steinschüttung, mittlerer Wasserstand	Punkt	
38513	Steinschüttung, über mittlerem Wasserstand	Punkt	
38991	Deponie, Symbol	Punkt	

(Quelldaten: FMI 1999c)

Tab. 39: Nationales topographisches Datenmodell - Layer »Buildings« und Layer »Elevations«

Klasse	Legende	Typ	
Bebauung		Typ	Sonstiges
42111	Wohngebäude, 1-2 Stockwerke	Polygon	
42121	Öffentliches-/Geschäftsgebäude, 1-2 Stockwerke	Polygon	
42131	Freizeit-/Feriengebäude, 1-2 Stockwerke	Polygon	
42141	Industriegebäude, 1-2 Stockwerke	Polygon	
42161	Sonstige Gebäude, 1-2 Stockwerke	Polygon	
42211	Wohngebäude, 1-2 Stockwerke	Polygon	
42231	Freizeit-/Feriengebäude, 1-2 Stockwerke	Polygon	
42251	Kirchengebäude, 1-2 Stockwerke	Polygon	
44300	Becken; Bassin	Polygon	> 200 m <sup>2</sup>
44600	Glockenturm	Punkt	
44800	Mast	Punkt	
44900	Denkmal / Ehrenmal	Punkt	
45000	Aussichtsturm	Punkt	> 10 m
45200	Tor; Pforte	Punkt	
45400	Teergrube	Punkt	
45710	Feuerstelle	Punkt	
Höhenangaben			
34800	Böschung	Linie	
52100	Isohypse	Linie	
54100	Tiefenlinie	Linie	
52191	Isohypse, Wert	Punkt	
52210	Höhenpunkt	Punkt	
54191	Tiefenwert der Tiefenlinie	Punkt	
54210	Tiefenpunkt	Punkt	

(Quelldaten: FMI 1999c)

---

## **Erklärung**

Ich erkläre hiermit, dass die vorliegende Arbeit ohne unerlaubte fremde Hilfe angefertigt wurde, keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt wurden und die den benutzten Werken wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht worden sind.

Bremen, 6.3.2006

Steffen Schwantz