

DISS. ETH Nr. 9366

Hydrologie und Dynamik der Hochmoorentwicklung

ABHANDLUNG
Zur Erlangung des Titels

DOKTOR DER TECHNISCHEN WISSENSCHAFTEN
der
EIDGENÖSSISCHEN TECHNISCHEN HOCHSCHULE

vorgelegt von
MARTIN SCHNEEBELI
dipl. Kultur-Ing. ETH

geboren am 10. März 1958
von Zürich und Ottenbach ZH

angenommen auf Antrag von

Prof. Dr. Hannes Flühler, Referent
PD Dr. Otto Wildi, Korreferent

Zürich, 1991

DANK

Am Projekt «Turbenriet» halfen zahlreiche Personen mit. Ohne Ihre Unterstützung und Mithilfe wäre es nicht möglich gewesen, das Projekt durchzuführen.

Prof. Dr. H. Flühler (ETH Zürich) unterstützte von Beginn an das Projekt und liess mir grosse Freiheit bei der Bearbeitung. Seine Tür war immer offen, wenn sich neue Probleme auftaten. PD Dr. O. Wildi (WSL Birmensdorf) übernahm das Koreferat als einer der wenigen, die sich mit Mooren als System auseinandersetzen. Die Diskussionen mit ihm und seine kritischen Hinweise trugen wesentlich zur klareren Abfassung der Arbeit bei.

Das Projekt wurde durch das Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), Abt. Naturschutz, dem Schweizerischen Bund für Naturschutz (SBN), dem St. Gallisch-Appenzellischen Naturschutzbund (SANB), der Naturwissenschaftlichen Gesellschaft St. Gallen (NWG) und der ETH Zürich finanziert. E. Kessler (BUWAL), U. Berchtold (SBN), Dr. M. Boesch (SANB), P. Walz (SANB) und G. Nägeli (NWG) interessierten sich stets für das Projekt.

Die Auswahl des Untersuchungsobjektes stammt von A. Grünig (WSL). Es erwies sich als ein sehr fründiges Gebiet.

Die Pollenanalysen wurden von J. Fäh† (Systematisch-Geobotanisch Institut der Universität Bern) durchgeführt und bilden eine wesentliche Basis für die Bestimmung des Moorwachstums. Prof. Dr. G. Lang und Dr. A. Lotter sorgten für die Erhaltung der Daten nach dem Tode von J. Fäh. PD Dr. M. Küttel (BUWAL) führte mich in die Nomenklatur der Palynologie ein.

Die unerlässlichen ¹⁴C-Datierungen wurden durch das Institut für Mittelenergiephysik der ETH (Prof. Dr. W. Wölfli und Dr. G. Bonani) durchgeführt.

Die Feldarbeiten wurden wesentlich von J. Leuenberger und H. Wydler (Bodenphysik ETH) mitgetragen.

Die statistischen Analysen und die Simulationen wären ohne die intensiven Diskussionen mit Dr. K. Roth (University of California, Riverside) kaum so zustande gekommen. Seine Kenntnisse taten mir eine neue Welt auf.

Meinem Vater, Dr. H.R. Schneebeli, danke ich für die sprachliche Durchsicht der ersten Fassung.

Meiner Frau Gabi Schneebeli-Stadler danke ich herzlich für die Zeit, die sie mir liess, um meine Einsicht in die Prozesse des Moors zu vertiefen.

INHALTSVERZEICHNIS

Dank	I
Inhaltsverzeichnis	II
Abbildungsverzeichnis	VII
Tabellenverzeichnis	XI
Notation	XII
Zusammenfassung	XV
Abstract	XVII
1. EINLEITUNG	1
2. UNTERSUCHUNGSOBJEKT	3
2.1. Lage und Messnetz	3
2.2. Klima	3
2.2.1. Temperatur und Vegetationszeit	5
2.2.2. Niederschläge	5
2.3. Geologie	10
2.3.2. Stratigraphie des Torfkörpers	10
2.3.3. Hydraulische Eigenschaften der Gesteine	15
2.4. Aktuelle Vegetation	18
2.4.1. Aktuelle Vegetation	18
2.4.2. Nutzung, Torfabbau und erste Regenerations- massnahmen	18
3. THEORIE	20
3.1. Faktoren und Prozesse im Moorboden	20
3.1.1. Klassifikation torfbildender Ökosysteme	20
Geomorphologische und vegetationskundliche Definition	20
Bodenkundliche Definition	21
3.1.2. Bodenbildende Faktoren	23
Zeit	23

III

Muttergestein	24
Topographie	24
Klima	24
Organismen	24
3.1.3. Bodenbildende Prozesse	25
Prozesse in einem Crescaquist über mineralischem Muttergestein	25
Prozesse in einem Crescaquist über organischem Muttergestein	27
Prozesse in einem Desaquist	28
Verlandung, Versumpfung und Sukzessionen	30
3.2. Wasserfluss in Mooren	32
3.2.1. Gefüge des Bodens	32
3.2.2. Energie und Potential des Bodenwassers	32
3.2.3. Transportgesetz des Wassers in Boden	34
Einfluss der Schichtung auf die mittlere Leitfähigkeit	34
3.2.4. Flussmodell	35
Allgemeiner Fall	35
Dupuit-Forchheimer Approximation	35
Einfluss von Kompressibilität und teilgesättigter Zone	36
3.2.5. Analytische und numerische Lösungen des Flussmodells	37
Definition des Gebietes und der Randbedingungen	37
Analytische Lösungen für den eindimensionalen, stationären Fluss mit Quellentern	37
Analytische Lösung für zweidimensionalen, stationären Fluss mit Quelle in einem rechteckigen Gebiet	39
Finite-Differenzen Lösung für den eindimensionalen, instationären Fluss in einem heterogenen Gebiet	39
Finite-Differenzen Lösung für den zweidimensionalen, stationären Fluss in einem heterogenen Gebiet	41
3.3. Moorwachstum	42
3.3.1. Sedimentationsmodell	43
Das lineare zweidimensionale Einschichtmodell	46
Das exponentielle eindimensionale Zweischichtmodell	46
3.3.2. Das Moor als Grundwasserkörper	48
3.3.3. Koppelung des Sedimentationsmodells mit dem Grundwassermodell	49
4. ENTWICKLUNG DES MOORES	51
4.1. Methoden zur Datierung der Torfstratigraphie	51
4.1.1. Absolute Datierung: 14C-Messung	51
4.1.2. Relative Datierung: Pollenfrequenzen	52
4.2. Die absoluten 14C-Datierungen	52
4.2.1. Messungen im Standardprofil	52
Entnahme und Aufbereitung	52
Resultate und Diskussion	53

IV

4.2.2.	Messungen der Basisproben	54
	Entnahme und Aufbereitung	54
	Resultate und Diskussion	54
4.3.	Stratigraphische Korrelation von Pollensequenzen:	
	Methode	56
4.3.1.	Statistische Eigenschaften einer Pollenprobe	57
4.3.2.	Optimale Konfiguration des Standardprofils	58
	Wahl der Pollensumme und der Transformationen der	
	Arten: Auswerteregeln	58
	Entfernen von Ausreißern	59
	Glätten des Standardprofils	59
4.3.3.	Ähnlichkeitsmasse und Transformation	60
4.3.4.	Bestimmen des Maximum Likelihood-Minimums	
	und der Vertrauensintervalle	62
4.3.5.	Regelbasierte Bestimmung der optimalen Lösung	65
4.3.6.	Testen der Empfindlichkeit der Zuordnung	65
4.3.7.	Absolute Datierung der Pollenproben am Standard-	
	profil	66
4.4.	Resultate der stratigraphischen Korrelation im Turbenriet	66
4.4.1.	Optimale Konfiguration des Standardprofils	66
	Auswahl der verwendeten Pollenarten	66
	Entfernen von Ausreißern und Filterung des Stan-	
	dardprofile	67
	Interpretation des Standardprofils	67
	Identifikation der originalen an den geglätteten Daten:	
	Maximum Likelihood und Vertrauensintervall	70
4.4.2.	Identifikation der Basis- und Transsektproben	72
	Monte-Carlo Realisierungen und der Einfluss der	
	Ähnlichkeitsmasse	72
	Konvergenz der Monte-Carlo-Simulation	73
	Resultate der Identifikation	74
	Diskussion	76
4.5.	Entwicklung des Moores	77
4.5.1.	Horizontale Ausbreitung	77
4.5.2.	Vertikales Wachstum in den Transsekten	80
4.5.3.	Volumetrische Sedimentation	85
4.5.4.	Vergleich mit anderen Mooren	86
5.	SIMULATION UND VERIFIKATION DER MODELLE	91
5.1.	Hydrologische Modelle	91
	Leitfähigkeit als Systemparameter	93
5.1.2.	Amplitude des Wasserspiegels bei variabler	
	Leitfähigkeit und variablem Speicherkoeffizienten	96
	Modell, Anfangs- und Randbedingungen	96
	Stufenantwortfunktion des homogenen Systems	102

Resultate	106
5.1.3. Auswirkung einer Entwässerung auf Leitfähigkeit und Wasserspiegel	110
Modell, Anfangs- und Randbedingungen	110
Numerische Interpretation der Simulation	113
Hydrologische und ökologische Interpretation	115
5.2. Wachstumsmodell	123
6. ANWENDUNG AUF DIE REGENERATION	125
6.1. Zusammenfassung der grundlegenden Erkenntnisse	125
6.1.1. Zeitdauer der Prozesse	125
6.1.2. Stabilität eines torfbildenden Ökosystems	125
6.1.3. Wechselwirkung zwischen Vegetation und Wasserhaushalt	126
6.2. Planung einer Regeneration	126
6.2.1. Grundlagen	126
6.2.2. Zielsetzung	127
6.2.3. Planung	127
6.2.4. Ausführung	127
6.3. Beispiel	128
7. LITERATUR	129
ANHANG A KOORDINATEN DER MESSPUNKTE	A-1
A.1 Koordinaten der Messpunkte im Turbenriet	A-1
ANHANG B NIEDERSCHLÄGE	B-1
Niederschlagsmessungen im Turbenriet	B-1
ANHANG C STRATIGRAPHIE	C-1
C.1 Stratigraphische Tabellen	C-1
C.1.1 Abkürzungen	C-1
C.1.2 Stratigraphische Tabellen	C-2
C. 2 Stratigraphische Abbildungen	C-17
C.2.1 Quertranssekte: Stratigraphie und Humifikation	C-18
C.2.2 Längstranssekte: Stratigraphie und Humifikation	C-23
ANHANG D POLLENDATEN	D-1

ANHANG E ALTER DER POLLENANALYTISCH DATIERTEN PROBEN	E-1
E.1 Alter in Tiefen des Standardprofils	E-1
E.2 Alter in Absoluten Altern	E-5
E.3 Abbildungen der Datierungen	E-9
ANHANG F FLÄCHEN- UND VOLUMENWACHSTUM	F-1
Flächenberechnungen	F-1
Zuwachsraten und Zuwachsverhältnisse	F-2
ANHANG G HAMMARMOSSE: ALTER UND ZUWACHS	G-1
Koordinaten, Alter und Langsamkeit	G-1
Flächenberechnung	G-2
ANHANG H FORTRAN-PROGRAMME	H1
H.1 Programm zur Berechnung des Phasendiagramms: FD1dis	
	H-1
H.2 Programm zur Berechnung der instationären Veränderung der Leitfähigkeit: bogflo.for	
	H-11

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

2.1	Übersichtskarte des Untersuchungsgebietes und des Messnetzes.....	4
2.2	Mittelwerte der Sommerniederschläge (1. Juni–30. September) von 1901– 1985 auf dem Säntis	7
2.3	Monatliche Niederschlagssummen im Turbenriet	8
2.4	Dauer und Häufigkeit von Regen- und Trockenperioden	9
2.5	Verteilung der Niederschläge während Niederschlagsperioden.	9
2.6	Geologie und Geomorphologie des Turbenriets	11
2.7	Geschätzte Torfmächtigkeit vor dem Torfabbau (ca. 1860) und gemessene Torfmächtigkeit (1984).....	12
2.8	Mächtigkeit der Torfschicht im Querschnitt 4–73	13
2.9	Mächtigkeit der Torfschicht im Längsschnitt 23–33	13
2.10	Stratigraphie und Zersetzungsgrad des Längsschnittes 23–33.....	14
2.11	Stratigraphie und Zersetzungsgrad des Querschnittes 4–73.....	15
2.12	Räumliche Verteilung der Pflanzengesellschaften 1984.....	19
3.1	Mögliche Sequenzen bei der Entwicklung der Aquists	25
3.2	Beziehungen zwischen verschiedenen Prozessen bei einer geringen hydro- logischen Änderung in einem Crescaquist	26
3.3	Schema der Prozesse bei der Entwicklung eines Desaquists	28
3.4	Abnahme der Leitfähigkeit $K(t=0)$ in Abhängigkeit der Zeit t für eine konstante Entwässerungstiefe $\zeta = 1$ m und in Abhängigkeit der Entwässerungstiefe ζ für den Zeitpunkt $t = 10$	30
3.5	Stratigraphische Sequenzen aus Torfprofilen in Nordamerika	31
3.6	Energie zweier Wasserkörper in einem unterschiedlich porösen Medium	33
3.7	Situation für den eindimensionalen Fluss mit konzentrischen und par- allelen Potentiallinien im Gebiet $\Omega(x)$	38
3.8	Form eines Grundwasserkörpers mit von oben gesehen parallelen Pot- entiallinien	38
3.9	Zersetzungsfaktor α in einem torfbildenden System.....	44
3.10	Zusammenhang zwischen Produktion und maximaler Torfmächtigkeit bei unterschiedlichen Zersetzungsfaktoren.....	45
3.11	Geometrische Interpretation des linearen Einschichtmodells.	47
3.12	Schema des Grundwasserspiegels bei verschiedenen Entwicklungszustän- den des Moores.....	48
4.1	Zuwachs und Sedimentation im Standardprofil 25.....	53
4.2	Abweichung zwischen den ^{14}C -datierten und den pollenanalytisch nach der Methode «OPTIMAL» datierten Basisproben.....	56

VIII

4.3	Prinzip der Beprobung und Zuordnung für die relative Datierung	57
4.4	Notation für die Basis- und Transsektproben.....	57
4.5	Darstellung des Prinzipes der besten Korrelation einer Pollenprobe unbekannter Einordnung in das Standardprofil.....	60
4.6	Vertrauensintervall der Häufigkeitsverteilungm.....	64
4.7	Pollendiagramm des Standardprofils 25A.....	68
4.8	Abweichungen zwischen der effektiven Tiefe z und der scheinbaren Tiefe z' als Ergebnis der Identifikation der Kreuzdatierung.....	71
4.9	Distanzen d der zwei Ähnlichkeitsmasse für die untransformierten Artvektoren und für die wurzeltransformierten Artvektoren der Probe 595 (Punkt 32, Tiefe 210 cm).....	73
4.10	Konvergenz der Monte-Carlo-Simulationen für das zentrierte, fortschreitende Mittel der Minima und der Standardabweichungen.....	75
4.11	Schema der datierten Flächen im Moor	77
4.12	Mineralischer Untergrund des Turbenriets.....	78
4.13	Die Ausbreitung des Moores in der Ebene.....	79
4.14	Flächen-Zuwachsrate und Fläche des Turbenriets in der Ebene.....	80
4.15	Die Entwicklung des Turbenriets im Querschnitt von Transsekt 4–73	81
4.16	Die Entwicklung des Turbenriets im Querschnitt von Transsekt 23–33	82
4.17	Zuwachsraten im Quertranssekt 4–73 und im Längstranssekt 23–33.....	83
4.18	Querschnittsfläche (kumulativer Zuwachs) im Quertranssekt 4–73 und im Längstranssekt 23–33	83
4.19	Torfwachstum in den Bohrungen der Transsekte.....	84
4.20	Langsamkeit des Zuwachses zwischen den Proben der Transsekte.....	84
4.21	Volumetrische Zuwachsrate und Volumen	85
4.22	Lineare Regression der Kubikwurzel des Torfvolumens gegen die Zeit.....	86
4.23	Zusammenhang zwischen Torfmächtigkeit und deren Alter an der Basis	88
4.24	Über die Torfmächtigkeit gemittelte vertikale Langsamkeit im Hammarmosse	88
4.25	Zusammenhang zwischen Alter an der Basis und der horizontalen Distanz von zwei initialen Moorzentren im Hammarmosse.....	89
4.26	Horizontale Langsamkeit im Hammarmosse	89
4.26	Ausbreitungsrate und Fläche im Hammarmosse in der Ebene.....	90
5.1	Zusammenhang zwischen Nachlieferung, Mächtigkeit und Länge des Moores.....	93
5.2	Zusammenhang zwischen gegebener Länge und dem Logarithmus der berechneten hydraulischer Leitfähigkeit bei unterschiedlichem Niederschlag	95
5.3	Zusammenhang zwischen gegebener mittlerer und maximaler Mächtigkeit und berechneter hydraulischer Leitfähigkeit K	95
5.4	Stationäre Wasserspiegel für verschiedene Quotienten der hydraulischen Leitfähigkeit.....	97

IX

5.5	Nachlieferung über den Zeitraum von 120 Monaten	98
5.6	Räumliche Anordnung der Leitfähigkeiten der 9 Quotienten.....	99
5.7	Mittlere Leitfähigkeiten der 9 Quotienten.....	99
5.8	Isotropes poröses Medium, parallel-ansiotropes und senkrecht anisotropes poröses Medium	102
5.9	Räumliche Anordnung des Speicherkoeffizienten für die sieben simulierten Quotienten.....	100
5.10	Stufenantwort der piezometrischen Höhe h an der Stelle $x = 0$ nach einer konstanten Verdoppelung der Nachlieferung.....	103
5.11	Stufenantwortfunktion des untersuchten Systems an der Stelle $x = 0$	104
5.12	Darstellung der piezometrischen Höhe h des simulierten Modells an der Stelle $x = 0$ und der Nachlieferung	105
5.13	Darstellung der piezometrischen Höhe wie sie von Schmeidl et al. (1970) in einem Hochmoor mit ähnlichen Eigenschaften wie das simulierte Modell gemessen wurde und der Nachlieferung.....	106
5.14	Zeitlicher Verlauf der piezometrischen Höhe für verschiedene Quotienten der Leitfähigkeit und des Speicherkoeffizienten	107
5.15	Autokorrelation der Nachlieferung und der piezometrischen Höhe für das homogene Modell	107
5.16	Standardabweichung der piezometrischen Höhen für die extremen Leit- fähigkeitsquotienten.....	108
5.17	Standardabweichung der piezometrischen Höhen für die extremen Quotienten der Speicherkoeffizienten über den gesamten Bereich der Quotienten der Leitfähigkeit	109
5.18	Amplitudendiagramm der Standardabweichung für die Quotienten der Leitfähigkeit und des Speicherkoeffizienten	111
5.19	Grundriss des simulierten Gebietes.....	113
5.20	Vergleich einer Lösung des Finiten-Differenzen Modells mit der analytischen Lösung	113
5.21	Massenbilanz des stationären Wasserflusses der Gebiete 1 bis 4 für jeden Zeitschritt.....	114
5.22	Zeitliche Änderung der hydraulischen Leitfähigkeit im Gebiet	115
5.23	Zeitliche und räumliche Änderung der Leitfähigkeit in den Transsekten 1 bis 4	117
5.24	Zeitliche und räumliche Änderung der piezometrischen Höhe in den Transsekten 1 bis 4	118
5.25	Zeitliche und räumliche Änderung des Wasserspiegels gemessen vom Ausgangswasserspiegel in den Transsekten 1 bis 4	119
5.26	Räumliche und zeitliche Darstellung der Leitfähigkeit in der Ebene vor und nach der Entwässerung	120
5.27	Räumliche und zeitliche Darstellung der piezometrischen Höhe in der Ebene vor und nach der Entwässerung.....	121

5.28	Räumliche und zeitliche Darstellung der Veränderung des Wasserspiegels gemessen von der Mooroberfläche in der Ebene vor und nach der Entwässerung.....	122
5.29	Vergleich der mit dem Klötzchen-Modell simulierten Fläche und der gemessenen Fläche im Turbenriet.....	123
5.30	Vergleich des mit dem Klötzchen-Modell simulierten Volumens und dem gemessenen Volumen im Turbenriet.....	124

TABELLENVERZEICHNIS

2.1	Verlauf der Jahrestemperatur im Turbenriet	5
2.2	Parameter und Korrelationskoeffizienten zwischen Niederschlagsmessungen im Turbenriet und den SMA-Stationen	5
2.3	Regressionsparameter und Korrelationskoeffizienten zwischen Niederschlagsmessungen der SMA-Stationen.....	6
2.4	Niederschlag, Niederschlagstage pro Monat und potentielle Evapotranspiration im Turbenriet.....	8
2.5	Mittlere hydraulische Leitfähigkeit K, Porosität n, Speicherkoeffizient S für die im Untersuchungsgebiet vorkommenden Gesteine.....	16
2.6	Mittlere hydraulische Leitfähigkeit K, Porosität n, Speicherkoeffizient S für Hangley (Lokalformen Chnoden und Gottschalkenberg), sowie für den Acrotelm eines Eriophorum-Sphagnum-Torfes.....	17
3.1	Werte des Torfverdichtungsfaktors in Beziehung zur Zeit	29
4.1	¹⁴ C-Datierungen im Standardprofil 25	54
4.2	¹⁴ C-Datierungen der Basisproben.....	55
4.3	Mittelwerte der Abweichungen, Standardabweichungen der Mittelwerte und maximale Abweichungen der verschiedenen Distanzmasse für die kreuzdatierten Proben des Standardprofils	70
4.4	Mittelwerte und Standardabweichung der Mittelwerte für die Wahrscheinlichkeit des ML-Schätzers und Mediane und 90 % Perzentile für die Vertrauensintervalle der Basisproben.....	74
4.5	Mittelwerte und Standardabweichung der Mittelwerte für die Wahrscheinlichkeit des ML-Schätzers und Mediane und 90 % Perzentile für die Vertrauensintervalle der Transsektproben.....	76
5.1	Vergleich des berechneten Wasserspiegels mit den Mittelwerten der Oberflächen für nordwestdeutsche Moore.....	92
5.2	Vergleich des berechneten Wasserspiegels mit den Mittelwerten der Oberflächen für bayrische Moore	92
5.3	Statistische Masse der Nachlieferung	97
5.4	Leitfähigkeitsquotienten zur Berechnung des Amplitudendiagramms.....	98
5.5	Quotienten des Speicherkoeffizienten und ihre Größe an den Stellen $x = 0$ und $x = 200$, mit welchen das Amplitudendiagramm berechnet wird.....	100
5.6	In einem isotropen Torfkörper physikalisch mögliche Kombinationen des Quotienten aus der Leitfähigkeit und dem Speicherkoeffizienten.....	101
5.7	Stufenantworten und Halbwertszeiten für das homogene hydrologische System.....	103

NOTATION

kleine deutsche Symbole

<i>a</i>	Koeffizient (Steigung bei Regression)	
<i>b</i>	Koeffizient (Interzept bei Regression)	
<i>c</i>	Konstante	
<i>d</i>	Distanzvektor	
<i>g</i>	Gravitationskraft	[LT ⁻²]
<i>h</i>	Wasserspiegelhöhe, piezometrische Höhe	[L]
<i>h</i>	Anzahl der Realisierungen	
<i>m</i>	Masse	[M]
<i>m</i>	Vektor der Minima aus den Distanzvektoren	
<i>n</i>	Porosität	[L ³ /L ³]
<i>n, o, r, s</i>	Anzahlen	
<i>nran</i>	Anzahl der künstlichen Realisierungen	
<i>p</i>	Produktionsrate	[M/T]
	Druck	[ML ⁻² T ⁻²]
<i>p</i>	Wahrscheinlichkeit	
<i>r</i>	Korrelationskoeffizient	
<i>t</i>	Zeit	[T]
<i>v</i>	quadrierte piezometrische Höhe ($v = h^2$)	
<i>x</i>	unabhängige Variable	
<i>y</i>	abhängige Variable	
<i>z</i>	vertikale Koordinate	[L]

grosse deutsche Symbole

<i>A</i>	Ereignis	
<i>A</i>	Flächenzuwachsrate	[L ² /T]
<i>A_(nr), A_{nr}</i>	Matrize mit <i>n</i> Kolonnen und <i>r</i> Reihen	
<i>D</i>	Diffusion	
<i>E</i>	Evapotranspiration	[L/T]
<i>H</i>	Zersetzungsgrad (Humifikation) nach von Post	
<i>H</i>	Häufigkeit	
<i>K</i>	hydraulische Leitfähigkeit	[L/T]
<i>L</i>	Abstand	[L]
<i>M</i>	Gesamtmasse	[M]
<i>MED</i>	gleitender Median in einer Reihe	

XIII

<i>N</i>	Niederschlag	[L/T]
<i>S</i>	Speicherkoeffizient	[L ³ /L ³]
<i>S</i>	Volumetrische Sedimentationsrate	[L ³ /T]
<i>U</i>	Nachlieferung	[L/T]
<i>V</i>	Volumen	[L ³]
<i>V_p</i>	Volumen des Porenraums	[L ³]
<i>V_t</i>	Gesamtvolumen des Körpers	[L ³]
<i>X</i>	Matrix des Standardprofils	
<i>Y</i>	Matrizen der Basis- und Transsektprobenpunkte	
<i>Z</i>	Mächtigkeit des Torfkörpers im Zentrum (maximale Mächtigkeit)	[L]

kleine griechische Symbole

α	Zersetzungsfaktor	[T ⁻¹]
	vertikale Kompressibilität des Bodens	
β	Kompressibilität des Wassers	
δ	Vektor der Basisproben Tiefen	
δ_{lu}	Distanz des Vertrauensintervall aus den Tiefen des Standardprofils	
ϵ	Fehlervektor (Kap. 4)	
	Zusammendrückung (Längenänderung pro Länge) (Kap. 3)	dimensionslos
ϕ	Potential	[L ² T ⁻²]
η	Abstand zwischen Sohle des Grundwassertrüges und Referenzhöhe	[L]
ι	Differenz der Indizes bei der Berechnung des Vertrauensintervalls	
κ	Maximum Likelihood des Minima-Vektors <i>m</i>	
μ	Minimum eines Distanzvektors	
ν	Anzahl Lösungen	
π	Zahl <i>p</i> , 3.141...	
π	vorgegebene Wahrscheinlichkeit	
ρ	Dichte	[ML ⁻³]
σ	Standardabweichung	
σ_z	Auflast	[ML ²]
τ	in eine Zeit transformierte Distanz des Vertrauensintervall	
ω	Vektor der Reihenfolge der Proben	
ω'	Vektor der Reihenfolge der Proben nach der Bestimmung von <i>k</i>	
ξ	Differenzvektor der Vektoren <i>x</i>	
ζ	Differenz der Komponenten von <i>w-w'</i>	

grosse griechische Symbole

Υ	Matrix der Monte-Carlo Realisierungen einer Probe	
Φ	Energie	
	Gesamtvolumen eines Körpers	[ML ² T ⁻¹], [L ³]

Ω	Gebiet (zum Beispiel ein Hochmoor)
Ξ	Matrix der Differenzvektoren x
Ψ	Vertrauensintervall, Konfidenzintervall

mathematische Notationen

a	eine Zahl
\mathbf{a}	ein Vektor
A	ein Tensor, eine Matrix
$\ \mathbf{a}\ $	Vektornorm
$[a,b]$	Intervall von a bis b , die Grenzen eingeschlossen
$]a,b[$	Intervall von a bis b , die Grenze bei a ausgeschlossen (analog $[a,b[$ und $]a,b]$)
\hat{p}	Erwartungswert
p	Ordnungszahl (Norm der Ordnung p)
p_L, p_U	unterer bzw. oberer Wert des Konfidenzintervalls
$\{ \}, \mathcal{A}$	geordnete Menge
\propto	proportional zu
\vee	oder
\wedge	und
\forall	für alle...
\equiv	identisch
$\langle \rangle$	Mittelwert des Ausdrucks ...
\otimes	Mengenprodukt, zum Beispiel $K \otimes S$, Menge aller geordneten Paare aus K, S
\rightarrow	daraus folgt
d/dt	Ableitung nach der Zeit
$\partial/\partial x$	partielle Ableitung nach der Ortskoordinate x
δf	endliche (finite) Differenz der Funktion f
\mathbb{I}	Menge der ganzzahligen Zahlen
∇	Gradienten Operator
∇f	Gradient der Funktion f
$\nabla \cdot \mathbf{f}$	Divergenz des Vektorfeldes \mathbf{f}
\in	Element von
\sum_i^j	Summe über alle i und j

Notation für Altersbezeichnungen

BP	vor heute mit Jahr 0 = 1950 AD
AD	nach Christi Geburt (anno domini)
BC	vor Christus
ka	tausend Jahre

ZUSAMMENFASSUNG

Hochmoore sind in der Schweiz hochgradig gefährdete Ökosysteme. Um sie zu erhalten, ist es notwendig, die hydrologischen und bodenkundlichen Prozesse zu kennen, welche bei der Entstehung und Ausbreitung wirksam sind. Die notwendigen Grundlagen und Modellvorstellungen werden dazu entwickelt. Auf dieser Basis werden dann die konkreten Prozesse mit Hilfe der Rekonstruktion der Geschichte des Moores und der Simulation hydrologischer Eigenschaften untersucht. Als Hauptuntersuchungsobjekt dient das Turbenriet im Kanton St. Gallen, Schweiz. Für spezielle Fragen werden publizierte Daten aus Mooren von Schweden (Granlund, 1932; Foster, 1988) und Deutschland (Schmeidl et. al, 1970; Eggelsmann und Schuch, 1980) verwendet.

In den theoretischen Grundlagen werden zuerst die Eigenschaften von Torfböden definiert, dazu wird die Klassifikation der Soil Taxonomy erweitert. Danach werden die Modellvorstellungen entwickelt, welche die Prozesse der Torfablagerung beschreiben. Die Rekonstruktion erfolgt mit ^{14}C - und pollenanalytischen Datierungen. Die ^{14}C Datierung erfolgt an einem sogenannten Standardprofil und an einzelnen Basisproben. Die pollenanalytischen Datierungen basieren auf einem 50 m Raster der Basisproben und einem Längs- und Quertranssekt, in welchen vertikal 4 Proben entnommen wurden. Die Einordnung der Proben in das Standardprofil erfolgt aufgrund der Ähnlichkeit und mittels eines Optimierungsalgorithmus. Die Vertrauensintervalle der Datierung werden mit einer Monte-Carlo-Simulation bestimmt. Die hydrologischen Simulationen untersuchen die Reaktion verschiedener Leitfähigkeits- und Speicherkapazitätsverhältnisse bei instationärer Nachlieferung und die Auswirkung der Verdichtung des Torfes nach einer Entwässerung. Für die Simulationen wurde ein eindimensionales, instationäres und ein zweidimensionales, stationäres Finite-Differenzen Modell entwickelt.

Die dreidimensionale Rekonstruktion der Moorbildung ermöglicht den Flächen- und Volumenzuwachs zu berechnen. Aus den nahezu linearen Zuwachsraten kann ein neues Sedimentationsmodell hergeleitet werden, welches aufgrund der mittleren vertikalen Sedimentationsrate und der horizontalen Ausbreitungsrate die gemessenen Daten gut wiedergibt. Die instationäre hydrologische Simulation des Wasserspiegels zeigt, dass mit den im Zentrum eines intakten Moores auftretenden Bult-Schlenken-Strukturen und den Rillenstrukturen am Rand des Moores die minimale Amplitude des Wasserspiegels auftritt. Die Simulation der Veränderung des Wasserspiegels infolge

Torfverdichtung zeigt, dass die hydraulische Leitfähigkeit vor allem am Rand des Moores (beim Entwässerungsgraben) abnimmt und der Wasserspiegel im Laufe der Zeit wieder ansteigt. Der zentrale Teil des Moores wird dabei am stärksten wieder vernässt.

Das sich entwickelnde Hochmoor lässt sich somit als lineares System interpretieren. Die Verdichtung des Torfs nach einer Entwässerung führt zu einer effizienten Rückkoppelung und sichert die beobachtete lange Lebensdauer des Ökosystems. Für die Regeneration von Hochmooren bedeutet dies, dass die Entwicklung des Moores stark berücksichtigt werden muss und die Rückkoppelungsprozesse in die Planung einbezogen werden müssen.

Anders ausgedrückt kann man sagen, dass das System die anthropogenen und natürlichen Störungen selber reguliert, wenn man ihm Zeit lässt. Ist die Störung jedoch so gross, dass der Mineralboden, auf welchem das Moor wächst, zuerst entwässert und dann belüftet wird, so ist die Torfbildung nicht mehr möglich.

ABSTRACT

Due to the intensive landuse and cultivation practised during the last century in Switzerland the peat bogs (synonymous mires) became an endangered landscape element. In order to restore and preserve such relict ecosystems it is necessary to understand the hydrological and peat bog formation processes. Of primary importance are those processes which control the growth and sedimentation of peat. Such longtermed processes were investigated by reconstructing the surface shapes of a peat bog during the past 12000 years. By means of an instationary drainage model the spatial distribution of hydraulic conductivities were analyzed which determine to a large extent the observed bog shape.

Most of the data are from Turbenriet (canton St. Gallen, Switzerland). For special questions additional, published data were used from Sweden (Granlund, 1932; Foster, 1988) and Germany (Schmeidl et. al, 1970; Eggelsmann and Schuch, 1980).

The former surfaces of the expanding and growing bog were reconstructed by means of pollen analyses which in turn were calibrated with radiocarbon dates. The peat samples were taken as depth profiles along transects and, in addition, at the base of the peat body on a 50×50 m grid. The standard profile and a selection of base samples were crossdated with radiocarbon. The age of the exclusively pollen-dated samples was determined based on pollen composition using several similarity measures and an optimization algorithm to compare the sample data with the pollen data of the radiocarbon-dated reference samples. The confidence intervals were estimated by means of a Monte-Carlo simulation. The three-dimensional reconstruction of the peat bog enabled to calculate the time dependent growth in area and volume. The nearly linear vertical and horizontal growth made it possible to adjust a sedimentation model, which exhibits a relatively small deviation between fitted and measured areas and volumes.

The transient, one-dimensional finite difference model was used to simulate the amplitudes of the oscillating water table for a peat bog with a space dependent ratio between hydraulic conductivity and between storage capacity. The minimum of the overall amplitude was found for conductivity and storage capacity coefficients, which must be interpreted as hollow-hummock structure in the centre of the bog and as "Rüllen"-structure (natural drainage ditches) at the fringe.

The two-dimensional finite difference model for the transient simulation of the change in hydraulic conductivity predicts a marked reduction in the im-

XVIII

mediate vicinity of the ditch. This reduction raises the water table during the subsequent years. The maximum water table raise is predicted for the central part of the drained bog.

Based on the presented data and model prediction we conclude that a peat bog behaves as a nearly linear system. The drainage induced compaction exerts a corrective feedback by favouring ponding conditions and hence warrants the longevity of such ecosystems. A successful restoration process of anthropogeneously disturbed peat bogs should make use of these mechanisms.

Hochmoore gehören zu den torfbildenden Ökosystemen. Von anderen Ökosystemen unterscheiden sie sich durch ihren über mehrere tausend Jahre offenen Nährstoffkreislauf und damit über lange Zeit positive Stoffbilanz, da die organische Substanz nur sehr langsam zersetzt wird. Die organische Substanz wird immer dann langsam zersetzt, wenn die Lebensbedingungen für Mikroorganismen ungünstig sind. Dies trifft zu in wassergesättigten Böden mit einem geringen Sauerstoffangebot oder in extrem trockenen Böden, wo es an Feuchtigkeit mangelt.

Hochmoore zeichnen sich durch ein dynamisches Ökosystem aus, das sich allerdings für menschliche Massstäbe äusserst langsam vollzieht. Zufolge dieser Dynamik verändert sich das ursprüngliche Ökosystem grossflächig; die Umgebung wird durch das wachsende Hochmoor versumpft, sodass die ursprüngliche Waldvegetation einer Sumpf- und Moorvegetation weichen muss.

Die Untersuchungen des Hochmoor-Regenerationsprojektes «Turbenriet» führten zur grundlegenden Frage wie sich ein Hochmoor im Laufe seiner postglazialen Entstehungsgeschichte oder nach einem Eingriff durch den Menschen entwickelt.

Das Ziel der Arbeit ist, das komplexe Ökosystem «Hochmoor» mit möglichst wenig Prozessen, und damit Parametern, so genau zu beschreiben, wie es für die Planung von Regenerationsmassnahmen notwendig ist. Aufbauend auf Ivanov (1981) und Clymo (1984) wurden hydrologische und bodenkundliche Prozesse als die bedeutendsten betrachtet. Anhand von Modellen wird versucht, die ökologischen Vorgänge im Hochmoor möglichst sinnvoll zu erfassen. Das Schwergewicht dieser Arbeit liegt deshalb auf der Quantifizierung und Simulation der Prozesse.

In Kapitel 2 wird «Turbenriet» vorgestellt. Hier wurden die umfassenden Untersuchungen vorgenommen. Die hydrologischen und vegetationskundlichen Bestandesaufnahmen hat Schneebeli (1988) in einer früheren Publikation bereits dargestellt und interpretiert.

Kapitel 3 befasst sich mit der Theorie über die Torfbildung und der damit verknüpften Abläufe. Dabei werden einerseits die Ursachen der Torfbildung aus bodenkundlicher Sicht, andererseits die für die Bildung von Mooren notwendigen hydraulischen und hydrologischen Gesetzmässigkeiten und darauf aufbauend ein Moorwachstums-Modell hergeleitet.

In Kapitel 4 finden sich die statistischen Grundlagen für die pollenanalytische Altersbestimmung. Hier wird auch die Moorentwicklung quantitativ rekonstruiert. In einem ersten, theoretischen Teil wird die Methode entwickelt, die notwendig ist, um mit pollenanalytischen Datierungen eine mit ^{14}C -Datierungen vergleichbare Genauigkeit zu erreichen. Im zweiten Teil wird die Methode auf Daten aus dem Turbenriet angewandt und die Mooroberflächen während der letzten 12000 Jahre rekonstruiert. Abschliessend werden die gefundenen Wachstumsbeziehungen mit einem Moor aus Schweden verglichen.

In Kapitel 5 werden die in Kapitel 3 entwickelten Modelle mit aus der Wirklichkeit gewonnenen Daten geprüft und gleichzeitig die für die Torfbildung wesentlichen Prozesse simuliert. In einem ersten hydrologischen Modell wird dem Einfluss der schwankenden Nachlieferung auf den Wasserspiegel nachgegangen und die Resultate ökologisch interpretiert. Im zweiten hydrologischen Modell wird die bei Entwässerung auftretende Torfverdichtung simuliert. Das Moorwachstums-Modell wird mit dem in Kapitel 4 berechneten Wachstum verglichen und gezeigt, dass das Moorwachstum ein weitgehend linearer Prozess ist.

Kapitel 6 widmet sich der Umsetzung der Ergebnisse auf die Regeneration und den daraus zu folgernden Konsequenzen. Als Beispiel werden die für das Turbenriet notwendigen Regenerationsmassnahmen kurz dargestellt.

In diesem Kapitel werden die Eigenschaften des untersuchten Moores und seiner näheren Umgebung dargestellt. Diese Daten wurden, wie schon erwähnt, zum Teil veröffentlicht. Es wird deshalb dann auf die Originalarbeit verwiesen, wenn für das weitere Verständnis dieser Arbeit keine ausführliche Erläuterung notwendig ist.

2.1. LAGE UND MESSNETZ

Als Untersuchungsobjekt wurde das Hangmoor Turbenriet in der Gemeinde Grabs, Kanton St. Gallen, gewählt. Das Zentrum des Moores weist die Koordinaten 747300 / 226500 / 1325 auf (47° 10' 32" nördl. Breite, 9° 23' 4" östl. Länge). Die topographische Situation des Moores ist in Abbildung 2.1 dargestellt.

Die Untersuchungen wurden auf einem quadratischen Raster mit 50 m Seitenlänge durchgeführt, dessen eine Achse in magnetisch Süd-Nord-Richtung verläuft. Die Koordinaten der Messpunkte sind in Anhang A aufgeführt.

2.2. KLIMA

Ein wesentlicher Faktor für die Moorbildung ist das Klima. Besonders wesentlich sind Niederschlag und Verdunstung. Für die Entwicklung des Moores sind auch länger andauernde extreme Perioden bedeutend. Die Verteilung des Niederschlages zwischen 1901 und 1985 wurde deshalb statistisch untersucht.

Die Daten wurden aus verschiedenen Quellen zusammengetragen: die Temperaturen wurden aus Urfer et al. (1979) interpoliert, die Niederschlagsdaten stammen aus eigenen Messungen im Untersuchungsgebiet (August / September 1984) (Anhang B) und der Niederschlagsdatenbank der SMA (Bantle, 1988) für die Stationen Wildhaus (1984–1985), Starkenbach (1984–1985) und Säntis (1901–1985).

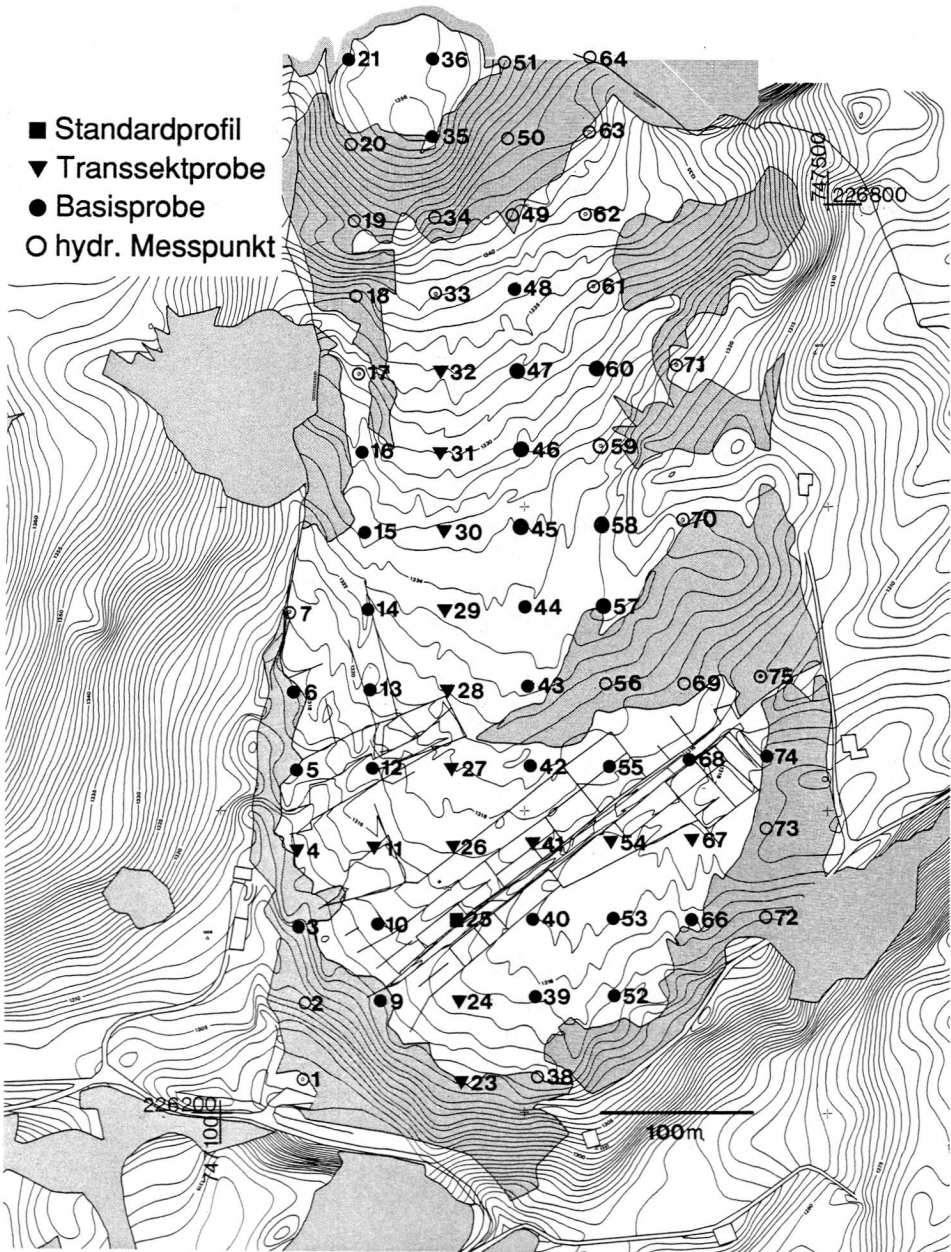


Abbildung 2.1 Übersichtskarte des Untersuchungsgebietes und des Messnetzes. Auf allen bezeichneten Messpunkten wurden die Torfmächtigkeit und das hydraulische Potential bestimmt, an den schwarz markierten Messpunkten wurden auch pollenanalytische Proben entnommen. Die dünnen geraden Linien bezeichnen Drainagegräben.

2.2.1. Temperatur und Vegetationszeit

Der Verlauf der monatlichen Mitteltemperaturen ist in Tab. 2.1 dargestellt. Die Vegetationszeit dauert etwa von Ende Mai (Ende der Schneeschmelze) bis Ende September (Einsetzen starker Fröste). Das Gebiet hat nach Ellenberg (1978) montan-randalpines Klima.

Monat	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Temperatur °C	-1.5	-0.6	2.0	4.4	9.0	12.9	13.4	13.0	10.6	6.5	2.0	-0.5

Tabelle 2.1 Verlauf der Jahrestemperatur im Turbenriet (1300 m) interpoliert aus dem regionalen Klimagradienten für Hangstationen (Mittel 1901–1960).

2.2.2. Niederschläge

Um für das Untersuchungsgebiet repräsentive Niederschlagsmengen und -verteilungen zu erhalten, wurden (i) die Niederschlagsmessungen im Turbenriet mit den Stationen Wildhaus, Starkenbach und Säntis verglichen und eine Regression durchgeführt, (ii) die Jahre 1984 und 1985 der Niederschlagsstationen Wildhaus und Starkenbach mit denjenigen der Station Säntis verglichen und (iii) der Verlauf der Niederschläge der Station Säntis von 1901–1985 detailliert untersucht.

(i) Der Zusammenhang zwischen der 59-tägigen Niederschlagsmessung im Untersuchungsgebiet und dem Niederschlag der Stationen Wildhaus (SMA-Station 2020) Starkenbach (2040) und Säntis (2220), N_S wurde mit einer linearen Regression der kumulierten Niederschlagsmengen berechnet. Als abhängige Variable wurde der Niederschlag im Turbenriet $N_{Turbenriet}$ in mm/Tag (Anhang B) gewählt. Die Regression nach dem Modell:

$$N_{Turbenriet} = aN_S + b, \quad (2.1)$$

ergab die in Tab. 2.2 dargestellten Parameter a , b und Korrelationskoeffizienten r . Die gemessenen Werte weichen nur wenig von einer Geraden ab.

Station S	2020	2040	2220
a	1.04	1.01	0.75
b	23.4	7.9	55.9
r	0.995	0.993	0.972

Tabelle 2.2 Parameter und Korrelationskoeffizienten zwischen Niederschlagsmessungen im Turbenriet und den SMA-Stationen Wildhaus (2020), Starkenbach (2040) und Säntis (2220).

Die Regressionen zeigen, dass Wildhaus und Starckenbach zumindest in den Sommermonaten die nahezu gleichen Niederschlagsmengen erhalten wie das Untersuchungsgebiet.

(ii) Der Zusammenhang zwischen den Stationen Wildhaus und Starckenbach, von denen nur kürzere Messreihen existieren, sowie der langjährigen Messreihe des Säntis wurde aufgrund des Vergleichs der Jahre 1984 (ein Normaljahr) und 1985 (ein eher trockenes Jahr) hergestellt. Als abhängige Variablen wurden die Stationen Wildhaus (2020) und Starckenbach (2040) gewählt. Es wurden, wie vorher, die kumulierten Tagesniederschläge verglichen (Tab. 2.3).

1984	2020	2040	1985	2020	2040
a	0.877	0.995	a	0.908	0.987
b	-129.0	-19.1	b	-73.6	-50.1
r	0.997	0.999	r	0.996	0.998

Tabelle 2.3 Regressionsparameter und Korrelationskoeffizienten zwischen Niederschlagsmessungen der SMA-Stationen Säntis, Wildhaus (2020) und Starckenbach (2040) 1984 und 1985 (Parameter b in [mm]).

Aufgrund dieser Regressionen wurde abgeleitet, dass das Turbenriet 90 % der auf dem Säntis gemessenen Niederschläge erhält.

(iii) Um die Vermutung zu überprüfen, ob die einzelnen Monatssummen miteinander korreliert sind, wurde die Autokorrelation für die 85-jährige Niederschlagsreihe Säntis über eine Fouriertransformation (Press et al., 1986) berechnet. Die Auswertung zeigte, dass sie mit einer schwachen Jahresperiodizität ($r = 0.12$) voneinander unabhängig sind. Werden für die Berechnung der Autokorrelation die Differenzen zwischen Monatssumme und Mittelwert der Monatssumme genommen, lässt sich die Jahresperiodizität entfernen. Der langfristige Verlauf der Niederschläge ist in Abbildung 2.2 dargestellt. Im Laufe der untersuchten Periode nehmen die Niederschläge etwas ab. Dieser Trend wird jedoch von kurzfristigen stärkeren Schwankungen überlagert. Trockene Sommerperioden (unteres Quartil mehrfach unterschritten) sind die Jahre 1946–1951 sowie 1975–1985 (1981 und 1984 im Mittelbereich). Nasse Sommerperioden, in denen das obere Quartil überschritten wird, sind 1912–1917, 1940–1941, 1954–1957, 1965–1968.

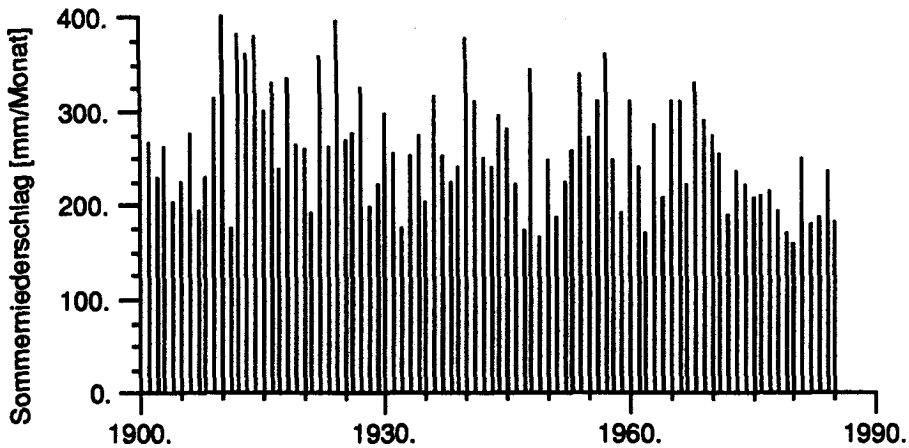


Abbildung 2.2 Mittelwerte der Sommerniederschläge (1. Juni–30. September) von 1901–1985 auf dem Säntis (110% der Niederschläge im Turbenriet).

Während des ganzen Jahres fallen grosse Regenmengen (Tab. 2.4, Abb. 2.3). Sogar in den trockensten Monaten Februar und Oktober liegt der Median mit 4.3 bzw. 4.5 mm/Tag wesentlich über der potentiellen Evapotranspiration. Die Extremwerte und Quartile zeigen die grosse Variabilität der Niederschläge. Jeder Monat kann sowohl sehr hohe als auch kleine Werte annehmen. Monate mit aufeinander folgenden gleichsinnigen Extremwerten sind jedoch sehr selten, da auch in Trockenperioden Gewitter auftreten. Die potentielle Evapotranspiration wurde nach Thornthwaite (Withers et al, 1978) aufgrund der monatlichen Mitteltemperaturen berechnet. Sie stellt für längere Zeiträume in Gebieten mit etwa gleichbleibender Luftfeuchtigkeit eine realistische Schätzung dar. Nach Schmeidl et al. (1970, p. 75) ist die potentielle Evapotranspiration in einem Hochmoor mit Torfmoos (*Sphagnum*) etwa gleich gross wie die aktuelle.

Die Dauer der längsten Trocken- und Niederschlagsperioden ist in Abbildung 2.4 dargestellt. Regen- und Trockenperioden, welche bis zu 7 Tagen dauern, treten im Mittel alle 2 Jahre auf. In längerdauernden Regenperioden können grosse Niederschlagsmengen fallen, ihre Häufigkeit ist in Abbildung 2.5 dargestellt. Zusammenfassend lässt sich das Klima im Turbenriet als ausgesprochen niederschlagsreich mit hohen Sommer- und Winterüberschüssen kennzeichnen.

Monat	Min	uQ	M	oQ	Max	NT	pETP
I	0.9	3.8	5.6	7.7	21.9	14.8	0.0
II	0.2	3.0	4.3	7.5	15.8	13.7	0.0
III	0.8	2.8	4.6	6.6	19.9	14.4	0.5
IV	0.7	4.0	5.7	8.3	22.8	15.9	1.2
V	1.9	3.7	4.8	7.8	20.2	15.3	2.4
VI	2.5	5.5	7.2	9.4	15.9	17.2	3.2
VII	1.2	5.9	7.9	11.1	17.5	16.3	3.4
VIII	3.6	5.8	7.8	10.7	18.0	16.0	3.0
IX	0.8	4.0	5.5	7.6	14.4	12.8	2.2
X	0.0	2.1	4.5	7.6	14.8	11.2	1.3
XI	0.3	2.8	5.0	7.6	21.3	12.5	0.4
XII	.2	3.2	5.1	9.2	20.3	14.2	0.0

Tabelle 2.4 Niederschlag, Niederschlagstage pro Monat und potentielle Evapotranspiration im Turbenriet. Für jeden Monat ist das Minimum (Min), das untere Quartil (uQ), der Median (M), das obere Quartil (oQ), das Maximum (Max) der Niederschläge [mm/d], das Mittel der Niederschlagstage (NT) [d] und die mittlere potentielle Evapotranspiration (pETP) [mm/d] aufgeführt.

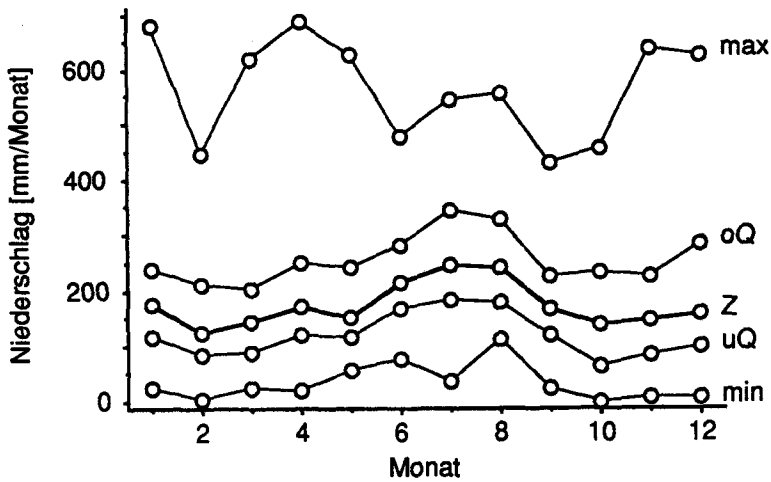


Abbildung 2.3 Monatliche Niederschlagssummen im Turbenriet (max: maximaler Wert, oQ: oberes Quartil, Z: Median, uQ: unteres Quartil, min: minimaler Wert).

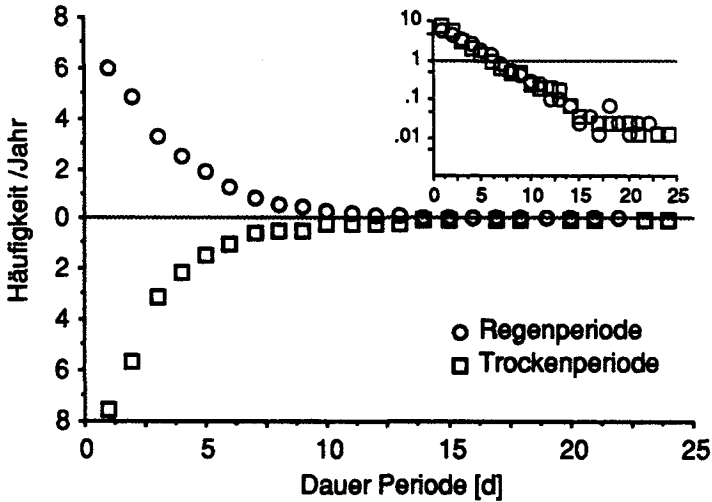


Abbildung 2.4 Dauer und Häufigkeit von Regen- und Trockenperioden. Auf der Hauptabbildung ist die Häufigkeit der Perioden im Zeitraum 15. Mai–30. September in linearem Massstab, in der kleinen in logarithmischem Massstab dargestellt. (Niederschlagsreihe Säntis 1901–1985).

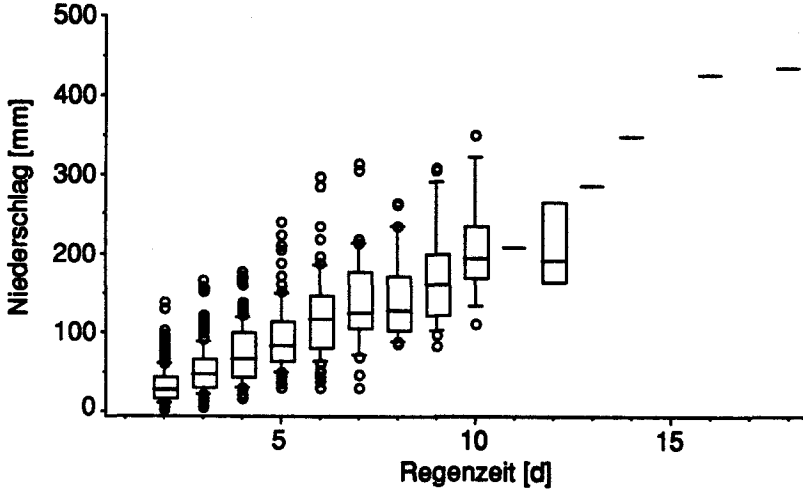


Abbildung 2.5 Verteilung der Niederschläge während Niederschlagsperioden. Die Verteilung der kumulierten Niederschlagsmenge während einer Regenzeit ist als Kasten-Diagramm dargestellt. Punkte liegen ausserhalb des 10% bzw. 90% Perzentils, das Kasten umfasst das untere Quartil, den Median und das obere Quartil.

2.3. GEOLOGIE

2.3.1. Geologie und Geomorphologie

Der Untergrund des Turbenrietes besteht aus schiefrigen Kalkmergeln und lehmiger Grundmoräne (Abbildung 2.6). Das ganze Gebiet war während des Maximums der Würmeiszeit vom Eis des Rheingletschers überdeckt. Stärker kalkhaltige Bänder des Amdenermergels führten zu Karsterscheinungen am Ostrand des Moores. Die Hangschulter, auf welcher das Moor liegt, ist durch querlaufende Moränen in muldenartige Bereiche unterteilt. Die südlichste Moräne, welche das Untersuchungsgebiet begrenzt, wird dem Etwilen-Zürich-Bazenheid-Stadium zugeordnet (Hantke, 1967). Seit ungefähr 15000 Jahren ist das Untersuchungsgebiet eisfrei. Es ist zu vermuten, dass danach die tonreiche Moräne zum Teil erodierte und dabei das Relief ausrundete, denn die älteste pollenanalytisch datierte Schicht liegt im Präboreal (ca. 10000 BC). Die ersten Torfe wurden vor ca. 11000 Jahren abgelagert. Die Torfe waren im 19. Jahrhundert bis zu mehr als 6 m mächtig (Abb. 2.7). Das heute zusammenhängende Moor besteht aus drei, durch jüngere Torfschichten verbundene Körper von 3–6 m maximaler Tiefe. Sie sind durch flache Moränenwälle getrennt. An der südwestlichen Seite des Moores vertieft der Rotbach auch heute noch aktiv sein Bett. Im nordwestlichen Teil findet sich am Rand des Moores ein ehemaliger Bachlauf, der das Moor erodierte (Abb. 2.6, Anhang C, Abb. C.10). Wann die an der südwestlichen Ecke des Gebietes gelegenen Terrassen entstanden sind, konnte nicht herausgefunden werden. Es ist möglich, dass sie schon vor der ersten Torfbildung bestanden.

2.3.2. Stratigraphie des Torfkörpers

Die Stratigraphie des Torfkörpers wurde im Labor an den Bohrkernen untersucht (zur Probeentnahme siehe Schneebeli, 1988). Die detaillierten Beschreibungen (Anhang C.1) werden in den folgenden Abbildungen (Abb. 2.8 – 2.11 und Anhänge C.2, C.3) zusammengefasst. Die Zusammensetzung der Torfe und der Humifizierungsgrad werden in getrennten Abbildungen dargestellt. Die typischen Merkmale werden an den auch für die pollenanalytischen Untersuchungen verwendeten Profilen 23–32 (Längsschnitt) und 4–73 (Querschnitt) diskutiert. Um die realen topographischen Verhältnisse zu verdeutlichen, sind Ober- und Untergrenze der Torfschicht in Abbildung 2.8 und 2.9 nicht überhöht dargestellt.

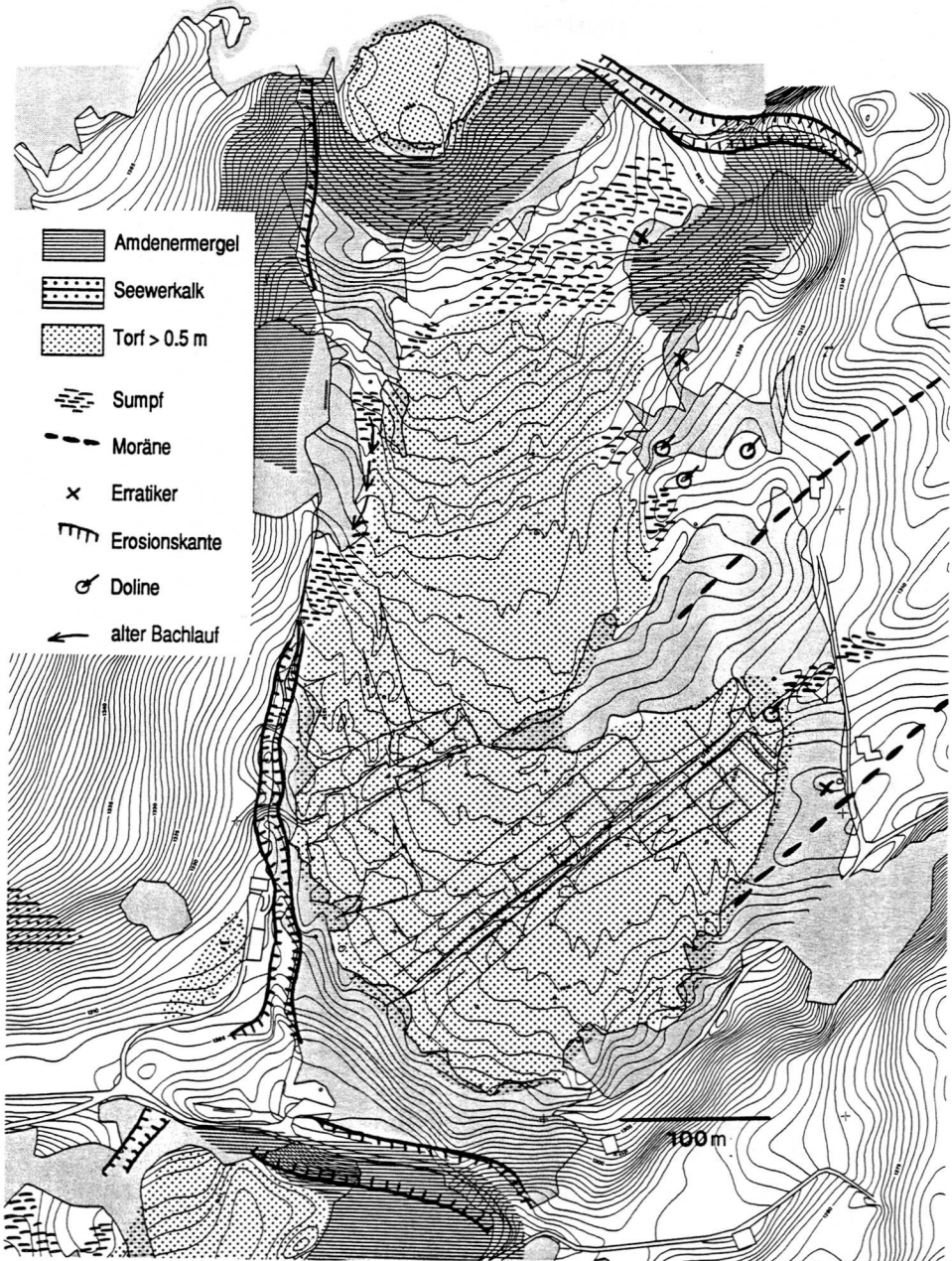


Abbildung 2.6 Geologie und Geomorphologie des Turbenriets.

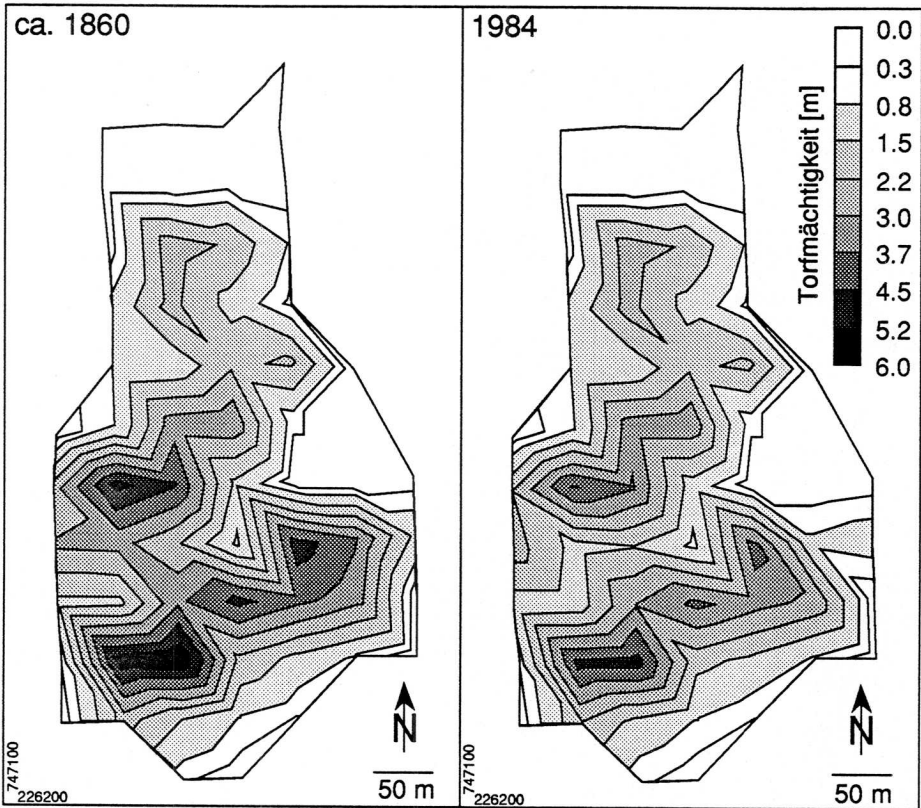


Abbildung 2.7 Geschätzte Torfmächtigkeit vor dem Torfabbau (ca. 1860) und gemessene Torfmächtigkeit (1984). Die Mächtigkeit in den entwässerten und abgebauten Gebieten wurde aufgrund der Veränderung der scheinbaren Dichte und des wahrscheinlichsten Verlaufs der ursprünglichen Höhenlinien (Karte der Ortsgemeinde Grabs, 1879) berechnet (Details der Berechnungen in Schneebeli, 1988).

Im Längsschnitt (Abb. 2.9 und 2.10) zeigen sich die drei muldenartigen Senken sehr deutlich. *Eriophorum*-Torfe dominieren. Diese Torfe führen an der Basis als Nebenbestandteile *Phragmites* und *Alnus*, in der Mitte häufig *Braunmoose* und gegen oben zunehmend *Sphagnum*. In der südlichsten Mulde treten an der Basis etwas *Phragmites*- und *Alnus*-Torfe auf, in der Mitte *Braunmoos*-Torfe. Zuoberst findet sich eine dünne Schicht *Sphagnum*-Torf. Die mittlere Mulde ist reicher an *Sphagnum* als die anderen, die oberste besteht überwiegend aus *Eriophorum*-Torfen. Die Humifizierung der Torfe variiert ohne eindeutig erkennbares Muster, ein Teil der Profile ist durchgehend recht stark zersetzt, andere eher schwach. Auffällig sind jedoch die durchgehend nur schwach zersetzten Profile 25 und 29. Es scheint, dass in den «Zentren» des Moores gelegene Profile eher weniger stark zersetzt sind

als diejenigen am Rande. Die Bohrungen sind jedoch zu wenig dicht und die Profile zum Teil unvollständig (wegen des Torfabbaus), sodass keine definitive Aussage gemacht werden kann. Die Betrachtung des nicht überhöhten Längsschnitts zeigt, wie «sanft» die Oberfläche der Grundmoräne verläuft. Die maximalen Neigungen betragen etwa 10 %.

Der Querschnitt 4–73 durchschneidet die Moräne, welche die südlichste Mulde von der oberen trennt und durchquert danach die tiefste Mulde. Auffallend sind die *Sphagnum*-Torfe in den Profilen 11 und 54, an diesen Stellen müssen schon sehr früh ausgesprochen nährstoffarme Verhältnisse geherrscht haben. Sie zeigen auch, dass die sonst vorherrschenden *Eriophorum*-Torfe nicht auf selektive Humifizierung der einzelnen Komponenten zurückgeführt werden können (Clymo, 1984). Die Humifizierung lässt auch hier kein eindeutiges Muster erkennen.

Das Fehlen profilübergreifender Strukturen lässt sich auch klimatisch interpretieren. Stark zersetzte Torfschichten, welche sich über die ganzen Querschnitte verfolgen lassen, fehlen. Dies deutet darauf hin, dass die Niederschlagsüberschüsse seit Beginn des Moorwachstums etwa gleich blieben und dass die Humifizierung durch kleinräumige, (kleiner als 50 m) Wechsel des Wasserspiegels, beziehungsweise der anaeroben Verhältnisse, verursacht wurde.

Im Querschnitt 16–59 (Abb. C.10) nimmt die Torfmächtigkeit von Punkt 31 zum Punkt 16 stark ab. Die genaue Betrachtung der Höhenkurven (Abb. 2.6) zeigt, dass Punkt 16 nahe eines nun verlassenen Bachlaufs liegt. Es ist somit sehr wahrscheinlich, dass der Torfkörper in westlicher Richtung an dieser Stelle einst mächtiger und ausgedehnter war. Beim obersten Torfkörper handelt es sich somit um ein Moor, welches nicht anthropogen entwässert wurde und das sich heute in Regeneration befindet.

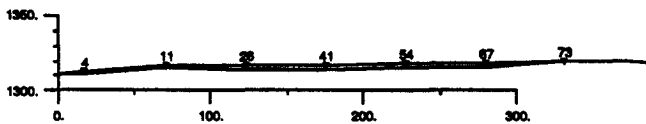


Abbildung 2.8 Mächtigkeit der Torfschicht im Querschnitt 4–73 (nicht überhöht).

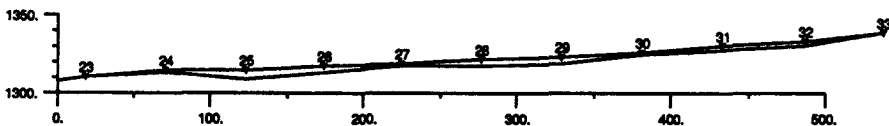


Abbildung 2.9 Mächtigkeit der Torfschicht im Längsschnitt 23–33 (nicht überhöht).

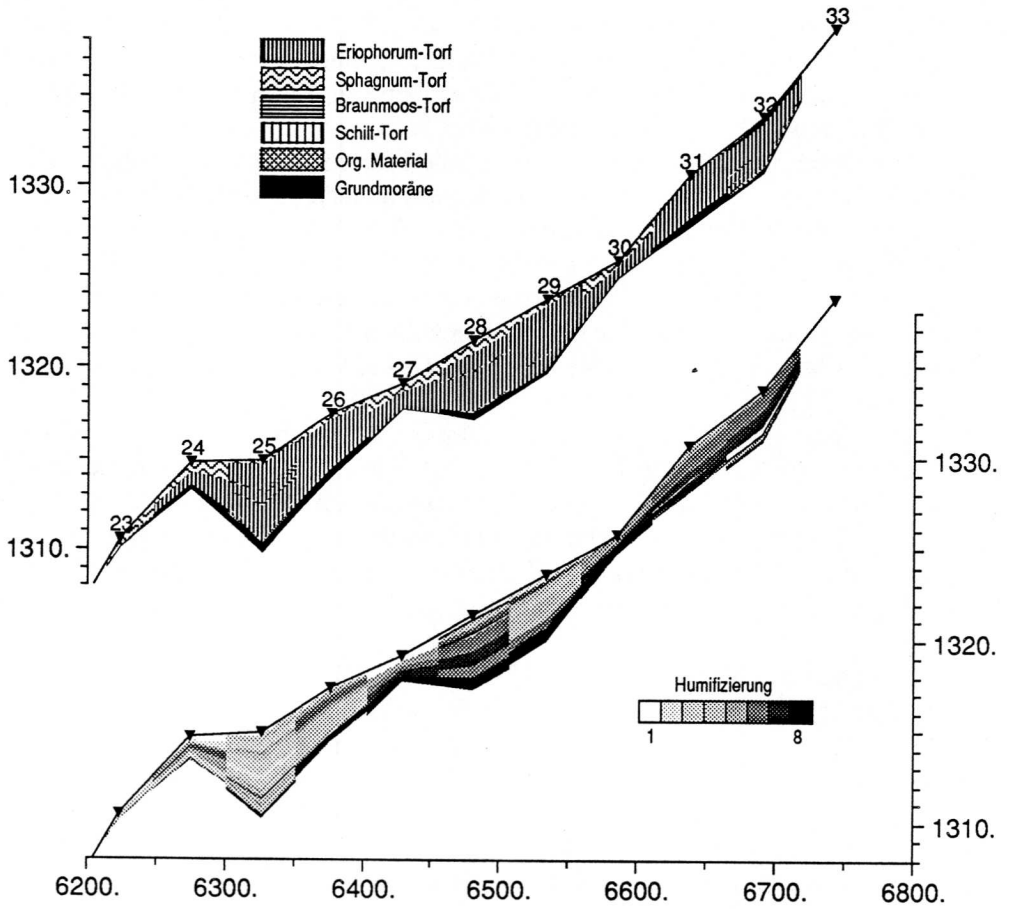


Abbildung 2.10 Stratigraphie und Zersetzungsgrad des Längsschnittes 23–33. Die Dreiecke und Nummern bezeichnen die Bohrpunkte.

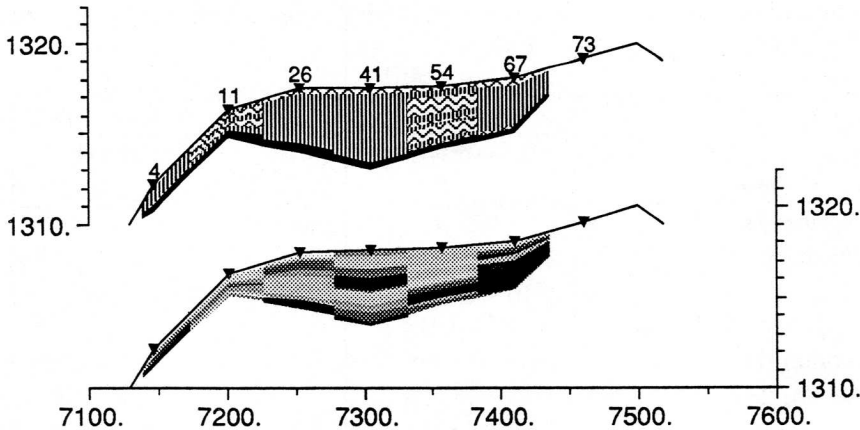


Abbildung 2.11 Stratigraphie und Zersetzungsgrad des Querschnittes 4–73. (Legende in Abb. 2.10)

2.3.3. Hydraulische Eigenschaften der Gesteine

Die hydraulischen Eigenschaften (Definitionen siehe Kap. 3.2) des Untergrundes wurden nicht gemessen. Aufgrund von Literaturangaben werden für Mergel, Grundmoräne und Torfe die in Tabelle 2.5 dargestellten Werte erwartet. Die Leitfähigkeit von Mergel und Grundmoräne werden durch den Tongehalt und die Verdichtung beeinflusst, diejenige des Torfes durch den Grad der Humifizierung und der Torfart. Die horizontale Leitfähigkeit ist gegenüber der vertikalen Leitfähigkeit 10–100 mal grösser, wenn sie an Volumen von einigen m^3 bestimmt wird¹. In der Grundmoräne als auch im Torf hat sich ein Boden² entwickelt. Hier wie dort nimmt die Leitfähigkeit und der Speicherkoeffizient mit zunehmender Tiefe ab. Sie nehmen jedoch nicht aus demselben Grund ab. In der Grundmoräne über Mergel entwickelte sich ein Hangley. Die Oberfläche wird durch Pflanzen und Tiere gelockert, weshalb Leitfähigkeit und Speicherkoeffizient zunehmen. Die Verteilung der Korngrößen bleibt sich nahezu gleich (Richard et al., 1978, Lokalform Chnoden, Abb. 7, 8; Lokalform Gottschalkenberg, Abb. 7, 8). Die Auflockerung findet

¹Der Unterschied beruht darauf, dass eine Sedimentschicht immer mehr oder weniger horizontal verläuft. In vertikaler Richtung dominiert dann die undurchlässigste Schicht die Gesamtdurchlässigkeit, in horizontaler Richtung die durchlässigste Schicht.

²Ein Boden ist im Gegensatz zu einem Gestein biologisch stark aktiv, und bildet die Grenzschicht zwischen Geo- und Biosphäre.

also von oben nach unten statt und verschwindet bei einem Rückgang der biologischen Aktivität³.

Gestein	H	K [m/s]	n [%]	S [m ³ /m ³]
Mergel	-	10 ⁻⁷ -10 ⁻¹³ **	0-10**	0.01†
Grundmoräne	-	10 ⁻⁶ -10 ⁻¹² **	35-60**	0.02-0.6†
<i>Sphagnum</i> -Torf (Katotelm)+	<3 3-5 5-6 >8	1·10 ⁻¹ -5·10 ⁻⁵ 5·10 ⁻⁵ -1·10 ⁻⁶ 1·10 ⁻⁶ -2·10 ⁻⁷ 2·10 ⁻⁷ -1·10 ⁻⁹	80-98††	0.18-0.7***
<i>Sphagnum</i> -Torf (Katotelm)**	10% 10-20% 35-45% 55-65%	3·10 ⁻⁴ -1·10 ⁻⁴ * 7·10 ⁻⁵ -2·10 ⁻⁵ 1·10 ⁻⁵ -3·10 ⁻⁶ 8·10 ⁻⁷ -2·10 ⁻⁸		0.17-0.24 0.05-0.12 0.025-0.08 ≈ 0.01

Tabelle 2.5 Mittlere hydraulische Leitfähigkeit K , Porosität n , Speicherkoeffizient S für die im Untersuchungsgebiet vorkommenden Gesteine. Bei den Torfen ist zusätzlich der Zersetzungsgrad H (Humifikation) angegeben (nach vonPost, 1924 (Ingram, 1983) bzw. Varlygin, 1924 (Fuchsman, 1980)). Die Daten entstammen folgenden Quellen: *Chason and Siegel, 1986; **Freeze and Cherry, 1979; ***Ingram (1983), nicht nach Zersetzungsgrad differenziert; †Richard et al. (1978), Lokalform Chnoden; ††Schuch (1980), nicht nach Zersetzungsgrad differenziert; +Baden und Eggelsmann (1963); ++Ivanov (1981).

Die Abnahme der Leitfähigkeit und des Speicherkoeffizienten in einem Torf sind auf die zunehmende Humifizierung der organischen Substanz und der damit einhergehenden Verkleinerung der «Korngrösse» zurückzuführen. Die Humifizierung findet wesentlich in der obersten, zeitweise aeroben Schicht statt, welche häufig als Acrotelm bezeichnet wird (Ingram, 1978). Der Acrotelm ist der eigentliche Boden eines Moores. Je nach Aufenthaltsdauer im Acrotelm ist der resultierende Torf mehr oder weniger stark zersetzt und verändert sich kaum mehr, nachdem die anaerobe Zone wegen der Torfsedimentation und des gestiegenen Wasserspiegels höher zu liegen kommt. Diese Zone wird häufig Katotelm genannt und entspricht einem Gestein. Gerät der Katotelm in eine aerobe Zone (erhöhte biologische Aktivität, das heisst er wird zu einem Boden) verringern sich Leitfähigkeit und Speicherkoeffizient weiter. Dieses Verhalten steht daher im Gegensatz zu mineralischen Nassböden.

Für die im Untersuchungsgebiet vorkommenden Böden werden die in Tab. 2.6 dargestellten Werte angenommen.

³So zeigt der fossile A_{h,b}-Horizont der Lokalform Chnoden die physikalischen Merkmale der umgebenden G-Horizonte und ist einzig durch seine Farbe und organischen Reste erkennbar.

Bodenart	Tiefe	K [m/s]	n [%]	S [m ³ /m ³]
Hangley *	0–20	≈ 10 ⁻⁶	≈ 75	≈ 0.1
	20–60	≈ 10 ⁻⁷	≈ 55	≈ 0.05
	60–120	≈ 10 ⁻⁸	≈ 45	≈ 0.03
<i>Sphagnum</i> -Torf (Acrotelm)	0–10	≈ 10 ³ **	≈ 99 ***	≈ 0.35 †
	10–20	≈ 10 ²	≈ 98	≈ 0.25
	20–30	≈ 10 ⁰	≈ 97	≈ 0.15

Tabelle 2.6 Mittlere hydraulische Leitfähigkeit K , Porosität n , Speicherkoeffizient S für Hangley (Lokalformen Chnoden und Gottschalkenberg), sowie für den Acrotelm eines *Eriophorum-Sphagnum*-Torfes. Der Speicherkoeffizient S des Hangleys entspricht jenem Porenvolumen, welches in der Saugspannungsklasse 1–80 hPa entwässert wird. Quellen: *Richard et al. (1978), Lokalformen Chnoden und Gottschalkenberg, **Ingram (1983), Formel 3.37, $B=5000$, $m=3$, ***Hayward, P. M. and R. S. Clymo (1982), †Vorob'ev (1963).

Für alle diese Parameter sind ausser den vermutlich als Mittelwert gewonnenen Werten keine weiteren statistischen Angaben vorhanden. Bekannt ist, dass die Variabilität der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit lognormal verteilt ist (Freeze and Cherry, 1979). Die hydraulische Leitfähigkeit variiert für die jeweiligen Gesteine beziehungsweise Böden um etwa einen Faktor 10.

2.4. AKTUELLE VEGETATION⁴

2.4.1. Aktuelle Vegetation

Die aktuelle Vegetation unterscheidet sich stark von der ursprünglichen, da einige Teile des Turbenrietes zwischen 1860 bis 1945 abgetorft oder aufgeforstet wurden. Die Vegetation der genutzten Gebiete verändert sich während einigen Jahrzehnten viel stärker als in den ursprünglichen. Die Vegetation der ursprünglichen Gebiete ändert sich während einigen Jahrhunderten kaum und befindet sich in einem quasi-stationären Zustand. Aufgrund der in einem Raster angelegten Vegetationsaufnahmen lässt sich die Ausdehnung der einzelnen Pflanzenformationen berechnen. Die Pflanzenformationen nehmen folgende Flächen ein: Flachmoor 3.5 ha, Hochmoor 2.7 ha, verheidetes Hochmoor 4.4 ha und Fichtenwald 3.8 ha (Abb. 2.12). Das verheidete Hochmoor und etwa ein Drittel des Fichtenwaldes sind als Folge der Entwässerung und Abtorfung entstanden. Das Flachmoor im Turbenriet wird durch Arten wie Rasenbinse (*Trichophorum caespitosum*), Teufelsabbiss (*Succisa pratensis*), Igelfrüchtige Segge (*Carex echinata*) und Sumpferzblatt (*Parnassia palustris*) charakterisiert. Für das Hochmoor typisch sind Rotes Torfmoos (*Sphagnum magellanicum*), Scheidiges Wollgras (*Eriophorum vaginatum*), Spitzblättriges Torfmoos (*Sphagnum angustifolium*), Schnabelsegge (*Carex rostrata*), Rosmarinheide (*Andromeda polifolia*), Moosbeere (*Oxycoccus quadripetalus*). Im verheideten Hochmoor dominieren Zwergsträucher wie Moorbeere (*Vaccinium uliginosum*) und Heidelbeere (*Vaccinium myrtillus*). Der Fichtenwald ist geprägt durch Vaccinien und unterschiedlich hohen Anteil an Fichte (*Picea excelsa*).

2.4.2. Nutzung, Torfabbau und erste Regenerationsmassnahmen

Die Nutzung des Turbenriets lässt sich in vier Phasen gliedern. In der ersten Phase, welche bis etwa 1860 dauerte, wurde das Moor nur unwesentlich genutzt, vielleicht wurde etwas Streue gemäht und es wurden einzelne Bäume genutzt. In der zweiten Phase, welche von 1860 bis 1945 dauerte, wurde wiederholt Torf abgebaut (1860–1870, 1918, 1943–1945), entwässert (1918, 1943–1945) und aufgeforstet (ungefähr 1915 ?). In der dritten Phase von 1945 bis 1980 wurde das Moor sich selbst überlassen. In der vierten Phase seit 1980 wird versucht, die ursprüngliche Vegetation des Moores durch Eingriffe zu fördern. Dazu werden Fichten abgeholzt und Drainagegräben wieder aufgefüllt.

⁴Eine ausführliche Darstellung der Vegetation und der Nutzung findet sich in Schneebeli, 1988.

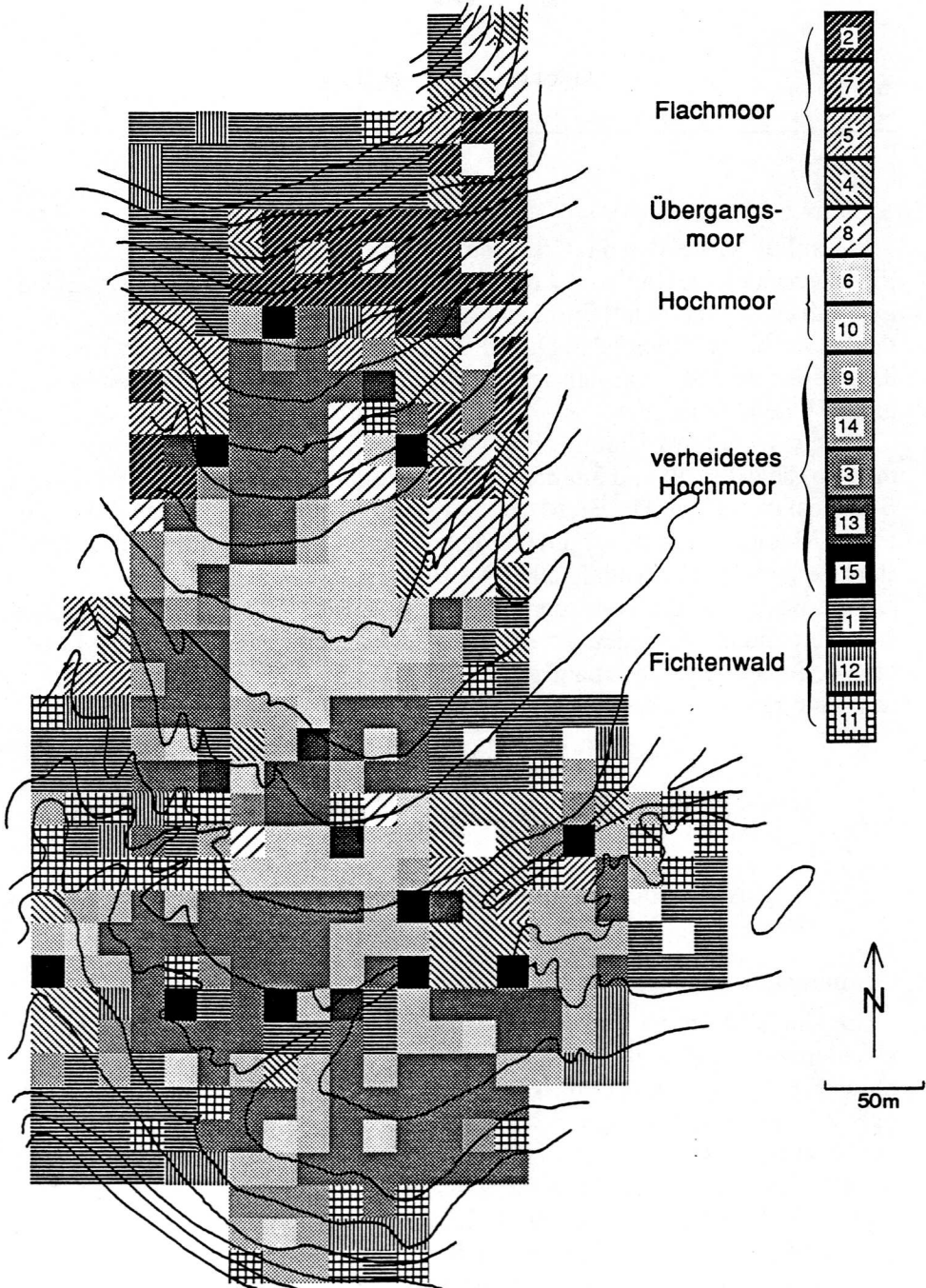


Abbildung 2.12 Räumliche Verteilung der Pflanzengesellschaften 1984. Die Graustufen der Hochmoorgesellschaften entsprechen etwa dem Feuchtigkeitsgradienten, wobei nass hellen Flächen, trocken dunklen Flächen entspricht. In weissen Quadraten wurde keine Vegetationsaufnahme gemacht (aus Schneebeil, 1988).

In Kapitel 3.1 werden die Ursachen der Torfbildung aus bodenkundlicher Sicht behandelt, in Kapitel 3.2 die für die Bildung von Mooren notwendigen hydraulischen und hydrologischen Gesetzmässigkeiten und die Lösungsmethoden für die resultierenden Differentialgleichungen dargestellt. In Kapitel 3.3 werden die Ideen aus den vorangehenden Kapiteln zu einem Moorwachstums-Modell kombiniert.

Um die Weiterentwicklung eines Ökosystems voraussagen zu können, müssen die externen und internen Faktoren und Prozesse bekannt sein. Der Boden ist mit seinen Phasen Matrix, Flüssigkeit und Gas derjenige Faktor in einem Moorökosystem, der am ehesten direkt beeinflusst werden kann. Er steht deshalb hier im Mittelpunkt. Das Wasser, als hauptsächlichste Flüssigkeit im Boden, ist im Moor sehr eng mit der Entstehung des organischen Bodens verbunden. Im Gegensatz dazu ist der Wasserhaushalt in einem Mineralboden über lange Zeit, häufig während mehreren tausend Jahren, durch das Muttergestein vorgegeben.

3.1. FAKTOREN UND PROZESSE IM MOORBODEN

3.1.1. Klassifikation torfbildender Ökosysteme

Geomorphologische und vegetationskundliche Definition

Um Unklarheiten zu vermeiden, werden die Begriffe «Hochmoor» und «Niedermoor» definiert¹. Geomorphologisch lassen sich **Hoch- und Niedermoor** klar fassen: Beide umfassen eine mindestens mehrere Dezimeter mächtige, vorwiegend organische Schicht, die aus der unvollständigen Zersetzung der Pflanzen herrührt. Sie unterscheiden sich hydrologisch dadurch, dass das Niedermoor vorwiegend durch Grundwasser aus den angrenzenden mineralischen Sedimenten gespiesen wird, das Hochmoor nur durch Grundwasser, welches durch organische Sedimente floss. Diese Kriterien sind in ebenen Lagen ohne gespanntes Grundwasser klar. Undeutlich wird dieses Kriterium

¹Die Abgrenzung zwischen Hoch- und Niedermoor kann, wie von Du Rietz (1954) definiert, durch die Mineralbodenwasserzeiger (MBWZ) gezogen werden. Eine neuere, etwas revidierte Darstellung liefert Oberdorfer (1977).

in Hanglagen, besonders in Sattellagen, wo die zunehmende Verdünnung des mineralischen Grundwassers durch organisches Grundwasser zu vielfältigen und grossflächigen Übergängen führt².

Die Vegetation eines Niedermoores umfasst, je nach chemischer Beschaffenheit des Grundwassers und Vernässung des Bodens, zahlreiche verschiedene Pflanzengesellschaften (Übersicht z.B. in Oberdorfer, 1977). Sie können eine Baumschicht aufweisen (Erlen-, Birkenbruchwälder), aber auch wiesenartig sein (Grossegengesellschaften). Die Hochmoorvegetation wird aus Pflanzen aufgebaut, die unter nährstoffarmen Bedingungen ausgesprochen effizient assimilieren. Dies sind vor allem Bleichmoose (*Sphagna*), einige Sauergräser (*Cyperaceen*), ein Bärlapp (*Lycopodium inundatum*), wenige krautige Pflanzen (*Droseraceen*, *Melampyrum sp.*), Zwergsträucher (*Ericaceen*). Je nach den Belüftungsverhältnissen wachsen auch Bäume (*Pinus mugo*, *Pinus silvestris*, *Picea abies*, *Benula sp.*) (Kusel - Fetzmann, 1982). Alle «Hochmoorarten» kommen auch in nährstoffarmen, sauren Niedermooren vor. Einzig die mengenmässige Zusammensetzung zeichnet die Hochmoorvegetation aus (Du Rietz, 1954). Die Zusammensetzung der einzelnen Vegetationseinheit ist dabei in recht typischer Weise von den Bodeneigenschaften abhängig (Wildi, 1977; Malmer, 1986; Schneebeili, 1988).

Bodenkundliche Definition

Die bodenkundliche Klassifikation der Moorböden ist im Vergleich zu den Mineralböden wenig differenziert. In keiner Klassifikation werden entwässerte, sich zersetzende, organische Böden von wachsenden unterschieden, obwohl sie ganz andere Eigenschaften aufweisen. Dies mag daher rühren, dass sie sich optisch nur wenig unterscheiden und sich die Klassifikationen organischer Böden kaum um funktionelle Zusammenhänge bemühen. Im folgenden wird versucht, die Soil Taxonomy (Soil Survey Staff, 1975) so zu erweitern, dass die Funktion und die ablaufenden Prozesse in der Klassifikation berücksichtigt werden können. Die Anlehnung an die Soil Taxonomy geschieht, da diese ausdrücklich die Klassifikation der organischen Böden als provisorisch betrachtet. Namen, welche der Soil Taxonomy entsprechen sind nicht hervorgehoben, neu geschaffene Begriffe sind *kursiv*. Fett gedruckt ist der für die Namen der tieferen Ordnung benutzte Wortteil. Zuerst wird die heute gültige Klassifikation der organischen Böden nach der Soil Taxonomy vorgestellt (nach Everett, 1983). Danach werden die Erweiterungen dargelegt.

Die organischen Böden werden in der Ordnung Histosols zusammengefasst. Die Unterordnungen umfassen die Fibrists für schwach zersetzte Torfe, Hemists für mittel zersetzte Torfe, Sapristis für stark zersetzte Torfe, Folists

²Du Rietz (1954) bezeichnet solche Erscheinungen recht treffend als «Pseudohochmoor».

für Rohhumusböden, *Limnists* für Seesedimente. In den Übergruppen («*great groups*») werden die Präfixe *Cryo*, *Boro*, *Medi*, *Tropo* für das Temperaturregime benutzt, unter welcher der Histosol entstanden ist. Zusätzlich kann auch das Präfix *Sphagno* (für torfmoosreiche Torfe) oder *Sulpho* (für schwefelwasserstoffreiche Torfe) verwendet werden. In den Untergruppen werden als Übergang zu anderen Ordnungen («*intergrades*») die Bezeichnungen *Fibric*, *Hemic*, *Sapric*, *Sphagnic* und *Fluvaquentic* (für mineralische Zwischenschichten) verwendet. Für untypische Formen der Übergruppen werden die Bezeichnungen *Hydric* (im Wasser entstanden), *Limnic* (Seeuntergrund), *Lithic* (Felsuntergrund), *Pergelic* (Permafrost im Untergrund), *Terric* (nicht unmittelbar im Wasser entstanden) verwendet. In der Familie werden als weitere Charakteristika Korngrösse, Mineralogie, Bodenreaktion (*euic* für alkalische Böden, *dysic* für saure Böden), Zusammensetzung der limnischen Schicht und Mächtigkeit der organischen Schicht bei felsigem Untergrund berücksichtigt. Soweit die heute gültige Soil Taxonomy.

Die Begriffe *Hydric* und *Terric* sind für die genaue Beschreibung von Torfböden von Bedeutung, was in der Soil Taxonomy kaum zum Ausdruck kommt. So sind Hochmoortorfe der Bulten³ *Terric Sphagnofibrists*, *Terric Sphagnohemists* oder *Terric Sphagnosapristis*, Hochmoortorfe der Schlenken die entsprechende *Hydric*-Form. Niedermoortorfe sind immer unter Wasser entstanden, es sind deshalb immer *Hydric*-Torfe.

Um nun die aktuelle Funktion und den Zustand des Histosols besser auszudrücken, werden die Unterordnungen der *Fibrists*, *Hemists* und *Sapristis* in die Gruppe der *Aquists* (von lateinisch *aqua*, Wasser) zusammengefasst. Die Zersetzungsgrade werden nicht mehr als Bezeichnung der Unterordnung, sondern als Präfix gebraucht, *fibro*, *hemo*, *sapro*. Die Zersetzungsgrad-Präfixe folgen unmittelbar nach dem Gruppenbezeichner. Damit wird die grosse Bedeutung des Zersetzungsgrades für die Funktion des Torfbodens ausgedrückt. Um die ganz verschiedenen Prozesse in einem wachsenden und in einem zersetzenden Torfboden auszudrücken, werden auf der Stufe der Übergruppen neue Begriffe geschaffen. Ist ein *Aquists* zu mindestens 90 % von torfbildenden Pflanzen bedeckt und liegt dessen Wasserspiegel höchstens 20 cm unter der mittleren Oberfläche, so wird die Bezeichnung *cresc* (von lateinisch *crescere*, wachsen) vorangestellt. Ist weniger als 90% der Oberfläche von torfbildender Vegetation bedeckt, und liegt der Wasserspiegel tiefer, wird die Bezeichnung *des* (von lateinisch *destruere*, zerstören, zersetzen) vorangestellt.

Ein entwässerter, stark zersetzter Hochmoortorf unter Fichtenwald würde dann als *Sphagnosaprodesaquist*, *dysic* bezeichnet, ein wachsender Flach-

³Bulten sind die wenige Zentimeter bis Dezimeter über dem mittleren Wasserspiegel liegenden Kuppen mit einer horizontalen Ausdehnung von Dezimetern, die Schlenken die unter dem mittleren Wasserspiegel liegenden Hohlformen.

moortorf mittleren Zersetzungsgrades in borealem Klima als Borohemocrescaquist, euic.

Mit diesen Erweiterungen kann der aktuelle Zustand des Torfbodens eindeutig ausgedrückt werden. Die Bedeutung der Bezeichnung des Torfbodens lässt sich indirekt aus dem sehr verschiedenen hydrologischen Verhalten von Crescaquists und Desaquists herauslesen. So zeigen Schmeidl et al. (1970), dass die Abflussspitze aus einem Crescaquist etwa halb so gross ist wie bei einem Desaquist.

3.1.2. Bodenbildende Faktoren

Nach der Definition von Jenny (1941) sind bodenbildende Faktoren unabhängig von der Entwicklung des Bodens und damit in Zeit und Raum invariant. Als Faktoren betrachtet er Zeit, Klima, Topographie, Muttergestein, Organismen. Dabei ist es wesentlich, dass er die Faktoren Klima, Topographie, Muttergestein und Organismen in zwei virtuelle Gruppen aufteilt, nämlich in eine Umweltkomponente, die in einem regionalen System wirksam ist und in eine Bodenkomponente, die im Pedon, dem untersuchten Bodenausschnitt, wirksam ist.

Zeit

Ob es sich um einen jungen oder alten Moorboden handelt, hängt davon ab, welche Schichtdicke des organischen Sedimentes als Boden betrachtet wird. Definieren wir Boden als jenen Teil der Geosphäre, in der 90 % des jährlichen Energieumsatzes stattfindet, so ist der Hochmoorboden kaum mehr als einige Jahrzehnte bis wenige Jahrhunderte alt und weniger als einen halben Meter mächtig⁴. Von einem historischen Gesichtspunkt aus kann der Boden einige Meter tiefer beginnen und mehrere tausend Jahre alt sein.

Die Beschreibung der Prozesse ist einfacher, wenn wir die erste Definition verwenden. Der Gleichgewichtszustand in einem Moorboden wird dann nach einigen Jahrzehnten bis Jahrhunderten erreicht und ist vergleichbar mit einem mineralischen Boden (Beispiele in Jenny, 1941).

Der Zeitpunkt der Moorbildung ist nicht auf einen bestimmten Zeitraum beschränkt: Neubildungen von Moorböden sind in den letzten Jahrtausenden immer wieder vorgekommen (Zusammenstellung in Frenzel, 1983, p. 48).

⁴Diese oberste Schicht bezeichnet Ivanov (1981) als «aktivni gorizont», was Ingram (1978) mit «Acrotelm» übersetzt. Die tieferliegenden Schichten werden als «inertni gorizont» bezeichnet, was Ingram mit «Katotelm» übersetzt. Der Katotelm ist im hier verwendeten Sinn kein Boden mehr, sondern ein Gestein.

Muttergestein

Das Muttergestein eines Moorbodens kann ein mineralisches Sediment, ein entwickelter Boden, oder der Torf⁵ selber sein. Das mineralische Sediment kann von sehr variabler Zusammensetzung sein, meist ist es wenig wasser-durchlässig. Unter speziellen hydrologischen Bedingungen können aber auch kiesige Sedimente Muttergestein ausgedehnter Moorbildungen sein (Schuch, 1977). Die chemische Zusammensetzung spielt kaum eine Rolle für die Geschwindigkeit des Moorbodens, einzig die Vegetation ändert sich. Ein imposantes Beispiel untersuchte Neishtadt in Westsibirien (in Frenzel, 1983, Fig. 2.12), wo sich südlich der Wasserscheide auf kalk- und gipshaltigem Gestein ein Seggen-Braunmoos-Moor von etwa 3 m Mächtigkeit über eine Distanz von mehr als 10 km entwickelte, nördlich der Wasserscheide, auf saurem Gestein, ein gleich mächtiges und ausgedehntes ombrogenes *Sphagnum*-Moor.

Topographie

Organische Böden finden sich am häufigsten in ebenen Lagen. Unter günstigen klimatischen Bedingungen entstehen organische Böden auch an Hängen, welche bis zu 50% geneigt sind. Die Ausdehnung in der Fläche ist durch erodierende Landschaftselemente, wie Bäche oder Dolinen, begrenzt.

Klima

Moore entstehen in allen Klimazonen, wo genügend Wasser vorhanden ist, besonders dort, wo der Niederschlag höher als die Evapotranspiration ist. Sie treten zwischen 60° südlicher Breite bis etwa 75° nördlicher Breite auf. Generell wachsen Moore, wenn der Gleichgewichts-Wasserspiegel über dem Mineralboden liegt. Am meisten Torf sedimentiert zwischen 50° bis 60° nördlicher Breite. Die Torfsedimentation ist in höheren Breiten geringer wegen der niedrigen Pflanzenproduktion, in niedrigeren Breiten wegen der schnelleren Zersetzung. Eine Übersicht über die Moorbildungen der Erde findet sich in Schneider (1980).

Organismen

Histosols sind bezüglich der Organismen sehr spezielle Böden, da wegen der meist vorhandenen Anaerobie ausser Pflanzen nur Bakterien und Pilze im Boden leben. Die einen Histosol besiedelnden Organismen schaffen ihr Muttergestein selber und es mag deshalb der Eindruck entstehen, dass der bodenbildende Faktor «Organismen» in einem Crescaquist nicht existiert. Die

⁵Der Begriff «Muttergestein» mag für Torf ungewohnt scheinen, vor allem deshalb, weil Torfboden und Torfsediment einen kontinuierlichen Übergang bilden.

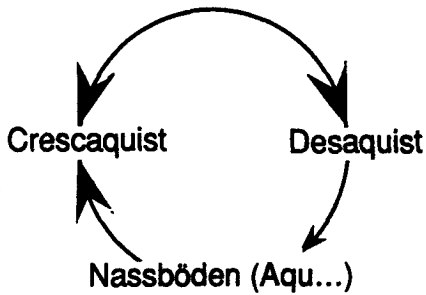


Abbildung 3.1 Mögliche Sequenzen bei der Entwicklung der Aquisten. Häufig aufeinander folgende Entwicklungen sind mit grossen Pfeilen markiert.

Stratigraphie von Torfböden zeigt nun häufig eine ausgesprochene, zufällige Wechsellagerung unterschiedlicher Zersetzungsgrade und Zusammensetzung in horizontaler als auch vertikaler Richtung (Beispiele in Barber, 1981; Tolonen, 1985). Dies heisst nichts anderes, als dass zum gleichen Zeitpunkt, bei gleichem Muttergestein, gleicher Topographie und gleichem Klima sich je nach Besiedlung des Muttergesteins ein unterschiedlicher Boden entwickelt. Es existiert damit der Faktor «Vegetation».

3.1.3. Bodenbildende Prozesse

Zur besseren Übersicht werden die bodenbildenden Prozesse in drei Böden betrachtet: in einem Crescaquist, dessen Muttergestein mineralisch ist, in einem Crescaquist, dessen Muttergestein organisch ist und in einem Desaqvist. Die Entwicklungsrichtungen der Aquisten sind in Abbildung 3.1 dargestellt. Abschliessend werden die Begriffe Verlandung, Versumpfung und Sukzession in Feuchtgebieten diskutiert, die als wesentliche Bestandteile der bodenbildenden Prozesse zu betrachten sind.

Prozesse in einem Crescaquist über mineralischem Muttergestein

Eine mächtige organische Schicht bildet sich über einem Mineralboden, wenn die aerobe Bodenzone dünn ist oder wenn die biologische Aktivität gering ist. Eine geringe biologische Aktivität kann durch Anaerobie, extreme Klimabedingungen oder eine niedrige Qualität des organischen Materials verursacht sein. Die Zusammenhänge zwischen Primärproduktion, Zersetzung und Akkumulation organischen Materials sind im Detail noch wenig bekannt (Swift, 1979, p. 279). Im folgenden werden die wesentlichen Prozesse, soweit bekannt, vorgestellt (Abb. 3.2).

Die aerobe Bodenzone nimmt bei hoher Wassersättigung sehr rasch ab. Da die Sauerstoff-Diffusionsrate in Wasser sehr klein ($2.4 \cdot 10^{-5} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$) im Vergleich zu derjenigen in der Luft ist ($1.8 \cdot 10^{-1} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$), (Flühler, 1973) entstehen in nassen Böden auch bei geringer biologischer Aktivität rasch anaerobe Verhältnisse. Boggie (1977) stellte fest, dass erst bei einem mittleren Wasserspiegel von tiefer als 25 cm in den obersten 5 cm des Torfbodens das

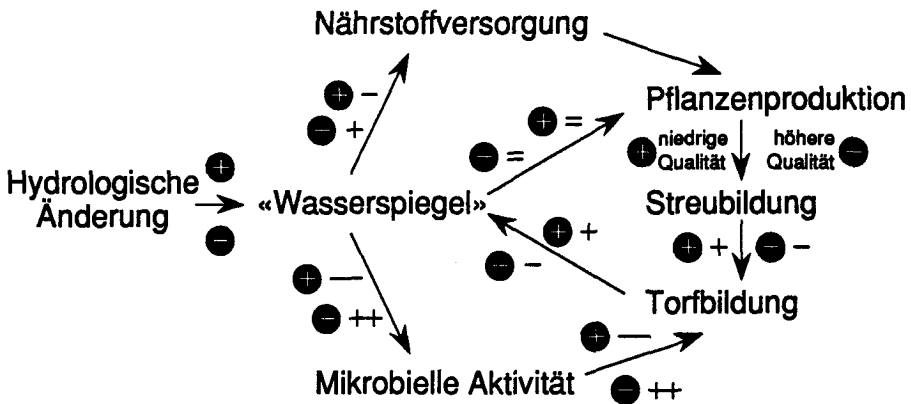
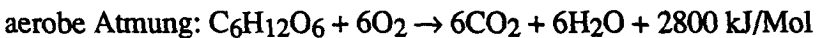


Abbildung 3.2 Beziehungen zwischen verschiedenen Prozessen bei einer geringen hydrologischen Änderung in einem Crescaquist (nach Moore, 1986). Die ausgefüllten Kreise bedeuten in Bezug auf das veränderte Wasserregimes nasser + beziehungsweise trockener -. Die nicht eingekreisten Vorzeichen beziehen sich auf die am Pfeilende genannte Wirkung (+ entspricht Verstärkung, Vergrößerung, - entspricht Abschwächung, Verminderung, = entspricht wirkungslos).

ganze Jahr ein Sauerstoffgehalt von mindestens 2% herrschte. Die Ursache für die hohe Wassersättigung kann natürlichen Ursprungs sein. In einigen Fällen, besonders in Westeuropa, spielte der Mensch für den Beginn der Moorbildung eine bedeutende Rolle (Moore et al., 1984). Wesentlich scheint vor allem, dass durch Abholzung Böden stärker vernässen, Nährstoffe verstärkt ausgewaschen wurden, und die Streuequalität der nach der Rodung gewachsenen Pflanzen für Destruenten ungünstiger war (Moore, 1986).

Unter anaeroben Verhältnissen wird die organische Substanz nur langsam abgebaut, da die Mikroorganismen die organische Substanz nicht veratmen sondern vergären (Scheffer und Schachtschabel, 1982).



Der Energiegewinn bei einer Gärung ist damit rund fünfzehnmal kleiner als bei der Atmung, der Energieaufwand für den Abbau organischer Substanz entsprechend grösser.

Anaerobe Bodenverhältnisse können entweder durch direkte Messung des Sauerstoffgehaltes oder indirekt durch Messung des Redoxpotentials bestimmt werden. Eine Zusammenfassung von Clymo (1983, p. 190) über Redoxmessungen zeigt, dass meist wenig unter der Wasseroberfläche die Reduktion von SO_4^{2-} zu S^{2-} erfolgt. Quantitative Beziehungen zwischen Redox-

potential, Mikroflora und Abbauprozessen konnten bis heute nicht bestimmt werden.

Die verstärkte Zufuhr von organischen Säuren führt bei der Versumpfung (siehe Kap. 3.3.4) zu einer weiteren Ausbreitung der organischen Böden, da die Aktivität der Mikroorganismen, speziell der Bakterien, in sauren Böden viel geringer ist als in basischen oder neutralen (Swift et al., 1979, p. 244).

Die Zersetzung (Abbau) organischen Materials kann in erster Näherung mit einer Reaktion 1. Ordnung beschrieben werden, wobei p Zersetzungssrate, m organische Masse, α Zersetzungsfaktor.

$$p = dm/dt = -\alpha m \quad (3.1),$$

Integriert ergibt Gleichung (3.1)

$$M = m_0 e^{-\alpha t} \quad (3.2),$$

wobei M residuale Masse nach der Zeit t , m_0 Anfangsmasse, t Zeit.

Die Bestimmung des Zersetzungsfaktors α unter natürlichen Bedingungen ist schwierig, da das ursprüngliche System bei der Messung meist stark gestört wird. Beispiele von Messungen des Zersetzungsfaktors α finden sich in Clymo (1984).

Zur Stabilisierung des einmal vorhandenen Akkumulationssystems trägt die hydraulische Leitfähigkeit am meisten bei. Je feiner die organische Substanz zersetzt wird, umso kleiner ist ihr scheinbarer Korndurchmesser und umso geringer die hydraulische Leitfähigkeit. Eine Reduktion der Leitfähigkeit führt zu einer Vernässung und diese reduziert die Abbaurate mit dem Ergebnis, dass der neu gebildete Torf wieder durchlässiger wird. Diese Rückkoppelung stabilisiert das torfbildende System entscheidend. Die hydraulische Leitfähigkeit hängt nicht vom Muttergestein ab, sondern sie ist eine Folge der Bodenprozesse. Deshalb können Terric Crescaquists überhaupt entstehen.

Prozesse in einem Crescaquist über organischem Muttergestein

Die Prozesse in einem Crescaquist über organischem Muttergestein unterscheiden sich physikalisch kaum von den Prozessen über mineralischem Muttergestein. Die Erhaltung einer kleinen aeroben Zone ist jedoch aus bodenmechanischen Gründen mit zunehmender Mächtigkeit des Torfes besser gewährleistet. Sinkt der Wasserspiegel witterungsbedingt ab, so wird die Auflast erhöht und der Torfboden elastisch zusammengedrückt. Steigt der Wasserspiegel, quillt der Torfboden wieder auf. In nicht vorbelasteten Torfböden ist die Kompressibilität⁶ sehr gross, und die Bewegungen der Torf-

⁶Das Kompressibilität α [m^2/N] ist definiert durch den Quotienten zwischen der Zusammendrückung ϵ [m/m] und der Spannungsdifferenz $\Delta\sigma$ [N/m^2], $\alpha = \epsilon/\Delta\sigma$.

oberfläche deshalb gut messbar (Schneebeili, 1988, p. 111). Die Oberfläche bewegt sich somit in derselben Richtung wie der Wasserspiegel. Dieser Vorgang bewirkt eine stets geringmächtige aerobe Zone.

Prozesse in einem Desaquist

Die Entstehung eines Desaquists setzt immer eine Entwässerung voraus. Diese kann unter natürlichen Bedingungen eine Folge von Torf-Verkarstung (Ringler, 1978, dort auch weitere Literaturhinweise; Schneebeili, 1988), von der Verlegung oder Vertiefung von Bachläufen (Kapitel 2.3.2; Kulczynski, 1949; Heinselmann, 1970), von Klimaschwankungen (Barber, 1981) oder auch von anthropogenen Einflüssen sein. Die Vegetation eines Desaquist bildet keinen Torf mehr.

Bei der Entstehung eines Desaquists wird zuerst das Porenvolumen durch Setzung verringert. Durch diese Setzung nimmt die hydraulische Leitfähigkeit ab (Definition Kap. 3.2) und die Scherfestigkeit des Bodens zu. Sie führt damit zu einer ersten Verkleinerung der durch die Entwässerung geschaffenen aeroben Zone und zu einem bodenmechanisch günstigeren Standort für Bäume. Sekundär zersetzt sich wegen der grösseren mikrobiellen Aktivität infolge der gegenüber dem ursprünglichen Zustand vergrösserten aeroben Zone das organische Material und die gröberen Fasern des Torfes werden weiter zerkleinert. Setzung und Zersetzung werden zusammengefasst als Sackung bezeichnet. Die Sackung verkleinert die Korngrösse, was zur Abnahme der hydraulischen Leitfähigkeit und damit zur neuerlichen Versumpfung führt (Schneebeili, 1989). Bei einer Entwässerung vergrössert sich der Acrotelm, die belüftete Schicht, in den Katotelm hinein. Die Masse des ursprünglichen Katotelms nimmt ab, und zusätzlich ist der Zersetzungsfaktor α vermutlich grösser als in einem Crescaquist. Je grösser die Zersetzungsrate α ist, umso schneller steigt der Wasserspiegel wieder an. In diesem Fall wird die Korngrösse «schnell» verkleinert, und die Mächtigkeit der Schicht nimmt wegen der Veratmung des Torfes ab. Eine Vegetation, welche eine grosse aerobe Zone schafft bei gleichbleibender Tiefe der Sohle des Entwässerungsgrabens, beschleunigt deshalb die Wiederversumpfung (Abb. 3.3).

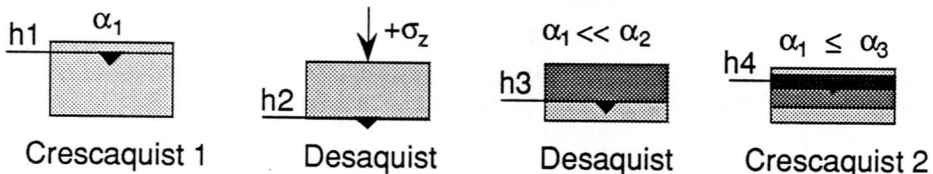


Abbildung 3.3 Schema der Prozesse bei der Entwicklung eines Desaquists. h_1, h_2, h_3, h_4 sind Wasserspiegel, $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ die Zersetzungsfaktoren, σ_z ist die Auflast infolge Entwässerung. Die Graustufen zeigen qualitativ die scheinbaren Korngrössernverteilungen. Dunkel ist feinkörniger, heller grobkörniger.

Über Geschwindigkeit und Ausmass dieses Prozesses liegen aus nicht landwirtschaftlich genutzten Flächen keine langjährigen direkten Messungen vor. Indirekt lässt sich die Veränderung anhand von Messungen des hydraulischen Potentials feststellen (Schneebeili, 1988). Die Form der Tiefenverteilung des hydraulischen Potentials in einem Desaquist ist ähnlich wie diejenige in pseudovergleyten Böden. Wegen der grossen Kompressibilität bleiben die Potentiale im Torf im gesättigten oder im nur sehr wenig ungesättigten Bereich, denn bei höheren Matrixpotentialen wird der Torf zusammengedrückt.

Die Veränderung der Leitfähigkeit wurde in landwirtschaftlich genutzten Böden von Lundin (1964 zitiert in (Ivanov, 1981)) untersucht. Die Abnahme der Leitfähigkeit vor der Entwässerung, K_0 , hängt ab von der Zeit t , welche nach der Entwässerung verstrichen ist, der Tiefe der Entwässerung ζ (ursprünglicher Wasserspiegel–aktueller Wasserspiegel) und einem mit zunehmender Zeit abnehmenden Faktor γ . Die Abnahme ist durch eine nichtlineare Exponentialfunktion beschrieben. Für eine gegebene Entwässerungstiefe ζ und Zeit t ist die Leitfähigkeit $K(\zeta, t)$ dann

$$K(\zeta, t) = K_0 e^{-\gamma t \zeta} \quad (3.3).$$

Lundin (1964, in Ivanov(1981)) gibt für den Faktor γ die in Tabelle 3.1 aufgeführten Werte an⁷. Die Abnahme der Funktion γt für $t > 15$, und die daraus folgendene Zunahme der hydraulischen Leitfähigkeit, wird von Ivanov (1981) als Wirkung der landwirtschaftlichen Nutzung interpretiert.

Jahre nach Entwässerung t	bis 1	2	5	10	15	20	25	30
Wert von γ' für ζ in [m]	1.0	1.4	0.80	0.45	0.29	0.20	0.14	0.11
Wert von t' für ζ in [m]	1.0	2.8	4.0	4.5	4.4	4.0	3.6	3.4

Tabelle 3.1 Werte des Parameters γ und der Funktion $t' = \gamma t$ in Beziehung zur Zeit t (Zeitpunkt der Entwässerung $t=0$).

Die Abnahme der Leitfähigkeit ist in Abbildung 3.4 in Funktion der Zeit beziehungsweise der Entwässerungstiefe dargestellt. Aus Abbildung 3.4 geht hervor, dass die minimale Leitfähigkeit bei $t = 10$ a etwa hundertmal kleiner ist als die Anfangsleitfähigkeit K_0 . Die Abnahme der Leitfähigkeit in Funktion der Zeit lässt sich als Überlagerung zweier Exponentialfunktionen auffassen. Der Ast zwischen $0 < t < 3$ drückt vorwiegend die durch die bodenmechanische Setzung des Torfes verursachte Verdichtung aus. Der Ast zwischen $4 \leq t \leq 10$ drückt die biologische Zersetzung des Torfes aus. Die beiden Äste sind durch den Übergang zwischen $3 \leq t < 4$ verbunden. Die Leitfähig-

⁷Ivanov gibt die Formel und Tabellenwerte nicht für den Faktor γ , sondern für $t' = \gamma t$ an.

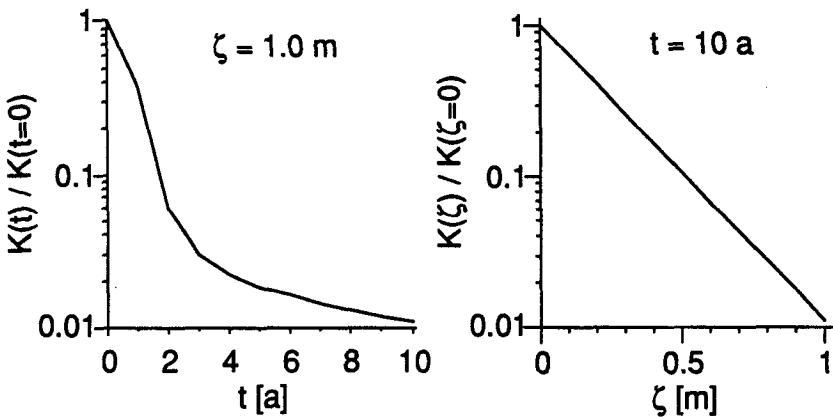


Abbildung 3.4 Abnahme der relativen Leitfähigkeit $K(t=0)$ in Abhängigkeit der Zeit t für eine konstante Entwässerungstiefe $\zeta = 1$ m und in Abhängigkeit der relativen Entwässerungstiefe ζ für den Zeitpunkt $t = 10$. Die Bilder wurden nach Formel (3.1) und den Daten von Lundin (1964) berechnet.

keit in Funktion der Entwässerungstiefe ζ nimmt exponentiell ab⁸. Für eine längere Zeitdauer ist die Abnahme nicht dargestellt, da die Analyse zeigt, dass schon eine sehr kleine Änderung von γ eine grosse Auswirkung auf die endgültige Leitfähigkeit hat. Da die Messung der hydraulischen Leitfähigkeit kaum genauer als auf 20% möglich ist, sind die Faktoren γ für t grösser 10 unsicher.

Die Abnahme der Leitfähigkeit K ist in einem entwässerten Gebiet nicht überall gleich, sondern vom Abstand zum Entwässerungsgraben abhängig. Sie ist unmittelbar neben dem Entwässerungsgraben am grössten, das heisst die Leitfähigkeit wird dort am kleinsten, und nimmt ab, je weiter sie vom Graben entfernt ist. Da die Abnahme der Leitfähigkeit auch eine Funktion der Zeit seit der Entwässerung ist, ist der Prozess rückgekoppelt. Er wird in Kapitel 5.1.3. simuliert.

Verlandung, Versumpfung und Sukzessionen

Die Entwicklung organischer Böden über lange Zeiträume ist meist mit einer Veränderung der bodenbildenden Vegetation verbunden. Es lassen sich im wesentlichen zwei Entwicklungsreihen unterscheiden, einerseits die Verlandung und andererseits die Versumpfung. Bei der Verlandung wird ein offenes Gewässer durch die Ablagerung organischer Substanz verkleinert. Aus bodenkundlicher Sicht wird ein Linnist beziehungsweise ein subhydrischer

⁸Ökologisch interpretiert heisst dies, dass ein doppelt so tiefer Entwässerungsgraben den Torfboden in Grabennähe nicht doppelt, sondern um ein Vielfaches verändert.

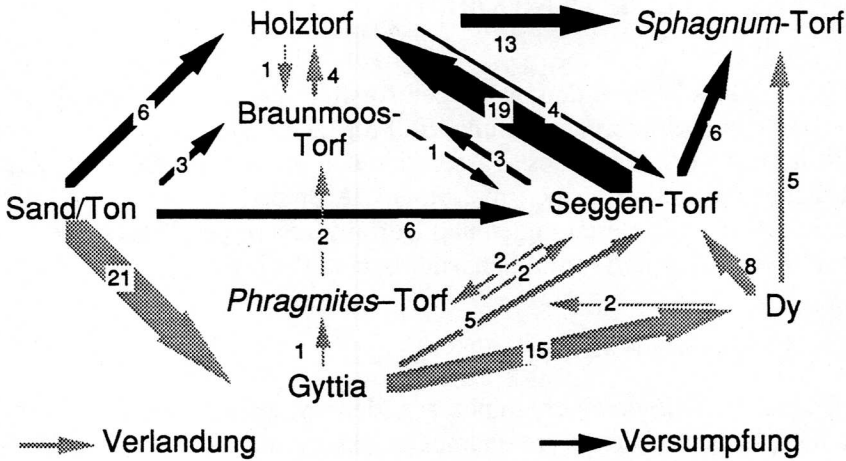


Abbildung 3.5 Stratigraphische Sequenzen aus Torfprofilen in Nordamerika. Die Pfeile verbinden übereinander liegende Schichten, die Nummern geben die Anzahl der beobachteten Sequenzen an. Das Diagramm ist sehr ähnlich für die britischen Inseln (nach Tallis, 1983). Gyttia wird auch als Seekreide bezeichnet, Dy ist ein sehr feinkörniges, organisches Sediment.

Boden (Arbeitskreis für Bodensystematik, 1985) von einer organischen Schicht überdeckt. Bei der Versumpfung wird ein mineralischer Nassboden von Torf überdeckt.

Bei einer Verlandung entsteht ein hydric Crescaquist, dessen Dichte durch den sehr geringen Überlagerungsdruck gering bleibt und dessen Zersetzungsgrad nicht in einer direkten Beziehung zu hydraulischen Parametern steht. Im Falle einer Versumpfung ist beim Anwachsen des terric Crescaquist die Leitfähigkeit immer so gering, beziehungsweise die Zersetzung so hoch, dass die wassergesättigte Zone sehr nahe der Oberfläche liegt. Andernfalls entwickelt er sich zu einem Desaquist.

Die Änderungen des Bodens zeigen sich in der Vegetation in typischen Sukzessionen. Tallis (1983, p. 323) konnte für die britischen Inseln und Nordamerika zeigen, dass die Sukzessionen einem klaren Muster folgen (Abb. 3.5).

Die häufigste Sequenz entspricht der klassischen Verlandung. Über dem mineralischen Sediment lagern sich zuerst limnische Sedimente ab, danach von Holztorfen überlagerte Seggen-Torfe, die häufig mit *Sphagnum*-Torfen überdeckt werden. Etwa ein Drittel der Vermoorungen sind Versumpfungen, das heisst über dem mineralischen Sediment bildet sich direkt eine Torfschicht. Die Sukzession tritt in dieser Form überall in den gemässigten Breiten der nördlichen Halbkugel auf.

3.2. WASSERFLUSS IN MOOREN

Der Wasserfluss ist nach den bisherigen Ausführungen der Schlüssel für das Verständnis der Moorentwicklung. Im Folgenden wird die physikalische Theorie auf das Verständnis des Wasserflusses in Mooren beschränkt. Eine ausführliche Übersicht über moorhydrologische Untersuchungen findet sich in Ingram (1983). Die Herleitungen und Definitionen folgen Freeze and Cherry (1979) und Scheffer und Schachtschabel (1982, p. 154 ff).

3.2.1. Gefüge des Bodens

Ein Boden, oder allgemeiner ein poröses Medium, besteht aus dem Korngerüst, der Matrix und dem Porenraum. Der Porenraum kann mit zwei Phasen gefüllt sein, Wasser und Luft, oder nur mit jeweils einer. Die Matrix besteht häufig aus verschiedenen Stoffen. Der Anteil des Porenraums am Gesamtvolumen eines Bodens wird durch die Porosität n ausgedrückt. Die Porosität n ist das Verhältnis zwischen dem Volumen des Porenraums V_p und dem Gesamtvolumen V_t .

$$n = V_p / V_t \quad (3.4)$$

Die Struktur eines Bodens variiert. Bei gleichbleibender Porosität weist ein Boden, je nach Verteilung der Korngrößen, zahlreiche kleine Poren oder wenige grosse Poren auf. Die Verteilung der Poren entscheidet darüber, wieviel Wasser aus einem Bodenvolumen ausfliesst, wenn der Wasserspiegel um ein gewisses Mass abgesenkt wird. In der Hydrologie wird das Verhältnis zwischen dem Volumen des ausgeflossenen Wassers V_w bei einer Absenkung des Wasserspiegels und dem Gesamtvolumen des Bodens V_t als Speicherkoefizient S bezeichnet. Die Bestimmung von S erfolgt nachdem nur noch sehr kleine Wassermengen aus der entwässerten Schicht in die gesättigte Zone fließen. Der Speicherkoefizient S entspricht bodenphysikalisch etwa jener Menge Wasser, welche sich in der Saugspannungsklasse 0–8 kPa befindet. Die Messung der Porosität und des Speicherkoefizienten werden in einem repräsentativen Elementarvolumen vorgenommen, um die kleinräumigen Fluktuationen auszufiltern.

3.2.2. Energie und Potential des Bodenwassers

Im Folgenden wird angenommen, dass die Matrix, in deren Zwischenräume sich Wasser befindet, starr oder zumindest wenig kompressibel ist. Zusätzlich ist zu berücksichtigen, dass die Phasen in einem chemischen und

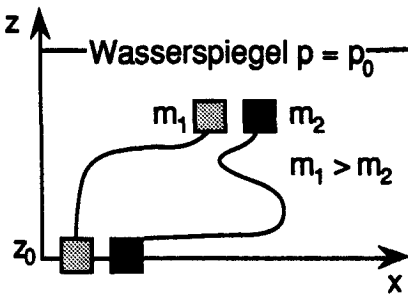


Abbildung 3.6 Energie zweier Wasserkörper in einem unterschiedlich porösen Medium. Das hellere Raster steht für grössere Porosität, das dunklere für geringere. Die Lageenergie des Wassers nimmt für die höhergelegenen Volumina zu, die Verformungsenergie nimmt in der negativen Richtung von z zu (siehe Gleichung 3.5). Im poröseren Boden muss mehr Energie aufgewendet werden, um Wasser auf ein höheres Niveau zu bringen als im dichteren Boden.

thermischen Gleichgewicht sind. Das Wasser weist deshalb eine konstante Dichte auf.

Die Energie des Wassers Φ in einem infinitesimalen Volumenelement dV bei konstanter Dichte des Wassers ρ_w und kleiner Fließgeschwindigkeit ist gegeben durch seine Höhe z gegenüber einem willkürlich festgelegten Bezugsniveau z_0 , der Masse des Wassers m im Volumenelement dV , der Gravitationskraft g und dem Druckgradienten dp

$$\Phi = mgz + m \int_{p_0}^p \frac{dp}{\rho_w} \quad (3.5)$$

Der erste Term der rechten Seite bezeichnet die Lageenergie, der zweite die Verformungsenergie. Der Kapillardruck oder das Matrixpotential dp ist im ungesättigten Boden negativ. In (3.5) wird die Energie durch die Porosität, die Lage und den darüberliegenden Druck beeinflusst⁹. Da sich Wasser in den hier betrachteten porösen Medien langsam bewegt, kann der zweite Term, die kinetische Energie, vernachlässigt werden. Es ist deshalb in einem homogenen Medium unwesentlich, welchen Weg ein Wasserteilchen zurücklegt (Abb. 3.6). Das hydraulische Potential ϕ wird als Folge von (3.5) definiert

$$\phi = gz + \int_{p_0}^p \frac{dp}{\rho_w} \quad (3.6)$$

Formel (3.6) kann vereinfacht werden zu

$$\phi = gz + \frac{p - p_0}{\rho_w} \quad (3.7a)$$

⁹Beispiel: Es wird ein Würfel aus einem porösen Medium von einem Kubikmeter betrachtet. Sei $n = 0.45$, $z = 2.0$ m, $g = 9.81$ ms⁻², $v = 0$ ms⁻¹, $p = 15$ kPa, dann ist die Gesamtenergie des Wassers im Würfel $\Phi = 0.45 \times 1000.0 \times 9.81 \times 2.0 + 0.45 \times 1000.0 \times 15.0 = 155.8$ kJ.

Wird der Druck p durch $\rho g(h - z)$ ausgedrückt, so wird (3.7a) zu

$$\phi = gz + \frac{[\rho g(h - z) + p_0] - p_0}{\rho} \quad (3.7b).$$

Die gekürzte Gleichung (3.7b) ergibt, dass sich die piezometrische Höhe h proportional zum hydraulischen Potential ϕ verhält

$$\phi = gh \quad (3.8).$$

Wegen ihrer Anschaulichkeit wird im weiteren die piezometrische Höhe (hydraulische Höhe) benutzt.

3.2.3. Transportgesetz des Wassers in Boden

Der Fliesswiderstand ist in einem porösen Medium direkt proportional zur Differenz der piezometrischen Höhe h und umgekehrt proportional zur Länge des Fliessweges l zwischen den Messpunkten. Die Flussdichte q wird durch den Proportionalitätsfaktor K , hydraulische Leitfähigkeit genannt, und den hydraulischen Gradienten i ausgedrückt (Gesetz von Darcy)

$$q = -Ki = -K \frac{dh}{dl} \quad (3.9)$$

Im dreidimensionalen Raum lautet das Gesetz von Darcy in Vektornotation

$$q = -K \left(\frac{\partial h}{\partial x}, \frac{\partial h}{\partial y}, \frac{\partial h}{\partial z} \right) = -K \nabla h \quad (3.10).$$

Die hydraulische Leitfähigkeit K bedeutet im dreidimensionalen, allgemeinen Fall kein Skalar, sondern ein symmetrischer Tensor 2. Ordnung.

Einfluss der Schichtung auf die mittlere Leitfähigkeit

Die meisten Böden und Sedimente weisen eine Schichtung auf. Die einzelnen Schichten sind unterschiedlich strukturiert und deshalb unterschiedlich durchlässig. Innerhalb der Schichten wird die hydraulische Leitfähigkeit als isotrop angenommen. B ist die Mächtigkeit des betrachteten Schichtpaketes, B_i bezeichne die i -te Schicht. Die mittlere Leitfähigkeit parallel zu den Schichten \bar{K}_p lässt sich dann ausdrücken mit

$$\bar{K}_p = \frac{1}{B} \sum_{i=1}^n K_i B_i \quad (3.11).$$

Diese Mittelung entspricht einem gewogenen arithmetischen Mittel. Die Schicht mit der grössten Leitfähigkeit bestimmt die mittlere Leitfähigkeit

parallel zu den Schichten \bar{K}_p . Die mittlere Leitfähigkeit senkrecht zu den Schichten \bar{K}_v ist

$$\frac{B}{\bar{K}_v} = \sum_{i=1}^n \frac{B_i}{K_i} \quad (3.12).$$

Dies entspricht einem gewogenen harmonischen Mittel. Die Schicht mit der kleinsten Leitfähigkeit bestimmt die mittlere Leitfähigkeit senkrecht zu den Schichten \bar{K}_p . Die praktische Bedeutung von (3.11) und (3.12) besteht darin, dass die Leitfähigkeit realer Böden immer eine den Schichtungsverhältnissen entsprechende Mittelung darstellt. Analog gilt dies auch für die Simulation des Wasserflusses.¹⁰

Weist die Schichtung sowohl horizontale als auch vertikale Strukturen auf, so entspricht die mittlere Leitfähigkeit einem gewichteten geometrischen Mittel, welches zwischen dem arithmetischen und harmonischen Mittel liegt.

3.2.4. Flussmodell

Allgemeiner Fall

Um den Fluss in einem freien Grundwasserträger zu beschreiben, muss die Kontinuitätsgleichung mit dem Transportgesetz verknüpft werden. Der Druck in einem freien Grundwasserträger ist an seinem oberen Rand gleich dem Atmosphärendruck. U ist der Quellenterm, in welchem die externen Zu- und Wegflüsse aufsummiert sind. Als positive Zuflüsse gelten der Niederschlag und die Quellen im Gebiet, als Wegflüsse Verdunstung und Versickerung aus dem betrachteten Volumen. Die Kontinuitätsgleichung lautet dann

$$\nabla \cdot q = U - S \frac{\partial h}{\partial t} \quad (3.13).$$

Die Divergenz der Flussdichten ∇q ist gleich der Summe des Quellenterms und der Änderung des Wassergehaltes im Volumenelement. Wird (3.10) in (3.13) eingesetzt, erhält man das allgemeine Modell für den Fluss

$$\nabla \cdot (K \nabla h) = U - S \frac{\partial h}{\partial t} \quad (3.14).$$

¹⁰Eine parallele Schichtung entspricht in der Elektronik parallel geschalteten Widerständen, eine senkrechte Schichtung in Serie geschalteten Widerständen.

Dupuit-Forchheimer Approximation

Spielen im Gebiet, in welchem der Fluss modelliert wird, vertikale Strömungen nur einen geringen Einfluss, so lässt sich (3.14) vereinfachen. Dupuit-Forchheimer nehmen an, dass die Potentiellinien nicht gekrümmt, sondern vertikal sind, und der Fluss somit horizontal ist. Die piezometrischen Höhen h werden über die Mächtigkeit des Grundwasserträgers gemittelt und mit \bar{h} bezeichnet. Der Abstand zwischen der Referenzhöhe z_0 und der Sohle des Grundwasserträgers wird mit η bezeichnet. Die Dupuit-Forchheimer Approximation führt zu (3.15), welche auf Boussinesq zurückgeht.

$$\nabla (K(\bar{h} - \eta) \cdot \nabla \bar{h}) = -U + S \frac{\partial \bar{h}}{\partial t} \quad (3.15),$$

wobei der Differentialoperator ∇ nur noch die Ableitung in den horizontalen Koordinaten bezeichnet. Gleichung (3.15) ist für nicht allzu stark geneigte Grundwasserträger eine gute Näherung. Murray and Monkmeyer (1973, p. 1578) zeigen, dass bei einer Genauigkeit der piezometrischen Höhe von 1% die Neigung des Grundwasserspiegels nicht grösser als 10% sein darf.

Einfluss von Kompressibilität und teilgesättigter Zone

Der reale Wasserfluss verhält sich in Wirklichkeit komplexer, als dies aus den Gleichungen (3.14) und (3.15) hervorgeht. Die bedeutendsten Vereinfachungen sind die nicht berücksichtigte Kompressibilität der Matrix sowie der Wasserfluss aus der teilgesättigten in die gesättigte Zone. Sie führen zu einem grösseren Speicherkoeffizienten S bei stark instationären Vorgängen.

Wird der Wasserspiegel abgesenkt, muss der Boden eine Zusatzspannung $\Delta\sigma$ aufnehmen, da der Auftrieb des Wassers wegfällt. Den allgemeinen Fall der dreidimensionalen Konsolidation hat Biot (1955) entwickelt. Die Koeffizienten des Elastizitätstensor sind in Böden schwierig zu messen, Gambolati und Freeze (1973) leiten deshalb ein pseudo-dreidimensionales Modell ab mit der Dichte von Wasser ρ_w , der vertikalen Kompressibilität des Bodens α , der Porosität des Bodens n und der Kompressibilität des Wassers β ,

$$\nabla \cdot (K \nabla \phi) = \rho_w (\alpha + n\beta) \frac{\partial \phi}{\partial t} \quad (3.16).$$

Die Kompressibilität des Torfbodens α ist bedeutend, während die Kompressibilität des Wassers β in freien Grundwasserträgen kaum eine Rolle spielt. Nach Brutsaert und El-Kadi (1984) bleibt die Wirkung der Kompressibilität auf den Ausfluss bei kleiner Kompressibilität α und kleinen hydraulischem Gradienten $\partial\phi$ gering.

Ähnliches gilt für die ungesättigte Zone. Bei grossen Absenkungen und einem grossem Kapillarsaum wird der ungesättigte Fluss bedeutend (Brut-

saert und El-Kadi, 1984). Dies könnte für Moore nur unmittelbar nach einer Entwässerung zutreffen. Ivanov (1981) zeigte, dass der Wasserfluss in Mooren genügend genau durch (3.14) beschrieben wird, sofern die hydraulische Leitfähigkeit K und der Speicherkoeffizient S als Funktion der Tiefe und der Pflanzengesellschaft berücksichtigt wird. Hemond et al. (1984) wiesen für einen organischen Marschboden unter Gezeiteneinwirkung nach, dass die Kompressibilität α einen Einfluss auf die tägliche In- und Exfiltration hat. Hemond und Goldman, (1985) simulierten unter Berücksichtigung der Kompressibilität die scheinbar nicht dem Gesetz von Darcy entsprechenden Leitfähigkeitsmessungen in Hochmoor von Rycroft et al. (1975 a und b) und fanden eine gute Übereinstimmung zwischen Simulation und Messung. Man kann den Einfluss der Kompressibilität auf den Wasserfluss in Mooren also bei der instationären Simulation nicht unbesehen vernachlässigen.

3.2.5. Analytische und numerische Lösungen des Flussmodells

Das Flussmodell (3.15) lässt sich nur in wenigen Fällen analytisch lösen. Ist die Leitfähigkeit K im simulierten Gebiet variabel, findet man keine analytische Lösung mehr. In diesen Fällen ist es möglich, die Lösung durch numerische Methoden zu approximieren. Die Ableitung $\partial h/\partial x$ wird bei der Methode der Finiten Differenzen in einem kleinen Intervall δx durch den Differenzenquotienten $\delta h/\delta x$ ersetzt.

Definition des Gebietes und der Randbedingungen

Die Lösung des Flussmodells (3.15) beschränkt sich auf das Gebiet Ω mit bekannten Rand- und Anfangsbedingungen sowie bekannter Leitfähigkeit K_{Ω} und bekanntem Speicherkoeffizienten S_{Ω} . Das Gebiet Ω ist eindimensional $\Omega(x)$ oder zweidimensional $\Omega(x, y)$. Im stationären Fall, bei der Wassergehaltsänderung $S \frac{\partial h}{\partial t}$ Null, genügen Randbedingungen für eine Lösung. Als Randbedingung gilt entweder ein konstantes Potential (Dirichlet-Randbedingung) oder ein vorgeschriebener Fluss (Neumann-Randbedingung) auf dem Rand von Ω . Ist der vorgeschriebene Fluss Null, so handelt es sich um eine undurchlässige Wand oder eine Wasserscheide.

Die Anfangsbedingungen beschreiben einen physikalisch sinnvollen Zustand der piezometrischen Höhen im Gebiet Ω zum Zeitpunkt $t = 0$. Häufig wird ein stationärer Zustand, zum Beispiel der Wasserspiegel bei der mittleren Nachlieferung, als Anfangsbedingung gewählt.

Analytische Lösungen für den eindimensionalen, stationären Fluss mit Quellenterm

Analytische Lösungen für den stationären eindimensionalen Fall finden sich in Childs (1969) für Grundwasserträger mit parallelen und konzentri-

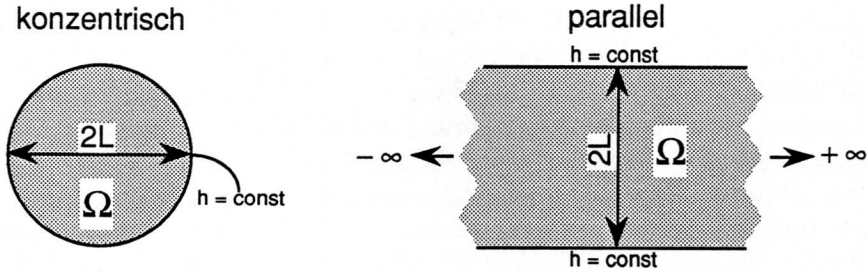


Abbildung 3.7 Situation für den eindimensionalen Fluss mit konzentrischen und parallelen Potentiallinien im Gebiet $\Omega(x)$. In grauer Farbe das Gebiet Ω . Die Richtung der Pfeile zeigt die x -Achse an, der Ursprung des Koordinatensystems befindet sich in der Mitte des Pfeils.

schen Potentiallinien und im Gebiet Ω konstanter hydraulischer Leitfähigkeit K (Abb. 3.7). Diese Lösungen lassen sich durch Symmetrieüberlegungen auf zweidimensionale Räume anwenden. Es sei U die Anreicherungsrate, L der Abstand vom Zentrum zum Rand des Aquifers, \bar{h}_0 das Potential am Rand. Für parallele Potentiallinien lautet die Lösung

$$\frac{U}{K} = \frac{\bar{h}^2 - \bar{h}_0^2}{L^2 - x^2}, \quad \Omega = \{0 < x \leq L, \bar{h}_0 \leq \bar{h} \leq \bar{h}_{\max}\} \quad (3.17)$$

für konzentrische Potentiallinien mit dem Radius $R = L$

$$\frac{U}{K} = \frac{2(\bar{h}^2 - \bar{h}_0^2)}{L^2 - x^2}, \quad \Omega = \{0 < x \leq L, 0 \leq \bar{h} \leq \bar{h}_{\max}\} \quad (3.18)$$

Die Formeln (3.17) und (3.18) beschreiben eine Ellipse (Abb. 3.8). Crank (1984) gibt als Richtlinie an, dass die Halbachsen L und \bar{h}_{\max} das Verhältnis 0.5 nicht übersteigen sollten. Wird das Verhältnis grösser, so werden die Fehler bedeutend, welche durch die Dupuit-Forchheimer-Näherung eingeführt wurden.

Analytische Lösung für zweidimensionalen, stationären Fluss mit Quelle in einem rechteckigen Gebiet

Eine analytische Lösung für den stationären zweidimensionalen Fall findet sich in Carslaw and Jaeger (1959, chap. 5.5 (6)) und in Childs (1969) für einen rechteckigen Grundwasserträger mit im Gebiet $\Omega(x, y)$ konstanter hydraulischer Leitfähigkeit K . Die Randbedingung ist durch das konstante Potential h_0 vorgegeben. Es sei wiederum U die Anreicherungsrate, $2L_1$ eine Seite des Gebietes, $2L_2$ die andere Seite, der Ursprung des Koordinatensystems in der Mitte, so ist die piezometrische Höhe \bar{h} gegeben durch

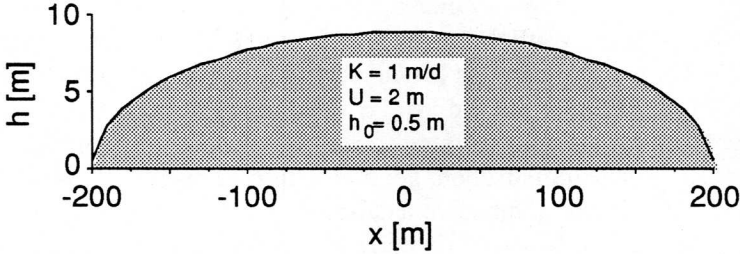


Abbildung 3.8 Form eines Grundwasserkörpers mit von oben gesehen parallelen Potentiallinien. Die Form der Oberfläche wurde mit Gleichung (3.17) berechnet. Die Randbedingung ist durch das konstante Potential $h_0 = 0.5$ m an den Stellen $x = 200$ m und $x = -200$ m gegeben. Der Querschnitt ist zehnmal überhöht.

$$\bar{h}^2 - \bar{h}_0^2 = (U/K)(L_1^2 - x^2) - 32(U/K)(L_1^2/\pi^3) \\ \sum_{n=0}^{\infty} [(-1)^n \cos\{(2n+1)\pi x/2L_1\} \cosh\{(2n+1)\pi y/2L_2\} / \\ [(2n+1)^3 \cosh\{(2n+1)\pi L_2/2L_1\}]] \quad (3.19)$$

Die Reihe konvergiert rasch, und es genügt der erste Summand ($n = 0$) für eine hinreichend genaue Beschreibung, wenn L_1 die kleinere der zwei Längen ist.

Finite-Differenzen Lösung für den eindimensionalen, instationären Fluss in einem heterogenen Gebiet

Für den eindimensionalen instationären Fall lautet Gleichung (3.15)

$$\frac{\partial}{\partial x} (K_x (h - \eta) \frac{\partial h}{\partial x}) = -U + S \frac{\partial h}{\partial t} \quad (3.20),$$

wobei $\bar{h} = h$. Wird (3.18) nach der zeitlichen Ableitung der piezometrischen Höhe aufgelöst, erhält man

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{1}{S} \frac{\partial}{\partial x} (K_x (h - \eta) \frac{\partial h}{\partial x}) - \frac{U}{S} \quad (3.21).$$

Gleichung (3.21) wird mit einem expliziten finiten Differenzenschema (forward time - centered space, FTCS) diskretisiert¹¹ (Press et al., 1986,

¹¹Anstatt direkt zum Differenzenschema überzugehen, liesse sich (3.20) weiter ausmulti-

plizieren und ausdrücken als $K (h - \eta) \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} - K \frac{\partial h}{\partial x} + K \left(\frac{\partial h}{\partial x}\right)^2 = -U + S \frac{\partial h}{\partial t}$.

Gleichung 17.2.19), wobei der untere Index für die räumliche Diskretisierung, der obere für die zeitliche steht. Gleichung (3.21) ist schwach nicht linear, weil die Transmissivität, das Produkt Kh , zeitlich nicht konstant ist. Das explizite Schema erlaubt, die Transmissivität direkt zu berechnen. Der Term $K_{j+1/2}$, welcher die Leitfähigkeit zwischen zwei Punkten interpoliert, wird entweder mit dem arithmetischen, geometrischen oder harmonischen Mittel berechnet. Die Mittelungsfunktion ist abhängig von der Schichtung (Gleichungen 3.11 und 3.12). Das resultierende FTCS-Schema nimmt damit die Form

$$\frac{h_j^{n+1} - h_j^n}{\delta t} = \frac{1}{S_j} \frac{K_{j+1/2}(h_{j+1/2}^n - \eta_{j+1/2}) \frac{h_{j+1}^n - h_j^n}{\delta x} - K_{j-1/2}(h_{j-1/2}^n - \eta_{j-1/2}) \frac{h_j^n - h_{j-1}^n}{\delta x}}{\delta x} - \frac{U_j^n}{S_j} \quad (3.22)$$

an. Der erste Summand der rechten Seite von (3.22) wird im folgenden kurz $1/S_j h_{xx}$ benannt. Für die piezometrische Höhe eines neuen Zeitschrittes $n+1$ erhält man

$$h_j^{n+1} = h_j^n + \frac{\delta t}{S_j} h_{xx} - \frac{\delta t U_j^n}{S_j} \quad (3.23).$$

Bei einem expliziten Schema muss die Stabilität bekannt sein. Wird der Zeitschritt δt grösser gewählt als durch das Stabilitätskriterium gegeben, so beginnt die Lösung zu oszillieren. Setzt man

$$D_j \equiv \frac{(h_j^n - \eta_j) K_j}{S_j}$$

ergibt sich das folgende Stabilitätskriterium

$$\max_{j,n} \frac{2 D_j^n \delta t}{(\delta x)^2} \leq 1$$

und explizit für δt

$$\delta t \leq \min \frac{(\delta x)^2}{2 D_j^n} \quad (3.24)$$

Die Randbedingung für ein konstantes Potential ergeben sich «automatisch» aus (3.22), indem h_{0-1} beziehungsweise h_{l+1} den definierten Wert

annehmen. Dabei ist l die Anzahl der Unbekannten, $n=l+2$ die Anzahl der Knoten im Gebiet $\Omega(x)$. Die spezielle Flussrandbedingung $q = 0$ ergibt sich durch Elimination eines fiktiven Knotenpunktes (Smith, 1985). Für die Herleitung der Randbedingung betrachten wir einen Zeitpunkt n . Der einfacheren Notation wegen wird für h^n h geschrieben. Der Randpunkt sei h_0 , der erste Punkt h_{+1} , der fiktive Punkt h_{-1} . Setzt man nun $h_{+1} = h_{-1}$, $K_{+1/2} = K_{-1/2}$, $\eta_{+1/2} = \eta_{-1/2}$ so lässt sich h_{xx} vereinfachen zu

$$h_{xx}(0) = \frac{K_{+1/2} (h_{+1/2} - \eta_{+1/2}) (2h_1 - 2h_0)}{(\delta x)^2} \quad (3.25).$$

Mit diesen Formeln lässt sich nun das Gleichungssystem aufstellen und lösen.

Finite-Differenzen Lösung für den zweidimensionalen, stationären Fluss in einem heterogenen Gebiet

Ausgehend von Gleichung (3.15) vereinfachen wir diese Gleichung mit den Annahmen, dass die undurchlässige Schicht eben und damit η gleich Null ist, die Ableitung der piezometrischen Höhe nach der Zeit ebenfalls Null sei und vertikale Strömungen vernachlässigt werden können. Wird wiederum der einfachen Notation halber \bar{h} gleich h gesetzt, ergibt sich die Gleichung,

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x h \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y h \frac{\partial h}{\partial y} \right) = -U \quad (3.26).$$

Diese wiederum schwach nicht lineare Gleichung lässt sich durch eine Variablentransformation zu einer linearen Gleichung umformen (Wang and Anderson, 1982, p. 53). Da die Herleitung hier nicht weiter interessiert, wird direkt das Resultat angeschrieben. Gleichung (3.26) wird umgeformt, sodass die Gleichung

$$\frac{K_x}{2} \frac{\partial^2 h^2}{\partial x^2} + \frac{K_y}{2} \frac{\partial^2 h^2}{\partial y^2} = -U \quad (3.27)$$

entsteht. Wird nun $v = h^2$ gesetzt, so entsteht die Poisson-Gleichung

$$\frac{K_x}{2} \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{K_y}{2} \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} = -U \quad (3.28)$$

Diese lineare partielle Differentialgleichung wird nun durch Differenzenquotienten angenähert, wobei nur der erste Term der linken Seite hingeschrieben wird, da beim zweiten einzig x durch y ersetzt wird,

$$\frac{K_x}{2} \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} \Big|_i \lim_{\delta x \rightarrow 0} = \frac{1}{(\delta x)^2} [K_{i+1/2} v_{i+1} - (K_{i+1/2} + K_{i-1/2}) v_i + K_{i-1/2} v_{i-1}] \quad (3.29).$$

Die Werte der Leitfähigkeiten $K_{i\pm h}$ werden je nach Schichtung arithmetisch, geometrisch oder harmonisch gemittelt. Für den Grenzwert $\delta x \rightarrow 0$ ergibt sich für alle Mittlungen dasselbe Result, was auch anschaulich einsehbar ist.

Ist die Differenz δx identisch δy , so wird die räumliche Differenz als δxy bezeichnet, und die Finiten-Differenzen-Gleichung lässt sich folgendermaßen schreiben, wobei i der Index der x -Richtung, j der Index der y -Richtung ist

$$\frac{1}{(\delta x)^2} (Av_{i+1,j} + Bv_{i-1,j} + Cv_{i,j+1} + Dv_{i,j-1} - Ev_{i,j}) = -U \quad (3.30)$$

mit

$$A := K_{i+h,j}$$

$$B := K_{i-h,j}$$

$$C := K_{i,j+h}$$

$$D := K_{i,j-h}$$

$$E := A + B + C + D$$

Die Berücksichtigung der Randbedingung erfolgt analog zur instationären eindimensionalen Finiten-Differenzen-Gleichung (3.25). Definiert man für die Koeffizienten

$$\alpha, \beta, \gamma, \delta = \begin{cases} 0: & \text{fiktiver Punkt} \\ 2: & \text{entgegengesetzt dem fiktiven Punkt} \\ 1: & \text{sonst} \end{cases}$$

und

$$\varepsilon = \begin{cases} \frac{2(\delta x)q}{K_{ij}} : & \text{Flussrandbedingung} \\ 0: & \text{sonst} \end{cases}$$

so werden die Koeffizienten der Lösungsmatrix a_{ij} , b_{ij} , c_{ij} , d_{ij} , e_{ij} , f_{ij} ausgedrückt durch

$$\begin{aligned} a_{ij} &= A\alpha & b_{ij} &= B\beta & c_{ij} &= C\gamma & d_{ij} &= D\delta \\ e_{ij} &= -A - B - C - D & f_{ij} &= -U(\delta x)^2 \end{aligned} \quad (3.31)$$

womit die Diskretisierung definiert ist.

3.3. MOORWACHSTUM

Die Entwicklung eines Moores kann von verschiedenen Gesichtspunkten aus beschrieben werden: (i) vom pollenanalytisch-historischen (Barber, 1981; Henrion, 1982; Middeldorp, 1984; Solem, 1986), (ii) vom vegetationskundlichen-systemanalytischen (Wildi, 1978), (iii) von einem geomorpholo-

gisch-hydrologischen (Granlund, 1932; Wickman, 1951; Ivanov, 1981; Ingram, 1982), (iv) von einem systemanalytisch-geomorphologischen (Friedman et al., 1979; Clymo, 1984; Kratz and de Wit, 1986). Der Grad der Abstraktion der resultierenden Hypothesen ist unterschiedlich: die pollenanalytisch-historischen versuchen, die wesentlichen Faktoren der Moorentwicklung qualitativ zu erfassen. Wildi simuliert in einem sehr komplexen Modell eine Sukzession. Granlund und Wickman versuchen, den Niederschlag in Beziehung zu Durchmesser und Höhe des Moores zu bringen. Ivanov entdeckt die korrekten hydraulischen Beziehungen bei der Moorbildung und entwickelt ein Modell zur Vorhersage der Stabilität torfbildender Systeme. Ingram zeigt, dass die gemessene und die aus der Moorform berechnete hydraulische Leitfähigkeit nahe beieinander liegen. Friedman et al. modellieren die Verlandung eines Sees und oligotropher Toteislöcher (Kratz and de Wit, 1986). Clymo erweitert das Modell von Ingram mit Produktionsgleichungen. Die Modelle vom Typ (i) sind wegen der fehlenden Struktur nicht parametrisierbar. Die anderen Modelltypen weisen grundsätzlich sehr viele, nur aufwendig zu bestimmende Parameter auf. Bei Mooren als dreidimensionale, räumlich strukturierte Objekte sind die Parameter nicht skalare Grössen, sondern Funktionen, die kaum mit der notwendigen zeitlichen und räumlichen Auflösung bestimmt werden können.

Alle diese Modelle vermögen mehr oder weniger genau ein gemessenes Verhalten eines Moores nachzuvollziehen. Es ist aber nicht oder nur sehr beschränkt möglich, mit ihnen das Verhalten eines Moores vorauszusehen.

Wenn sich die Zukunft auch nicht mit Sicherheit bestimmen lässt, simulieren die folgenden Modelle aufgrund weniger Prozesse doch eine wahrscheinliche Entwicklung. Zuerst wird ein Sedimentationsmodell für organische Gesteine vorgestellt, danach ein Modell für die Bildung grundwasserabhängiger organischer Sedimente und schliesslich werden diese gekoppelt.

3.3.1. Sedimentationsmodell

In Gleichung (3.1) wurde ein Modell für die Zersetzung organischer Substanz dargestellt. Die experimentelle Bestimmung des Zersetzungsfaktors ist schwierig. Der Zersetzungsfaktor α ist unter anderem abhängig von der Bodentemperatur, dem Sauerstoffangebot, der Zusammensetzung des organischen Materials und den Mikroorganismen (Clymo, 1983). Trotz der experimentellen Schwierigkeiten ist es das meistgebrauchte Modell um den Abbau organischer Substanz zu beschreiben. Aufgrund der Messungen von Boggie (1977), welcher die zeitliche Veränderung der Sauerstoffkonzentration in einem Moor bestimmte, ist α in der zeitweise belüfteten Zone tiefenabhängig. In der anaeroben Zone nimmt der Zersetzungsfaktor α gleichfalls ab, da die übrigbleibenden organischen Reste schlechter zersetzbar sind und die Anaer-

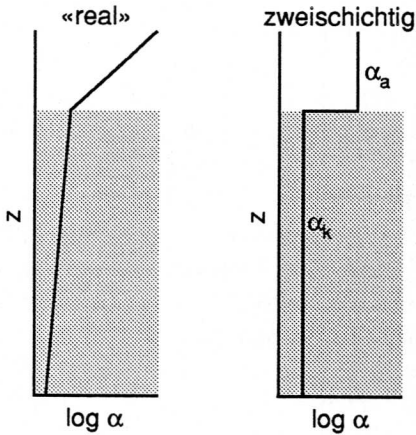


Abbildung 3.9 Zersetzungsfaktor α in einem torfbildenden System. Die gerasterte Fläche ist dauernd wassergesättigt (Katotelm), die darüberliegende weiße Schicht zeitweise ungesättigt (Acrotelm). Das «real» Modell würde das abnehmende Sauerstoffangebot in der Tiefe berücksichtigen. Das zweischichtige Modell nimmt einen konstanten Zersetzungsfaktor für den zeitweise aeroben Acrotelm, α_a , und einen konstanten Zersetzungsfaktor für den dauernd anaeroben Katotelm an, α_k .

robie mit der Tiefe zunimmt. Gleichung (3.1) muss also mit einem tiefenabhängigen Zersetzungsfaktor erweitert werden (Abb. 3.9),

$$p = dm/dt = -\alpha(z) m \quad (3.32),$$

wobei p die Produktionsrate, m die produzierte Masse und $\alpha(z)$ den Zersetzungsfaktor bezeichnen. Da Gleichung (3.32) wegen des nichtlinearen Zersetzungsfaktors numerisch integriert werden muss, wird von hier an auf finite Differenzen übergegangen.

Die Produktion abgestorbener Pflanzenteile¹² eines Jahres sei m_0 . Der Zersetzungsfaktor α bezeichnet den Anteil der Masse m_0 , welcher innerhalb eines Jahres veratmet oder als Kohlenstoffverbindung im Grundwasser¹³ weggeführt wird, die Masse m_0 ist nach einem Jahr noch αm_0 . Der Zersetzungsfaktor α ist damit

$$\alpha = (m_j - m_{j-1})/m_{j-1} \quad (3.33).$$

Da es physikalisch naheliegt, die Variation von α auf die Tiefe z zu beziehen, muss die Tiefe aus der auf eine Einheitsfläche bezogenen Masse m und dem spezifischen Gewicht ρ berechnet werden

$$z_k = \sum_{j=n}^{k(-1)} m_j / \rho_j \quad (3.34).$$

Die Gesamtmasse M ist nach n Jahren

¹²Darunter sind sowohl abgestorbene oberirdische Pflanzenteile als auch Wurzeln zu verstehen.

¹³Entweder als im Wasser gelöstes CO_2 oder als organische Säure.

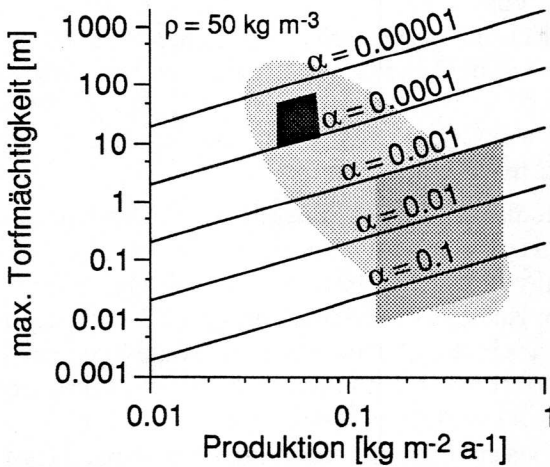


Abbildung 3.10 Zusammenhang zwischen Produktion und maximaler Torfmächtigkeit bei unterschiedlichen Zersetzungs-faktoren. Ganz hell gerastert ist der mögliche Bereich, hellgrau der von Clymo (1984) angegebene Bereich für den Acrotelm, dunkelgrau für den Katotelm. Für die Umrechnung von Gesamt-masse in Tiefe wurde das spezifische Gewicht des Torfes mit 50 kg m^{-3} angenommen.

$$M = \sum_{k=0}^n \alpha(k, z_k) m_k \quad (3.35).$$

Mit diesem Modell lässt sich nun die Sedimentation mit einer zeitlich variablen Produktion m und einem räumlich und zeitlich variablen Zersetzungs-faktor $\alpha(z, t)$ simulieren. Die analytische Lösung für m_0 und α konstant ist Gleichung (3.39).

Clymo (1984) stellte die Produktion verschiedener Moore im Acro- und Katotelm, sowie deren Zersetzungs-faktoren zusammen. Die Produktion im Acrotelm, m_a , beträgt etwa $0.5 \text{ kg m}^{-2} \text{ a}^{-1}$, die Produktion im Katotelm, m_k , etwa $0.05 \text{ kg m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ (im Turbenriet $0.055 \text{ kg m}^{-2} \text{ a}^{-1}$). Der Zersetzungs-faktor im Acrotelm, α_a , liegt zwischen 0.5 und 0.01 a^{-1} , im Katotelm, α_k , zwischen 1×10^{-4} bis $5 \times 10^{-5} \text{ a}^{-1}$ (im Turbenriet kleiner $1 \times 10^{-5} \text{ a}^{-1}$). Der Einfluss der Produktion und des Zersetzungs-faktors auf die stationäre, maximale Torf-mächtigkeit wird in Abbildung 3.10 illustriert. Die Zusammenstellung von Clymo (1984) zeigt zwei klar abgegrenzte Gebiete. Real sind zahlreiche Übergänge vorhanden. Der kleine Bereich für den Katotelm zeigt, dass die Parameter unabhängig vom Standort nur wenig variieren. Die Variabilität nimmt mit zunehmendem Alter des Torfes zu.

Die Halbwertszeit $t_{1/2}$ und der Zersetzungs-faktor α sind direkt miteinander verknüpft. Der Zersetzungs-faktor ist dabei umgekehrt proportional zur Halbwertszeit, das heisst $\alpha = t_{1/2}^{-1}$. Mit der für die Sedimentation in Mooren möglichen Messgenauigkeit verlaufen Exponentialkurven erst nach mehr als einer Halbwertszeit deutlich nichtlinear. Ein Moor mit einem exponentiellen Verlauf der Zersetzung kann bei einem Zersetzungs-faktor von kleiner als 0.0001 a^{-1} nach 10000 Jahren gerade noch von einem System mit linearem Verlauf unterschieden werden. Ist der Zersetzungs-faktor kleiner, kann der

exponentielle Verlauf nicht mehr vom linearen unterschieden werden. In diesem Fall ist das Rauschen der Daten, der Beziehung zwischen Alter t und Torfmasse M , grösser als die Unterschiede zwischen linearem und exponentiellem Modell ist.

Das lineare zweidimensionale Einschichtmodell

Gleichung (3.35) versucht, den realen Prozess zu beschreiben. Das Konzept der Tiefenabhängigkeit leuchtet zwar ein, konnte aber noch nie bestimmt werden. Wird das Modell radikal vereinfacht, lässt sich eine Lösung finden, indem man die Sedimentation im Katotelm sowohl in der Vertikalen als auch in der Horizontalen als konstant annimmt. Dazu wird die vertikale Sedimentationsrate $p_v = M/\rho t$ und die horizontale Ausbreitungsrate p_h eingeführt. Der Zersetzungsfaktor α ist im Katotelm Null. Dies bedeutet, dass die Torfschicht immer mit der gleichen Geschwindigkeit zunimmt. Geometrisch lässt sich dieses Modell als aus Klötzchen aufgebaute Pyramide mit der Seitenlänge p_h und der Höhe p_v interpretieren, die von einem Zentrum aus wächst (Abb. 3.11). Die Fläche A zu einem Zeitpunkt t des Modells ist, wobei $t = 0$ den Beginn des Wachstums bezeichnet,

$$A_t = p_h^2 + \sum_{i=1}^t 4ip_h^2 \quad (3.36),$$

das Volumen Φ einer Schicht zum Zeitpunkt t

$$\Phi_t = p_v \sum_{i=1}^t A_i \quad (3.37),$$

das Gesamtvolumen des Körpers V zum Zeitpunkt t

$$V_t = \sum_{i=1}^t \Phi_i \quad (3.38).$$

Die Parameter dieses Modells, p_v und p_h , lassen sich bestimmen, wenn zu zwei Zeitpunkten die Mächtigkeit des Moores und dessen Ausdehnung bekannt ist.

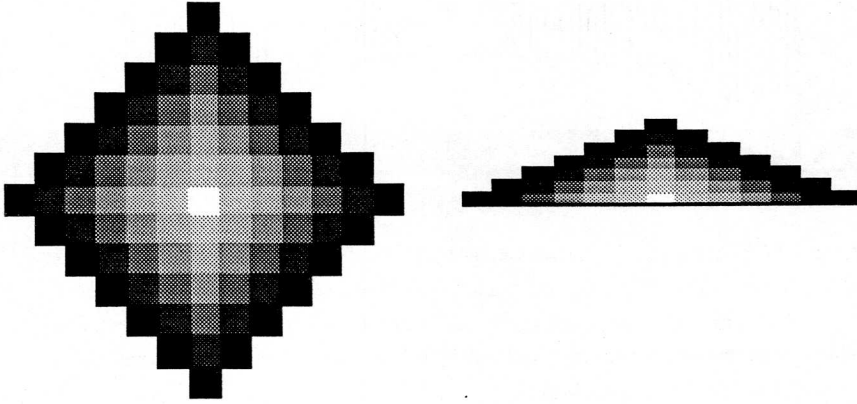


Abbildung 3.11 Geometrische Interpretation des linearen Einschichtmodells. Links der Grundriss, rechts der Querschnitt durch das Zentrum. Jede Graustufung stellt einen Zeitschritt dar.

Das exponentielle eindimensionale Zweischichtmodell

Clymo (1984) simulierte die Sedimentation von Torf mit einem zweischichtigen exponentiellen Modell (Abb. 3.9). Da der Zersetzungsfaktor α für die obere, aerobe Schicht (Acrotelm) bis zu einem Faktor 10^4 grösser ist als für die anaerobe Schicht (Katotelm), erreicht der Acrotelm «schnell» den stationären Zustand. Die «Produktion» oder besser Sedimentationsrate kann deshalb für den Katotelm als konstant betrachtet werden. Das Modell entspricht damit Gleichung (3.1). Die Grössenordnung des Zersetzungsfaktors α_k ist in Abb. 3.10 dargestellt. Clymo (1984) zeigte mit diesem Modell für einige Moore, dass auch im Katotelm eine Zersetzung stattfindet. Die berechneten Vertrauensintervalle machen andere Hypothesen unwahrscheinlich. Ist der Zersetzungsfaktor α_k im Katotelm kleiner als $5 \times 10^{-5} \text{ a}^{-1}$, so wird Gleichung (3.1) über den Zeitraum von 10000 Jahren «praktisch linear», und der Faktor α_k ist nicht mehr bestimmbar. Die Entwicklung der Masse M , beziehungsweise der Moormächtigkeit Z , ist in diesem Fall fern dem Gleichgewichtszustand und scheint linear zu verlaufen.

Die Ursache für die von Moor zu Moor verschiedenen Zersetzungsfaktoren α_k ist unbekannt. Die Unterschiede verursachen vermutlich die Temperatur des Torfkörpers und die Art der Torfsubstanz.

Die maximale Torfmächtigkeit kann je nach Situation entweder durch den «genügend grossen» Zersetzungsfaktor α_k bestimmt sein, oder aber durch die minimal mögliche hydraulische Leitfähigkeit K . Bei kleinen Mooren scheint eher die minimal mögliche Leitfähigkeit, bei grossen Mooren (mehrere Quadratkilometer) eher der Zersetzungsfaktor begrenzend zu wirken.

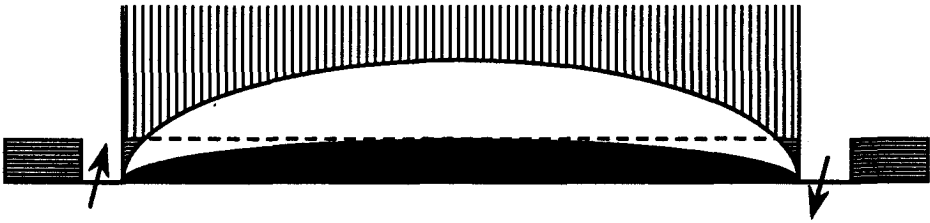


Abbildung 3.12 Schema des Grundwasserspiegels bei verschiedenen Entwicklungszuständen des Moores. Das mineralische poröse Medium ist horizontal, das virtuelle Medium, welches im Laufe der Zeit durch Torf ersetzt wird, vertikal schraffiert. Der Grundwasserkörper ohne virtuelles Medium ist schwarz, weiss mit dem virtuellen Medium. Die Pfeile symbolisieren die Bäche am Rand des Moores.

3.3.2. Das Moor als Grundwasserkörper

Granlund (1932) vermutete als erster, dass die Oberfläche des Moores einem Grundwasserkörper entspricht. Wickman (1951) versuchte die Beobachtungen von Granlund zu quantifizieren. Der Zusammenhang zwischen Grundwasser und Torfoberfläche wurde etwa zu derselben Zeit unabhängig von russischen Forschern beobachtet und quantifiziert (Ivanov, 1953). Während diese Beobachtungen in Westeuropa bis zur Publikation von Ingram (1982) kaum beachtet wurden, entwickelte sich in der Sowjetunion eine hydrologisch fundierte Moorwissenschaft.

Aufgrund der Bodenentwicklung eines Moores muss dessen Oberfläche dem Wasserspiegel entsprechen. Die Form des Moores ist identisch mit einer Lösung der Gleichung (3.15). Nach Ingram (1982) und Schneebeili (1989) kann Gleichung (3.17) mit guter Genauigkeit in ebenen Mooren benutzt werden. Aus diesen Beobachtungen lässt sich schliessen, dass sich die Oberfläche des Moores einem Grundwasserspiegel annähert, welcher durch ein virtuelles Medium gebildet würde. Ein solches virtuelles Medium ersetzt den Luftraum (mit praktisch unendlicher hydraulischer Durchlässigkeit und keiner Speicherkapazität) durch ein poröses Medium. Wird die Luft über dem Mineralboden zunehmend durch ein poröses Medium, zum Beispiel Torf, ersetzt, erhöht sich der reale Grundwasserspiegel und nähert sich dem virtuellen Grundwasserspiegel an. Die hydraulische Leitfähigkeit von Mineralboden und Torf kann verschieden sein (Abb. 3.12).

Die Beobachtung, dass das Moor von der Mitte zwischen zwei Bächen, und nicht am Rand der Bäche zu wachsen beginnt, lässt sich hydraulisch begründen. Bevor sich Torf gebildet hat, ist der Mineralboden nur im zentralen Teil gesättigt. Nur an dieser Stelle ist die Anaerobie so ausgeprägt, dass sich Torf bilden kann. Das Wasser, welches nach einem Niederschlag nicht in den Mineralboden versickert, fliesst in der sehr durchlässigen Schicht zwischen Bo-

den und Luft ab. Der neu gebildete Torf in der Mitte hat eine grössere Speicherkapazität S und eine geringere Leitfähigkeit K als die zuvor dort vorhandene Luft. Dies führt dazu, dass das Wasser langsamer abfliessen muss als zuvor, und die gespeicherte Wassermenge zunimmt. Die gesättigte Zone, und damit die anaeroben Böden, in der Umgebung der ersten Torfbildung vergrössern sich deshalb. Der langsam ansteigende Grundwasserspiegel nähert sich deshalb dem Wasserspiegel an, welcher durch ein virtuelles Medium von gleicher hydraulischer Leitfähigkeit gebildet würde.

An einem Hang ist die Moorentwicklung ähnlich. Der Ursprung des Moores ist jedoch bei konkaven und ebenen Hängen näher, bei konvexen Hängen weiter vom Vorfluter entfernt als in der Ebene, da sich der Austrittspunkt des Grundwasserspiegels an die Oberfläche verschiebt.

3.3.3. Koppelung des Sedimentationsmodells mit dem Grundwassermodell

Das zweidimensionale lineare Einschichtmodell und das eindimensionale exponentielle Modell haben keinen direkten Zusammenhang mit dem Grundwassermodell.

Aus Abbildung 3.12 ist erkennbar, dass die Oberfläche für kleine Klötzchen, das heisst nach vielen Zeitschritten n , sich einer schiefen Ebene nähert und nicht wie der Grundwasserspiegel elliptisch gekrümmt ist. Die elliptische Grundwasserform kann mit dem Sedimentationsmodell nur erreicht werden, wenn die vertikale Sedimentationsrate vom Zentrum ausgehend zunimmt oder der Zersetzungsfaktor α_k kleiner wird. Die Vorstellung eines kleineren Zersetzungsfaktors stimmt qualitativ mit dem in Abbildung 3.9 gezeigten realen Modell überein, welches auch im Katotelm einen abnehmenden Zersetzungsfaktor aufweist.

Für das eindimensionale exponentielle Modell wurde diese Variation der Sedimentationsrate von Clymo (1984) berechnet. Dazu koppelte er die Modelle (3.1) und (3.18).

Das Wachstum der Torfmasse m_k im Zentrum in vertikaler Richtung z im Katotelm k wird durch die Sedimentationsrate (von Clymo «Produktion des Katotelms» genannt) m_0^k und den Zersetzungsfaktor α_k bestimmt.

$$\frac{dm_k(t)}{dt} = m_0^k - \alpha_k m_k(t) \quad (3.39).$$

Gleichung (3.39) integriert ergibt, wobei der Index k im folgenden weglassen wird,

$$m(t) = \frac{m_0}{\alpha} (1 - e^{-\alpha t}) = m_{max} \quad (3.40).$$

Die Torfmächtigkeit Z ergibt sich aus $Z = m/\rho$, wobei ρ Dichte des Torfs. Die Nachlieferung U , die mittlere Leitfähigkeit K , die Sedimentationsrate m_0 und der Zersetzungsfaktor α ist bekannt. Gesucht wird die Ausdehnung L und der Wasserspiegel $h(x)$, welcher identisch mit Oberfläche des Moores $Z(x)$ ist. Aus (3.17) lässt sich L mit h_{max} ausdrücken, $L^2 = h_{max}^2 K/U$. Der Wasserspiegel $h(x)$ ist damit bei bekannter maximaler Höhe

$$h^2(x) = h_{max}^2 - \frac{U}{K} x^2 \quad (3.41).$$

Wird nun für h_{max} die aus (3.40) gegebene Torfmächtigkeit $Z_{max} = m_{max}/\rho$ eingesetzt, erhält man mit (3.41)

$$Z(x) = \left(\left(\frac{m_0}{\alpha \rho} (1 - e^{-\alpha t}) \right)^2 - \frac{U}{K} x^2 \right)^{1/2} \quad (3.42).$$

Für das einfachere lineare Modell, wo $\alpha = 0$, ergibt sich mit $m = m_0 t$

$$Z(x) = \left(\left(\frac{m_0 t}{\rho} \right)^2 - \frac{U}{K} x^2 \right)^{1/2} \quad (3.43).$$

Mit diesen Modellen kann somit die zeitliche Entwicklung der Oberfläche berechnet werden, sofern die Nachlieferung U , die Durchlässigkeit K , die Dichte ρ und die Sedimentationsrate m_0 bekannt sind.

Der Abstand vom Zentrum des Moores zu seinem Rand bei gegebener Höhe im Zentrum Z ist dann (3.18)

$$x_{max} = Z_{max} \sqrt{\frac{2K}{U}} \quad (3.44).$$

Die Fläche A , welche von Moor bedeckt ist, wird

$$A = 2\pi x^2 \quad (3.45),$$

und das Volumen des Torfkörpers V ist

$$V = \frac{2\pi}{3} Z x^2 \quad (3.46).$$

Das Wachstum eines Moores spielt sich in vom Menschen nicht nachvollziehbar langen Zeiträumen ab. Wohl die einzige Möglichkeit, über das langfristige Verhalten des Ökosystems genaueres zu erfahren, ist seine Geschichte möglichst genau zu rekonstruieren.

Aus der rekonstruierten Dynamik des Wachstums lassen sich die wesentlichen Prozesse bei der Torfbildung herauschälen. Die Kenntnis der Prozesse ermöglicht das zukünftige Wachstum präziser vorauszusagen.

In diesem Kapitel werden zuerst die theoretischen Grundlagen dargestellt, um die Geschichte von Mooren zu rekonstruieren (Kap. 4.1 und 4.3), und anschliessend werden diese Methoden auf das Turbenriet angewandt (Kap. 4.2, 4.4–4.5).

4.1. METHODEN ZUR DATIERUNG DER TORFSTRATIGRAPHIE

Die Geschichte eines Moores erklärt sich zum Teil anhand der Stratigraphie. Ereignisse, welche jedoch kaum Spuren hinterlassen, wie eine Erosionsphase, lassen sich nur indirekt über eine Abnahme des Wachstums belegen. Es ist deshalb entscheidend, das Alter einer Schicht zu kennen. In Mooren kommen vor allem zwei Methoden in Frage: einerseits die ^{14}C -Datierung, basierend auf organischem Material und andererseits die Pollenanalyse, basierend auf dem während Jahrtausenden unterschiedlichen Pollenanflug und der Konservierung des Pollens im Torf.

4.1.1. Absolute Datierung: ^{14}C -Messung

Das im Vergleich zum normalen Kohlenstoffisotop ^{12}C mit einer relativen Konzentration von 10^{-12} vorhandene radioaktive Isotop ^{14}C wird von Pflanzen aus der Luft aufgenommen. Die Datierung organischer Substanzen mit Hilfe des Isotops ^{14}C beruht entweder auf der Messung der Betastrahlung oder auf dem Isotopenverhältnis $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ bei der Messung mit einem Linearbeschleuniger (Olsson, 1986; Bonani et al., 1986)¹.

¹Die Halbwertszeit des Kohlenstoffisotops ^{14}C beträgt 5730 a (CRC Handbook of Chemistry and Physics, 64th ed., 1984, CRC Press).

Die organischen Substanzen werden nicht direkt gemessen, sondern müssen gereinigt und zu Benzol oder zu Graphit aufbereitet werden. Für die Messung der Betastrahlung werden einige Gramm, für die Bestimmung des Isotopenverhältnisses einige Milligramm Kohlenstoff benötigt.

Da sich die Produktion von ^{14}C im Laufe der Jahrtausende infolge Variation der kosmischen Strahlung veränderte, ist das aus der Halbwertszeit erhaltene Datum mit systematischen Abweichungen behaftet. Das absolute Alter lässt sich nur dort feststellen, wo es sich zählen lässt, wie zum Beispiel bei Jahrringen. Die Kalibrierung des ^{14}C -Alters erfolgt deshalb über eine aufgrund dendrochronologisch datierter Hölzer erstellten Korrekturkurve (für die folgenden Messungen nach Stuiver und Reimer, 1986).

4.1.2. Relative Datierung: Pollenfrequenzen

Die Art der jährlich ausgestreuten Pollen ist abhängig von der Vegetation. Da sich die Vegetation im Laufe der Jahrhunderte bis Jahrtausende ändert, ändern auch die Verhältnisse der Pollen im Sediment². Ist die mechanische oder biogene Mischung des Sedimentes gering, stellen die Abfolgen der Pollenzusammensetzung den veränderten Pollenflug in der Zeit dar. Ein Standardprofil aus möglichst kleinen Intervallen dokumentiert den im Laufe der Zeit veränderten Pollenflug. Die relative Datierung einer Probe erfolgt über ihre Zuordnung zur ähnlichsten Probe des Standardprofils (Kap. 4.3). Dabei ist bis anhin meist ein Vergleich der Probe mit charakteristischen Zeitabschnitten üblich. Genauer ist die Bestimmung, wenn direkt die maximalen Ähnlichkeiten (Korrelationen) zwischen den Proben berechnet werden (Birks, 1986 b). Erste Ergebnisse sind in Schneebeli et al. (1989) dokumentiert. Die dort angewandte Methode wurde in dieser Arbeit weiterentwickelt. Sie ist nun robuster und ermöglicht die Berechnung von Vertrauensintervallen.

4.2. DIE ABSOLUTEN ^{14}C -DATIERUNGEN

4.2.1. Messungen im Standardprofil

Entnahme und Aufbereitung

Für die im Standardprofil (Messpunkt 25) vorgenommenen ^{14}C -Messungen wurde eine Scheibe von 1 cm Dicke aus dem Bohrkern gewonnen und

²Die Häute der Pollen, die Exinen, sind ausserordentlich widerstandsfähig gegen Säuren. Sie weisen art-, gattungs- oder familienspezifische Merkmale auf, was ihre Zuordnung zu bestimmten Pflanzenarten erlaubt.

die *Eriophorum vaginatum*-Blattscheiden mit der Pinzette entnommen. Das Trockengewicht der Proben betrug etwa 1 g. Sie wurden im Geographischen Institut der Universität Zürich aufbereitet und am Institut für Mittelenergiephysik der ETH Zürich auf dem Linearbeschleuniger mit Massenspektrometer gemessen.

Die Transformation der ^{14}C -Alter in kalibrierte Alter erfolgte nach Stuiver und Reimer (1986). Die Standardabweichung σ der kalibrierten Daten beruhen nicht auf einer normal verteilten Zufallsvariablen, da die Transformation ^{14}C -Alter zu kalibriertem Alter nicht linear ist (Stuiver und Pearson, 1986).

Resultate und Diskussion

Die Resultate der Datierungen der Proben des Standardprofils sind in Tab. 4.1 enthalten. Der Torfzuwachs ist in Abb. 4.1 abgebildet. Auffällig ist die geringe Zuwachsrate im Boreal von 8000 BC bis 6000 BC. Die Niederschläge waren damals eher geringer als heute und die Temperatur etwas höher (Taylor, 1983, p. 9). Die Bedingungen für das Moorwachstum waren deshalb ungünstiger. Der Zeitraum von 6000 bis 4000 BC wird dem Atlantikum zugeordnet und ist durch bis zu 10% höhere Niederschläge und bis zu 2° C höhere Temperaturen als heute gekennzeichnet. Dies zeigt sich auch in den hohen Zuwachsraten. Im Subboreal von 2000 BC bis 0 AD nehmen die Niederschläge sowie die Temperatur unregelmässig ab. Während des nachfolgenden Subatlantikums wechseln wärmere und kältere Phasen unregelmässig ab. Mit den zehn ^{14}C -Datierungen und der rezenten Oberfläche als jüngsten Punkt wurden nur die grössten Oszillationen erfasst.

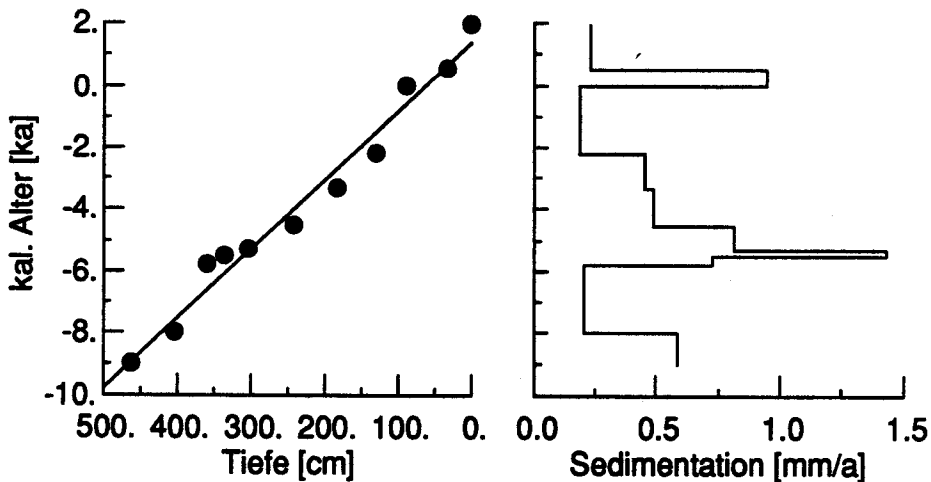


Abbildung 4.1 Zuwachs und Sedimentation im Standardprofil 25. Im Alter-Tiefe Diagramm ist die Linie minimaler quadratischer Abweichung eingezeichnet.

Der Zuwachs lässt sich dennoch als lineare Funktion beschreiben, da die Schwankungen keinen erkennbar systematischen Trend zeigen. Eine lineare Regression der Tiefe des Standardprofil z [cm] gegen das kalibrierte ^{14}C -Alter t [ka] ergibt:

$$t = 1.39 - 0.022 z, \quad r = 0.99 \quad (4.1).$$

Probe Nr.	Tiefe [cm]	^{14}C -Alter [ka BP]	$\delta^{13}\text{C}$ [‰]	korr. Alter [ka BP]	kal. Alter [ka]	Dichte [Mg/m ³]
ETH-0518	33	1.57±0.09	-29.9	1.49±0.10	AD 0.54±0.21	0.119
ETH-0519	89	1.98±0.08	-22.2	2.02±0.09	BC 0.05±0.22	0.110
ETH-0520	130	3.81±0.09	-28.1	3.76±0.10	BC 2.19±0.25	0.106
ETH-0521	182	4.59±0.09	-25.7	4.57±0.10	BC 3.33±0.14	0.108
ETH-0522	242	5.71±0.09	-25.6	5.70±0.10	BC 4.55±0.24	0.119
ETH-0523	303	6.37±0.10	-24.8	6.37±0.11	BC 5.30±0.26	0.138
ETH-0524	335	6.64±0.10	-27.4	6.60±0.11	BC 5.52±0.23	0.167
ETH-0525	358	7.02±0.10	-24.4	7.03±0.11	BC 5.84±0.25	0.175
ETH-0526	403	8.94±0.12	-24.5	8.95±0.13	BC 8.00±0.33	0.157
ETH-0527	462	9.81±0.12	-25.6	9.80±0.13	BC 9.00±0.33	

Tabelle 4.1 ^{14}C -Datierungen im Standardprofil 25. Die scheinbare Dichte wurde an Proben bestimmt, welche zwischen den Tiefen der datierten Proben lagen. Die Abweichung für das konventionelle ^{14}C -Alter und das korrigierte Alter sind $\pm 1 \sigma$, beim kalibrierten Alter $\pm 0.5 \sigma$.

4.2.2. Messungen der Basisproben

Entnahme und Aufbereitung

Ein zweiter Bohrkern diente zur Datierung der Basisproben. Gebohrt wurde 10 bis 20 cm neben der Bohrstelle für die pollenanalytischen Untersuchungen. Aus dem torfig-lehmigen Material des Übergangs zwischen mineralischem und organischem Sediment wurden aus 5–7 cm langen Bohrkernabschnitten einzelne Holzstückchen und gröbere Fasern nach Nasssiebung mit destilliertem Wasser ausgelesen. Die weitere Aufbereitung, Datierung und Kalibrierung erfolgte am Institut für Mittelenergiephysik der ETH Zürich.

Resultate und Diskussion

Die ^{14}C -datierten Proben zeigen etwa dasselbe Alter wie die pollenanalytisch datierten (Tab. 4.2, Abb. 4.2). Eine genauere Aussage ist schwierig, da folgende Faktoren bei der Probenahme nicht berücksichtigt werden konnten:

(i) Fehler bei der Probenentnahme: Die Sedimentation weist an der Basis einen starken Sedimentationsgradienten auf. Dort befindet sich der Übergang zu einem torfbildenden System. Eine geringe Abweichung der Probentiefe führt daher zu einer bedeutenden Altersabweichung. (ii) Ablagerungsbedingte Fehler: Die Zersetzung organischen Materials ist von seiner chemischen Zusammensetzung abhängig. So erwähnt Olson (1986), S. 287, dass Holzreste bedeutend älter sein können als der Rest des Materials. Die Verlagerung des Pollens und der größeren organischen Bestandteile im Boden dürfte nicht dieselbe sein. So wachsen Wurzeln desselben Alters wie die Pollen in tiefere Schichten, während die Pollen in der Matrix kaum verlagert werden. Eine Auswirkung dieses Mischungsprozesses dürfte die häufige Umkehr von Alter und Tiefe sein (Bohrkerne 4, 11, 23, 41, 67).

Lab. Nr.	Kern	Tiefe [cm]	^{14}C -Alter [ka BP]	$\delta^{13}\text{C}$ [‰]	kal. Alter [ka]	Nr. _B	t_B [cm]
ETH-3836	4	104–110	6.70±0.11	-19.3	BC 5.57±0.19	506	107
ETH-3837	4	110–115	6.64±0.12	-23.6	BC 5.56±0.19	507	112
ETH-3838	11	107–112	3.87±0.11	-22.2	BC 2.35±0.31	524	107
ETH-3839	11	112–117	3.79±0.11	-21.8	BC 2.25±0.32	525	112
ETH-3840	23	35–40	0.20±0.09	-25.3	AD 1.80±0.23	550	35
<i>ETH-3841</i>	<i>23</i>	<i>40–45</i>	<i>0.17±0.09</i>	<i>-34.8</i>	<i>AD 1.83±0.22</i>	<i>551</i>	<i>40</i>
ETH-3842	24	138–143	4.36±0.12	-24.6	BC 3.09±0.32	557	123
<i>ETH-3843</i>	<i>26</i>	<i>294–299</i>	<i>5.06±0.10</i>	<i>-23.8</i>	<i>BC 3.85±0.19</i>	<i>563</i>	<i>294</i>
ETH-3844	27	139–144	5.80±0.11	-23.3	BC 4.66±0.37	569	139
ETH-3845	41	405–410	6.74±0.14	-23.3	BC 5.62±0.26	619	407
ETH-3846	41	410–415	6.49±0.14	-24.9	BC 5.39±0.28	620	412
ETH-3847	54	335–340	6.07±0.10	-24.7	BC 5.03±0.28	650	324
ETH-3848	67	272–277	5.83±0.10	-27.3	BC 4.71±0.22	671	276
ETH-3849	67	277–282	5.80±0.12	-24.0	BC 4.67±0.27	672	279

Tabelle 4.2 ^{14}C -Datierungen der Basisproben. Wegen der spärlich vorhandenen organischen Reste wurde das Probenmaterial für die Datierung über eine Tiefe von 5 cm entnommen. Die Probennummer Nr._B und Bohrungstiefe t_B entspricht der pollenanalytisch datierten Basisprobe. Die kleineren, kursiven Zahlen beziehen sich auf vermutliche Ausreisser.

Für die statistische Analyse der pollenanalytisch datierten Basisproben y und der ^{14}C -datierten Basisproben x werden die Differenzen $(y_i - x_i)$ betrachtet. Der Mittelwert der Differenzen $(y_i - x_i)$ aller Proben beträgt -0.26 ka, die Standardabweichung ± 0.89 ka. Werden die Probenpaare ETH-3841/551 und ETH-3843/563 als Ausreisser betrachtet, ist der Mittelwert der Differenzen 0.015 ka, die Standardabweichung ± 0.50 ka. Der deutlich erwartungstreuer

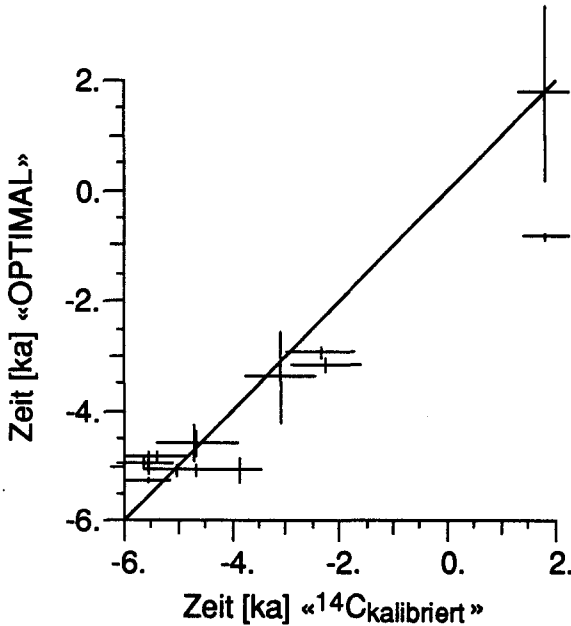


Abbildung 4.2 Abweichung zwischen den ^{14}C -datierten und den pollenanalytisch nach der Methode «OPTIMAL» (Kap. 4.3.5) datierten Basisproben. Die Fehlerbalken entsprechen bei den ^{14}C -Altern 2σ (etwa 95% Konfidenzintervall), bei den pollenanalytischen Altern den 90% Konfidenzintervallen Ψ .

Mittelwert deutet darauf hin, dass es sich bei den erwähnten Proben um Ausreisser handelt. Dies ist umso wahrscheinlicher, als die Proben nicht dem gleichen Bohrkern entnommen wurden und über 5 cm der Probentiefe gemischt werden mussten.

Da die Proben nicht identisch waren, handelt es sich bei den Abweichungen um obere Grenzwerte. Wie in Kapitel 4.4.2. gezeigt wird, weichen die pollenanalytisch datierten Proben weniger vom wahren Alter ab, als mit dem Vergleich $(y_i - x_i)$ vermutet wird.

4.3. STRATIGRAPHISCHE KORRELATION VON POLLENSEQUENZEN: METHODE

Mit der im folgenden beschriebenen Methode wird eine pollenanalytisch untersuchte Basis- oder Transsektprobe mit einer altersmässig entsprechenden Probe des Standardprofils korreliert (Abb. 2.1 und 4.3).

Zur Darstellung der Daten wird folgende Notation benutzt: Das Standardprofil, welches aus n nach der Tiefe geordneten Proben und r' Arten besteht, wird als Matrix $X_{(n \times r')}$, kurz $X_n r'$ bezeichnet. Die Kolonnenvektoren $x_1, \dots, x_{r'}$ stehen für die Pollenarten, die Zeilenvektoren x_1^T, \dots, x_n^T stehen für die Reihen der Proben. Die je o Basis- und Transsektproben der s Bohrungen werden als Matrizen Y_{or}^s bezeichnet. Die Abstände zwischen den Proben im

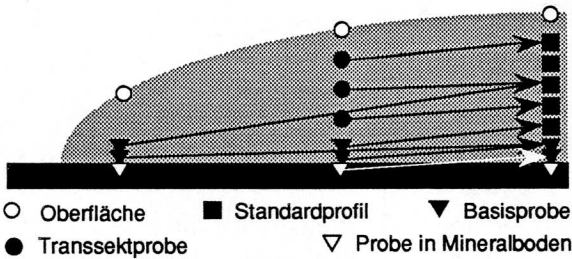


Abbildung 4.3 Prinzip der Beprobung und Zuordnung für die relative Datierung. Die Oberfläche bezeichnet die Jetztzeit. Die Pfeile symbolisieren die Zuordnung zu den Proben des Standardprofils.

Standardprofil sind nicht immer gleich, es wird deshalb ein zusätzlicher Vektor δ_n eingeführt, welcher die Probentiefe enthält.

4.3.1. Statistische Eigenschaften einer Pollenprobe

Eine ausführliche Darstellung der statistischen Eigenschaften von Pollenproben findet sich in Mosimann (1965). Die statistischen Eigenschaften einer Pollenart in einer einzelnen Probe x_i^T lassen sich wie folgt herleiten. Die gesamte Anzahl gezählter Pollen betrage m (Pollensumme). Bei der Zählung der Pollen bestehe immer die gleiche Wahrscheinlichkeit p , ein Pollenkorn einer bestimmten Pollenart j anzutreffen. Die Wahrscheinlichkeit $p_k^{(m)}$ in der Serie von m Beobachtungen k mal die Pollenart j anzutreffen, ist dann

$$p_k^{(m)} = \binom{m}{k} p^k q^{m-k}, \quad q = 1 - p, \quad (k=0, 1, \dots, m) \quad (4.2).$$

Der Erwartungswert \hat{p} ist definiert als

$$\hat{p} = \sum_{k=0}^m k \binom{m}{k} p^k q^{m-k} = mp \quad (4.3).$$

Die Varianz σ^2 ist definiert als

$$\sigma^2 = \sum_{k=0}^m (k-mp)^2 \binom{m}{k} p^k q^{m-k} = mpq \quad (4.4).$$

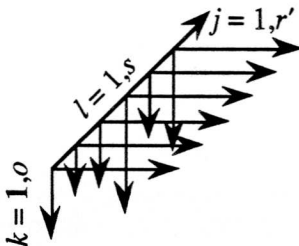


Abbildung 4.4 Notation für die Basis- und Transsektproben. Die unterschiedliche Länge der vertikalen Pfeile symbolisiert die unterschiedliche Anzahl Proben o in einer Bohrung. Der Index j läuft über die Anzahl der Pollenarten, k über die Anzahl Proben pro Bohrung und l über die Bohrungen.

Mosimann (1965) gibt für die 95% Konfidenzintervalle p_L für den Erwartungswert \hat{p} die Formel

$$p_L = \frac{\hat{p} + [3.84/(2m)] \pm 1.96 \sqrt{\hat{p}(1-\hat{p})/m + 3.84/4m^2}}{1 + 3.84/m}, \quad (4.5)$$

an, wobei der grössere Wert für die obere, der kleinere für die untere Grenze steht. (4.5) basiert darauf, dass p asymptotisch normalverteilt ist.

Eine Schwierigkeit bei der Anwendung der obigen Formeln ist die Wahl der Anzahl Beobachtungen m . Es kann notwendig sein, dass nicht alle Teilchen, welche morphologisch Pollen sind, als solche berücksichtigt werden. Bei der Zählung oder der Auswertung betrachten wir somit eine bestimmte Anzahl von Beobachtungen als ungültig, m wird kleiner. Für die Auswertung werden also nur jene Beobachtungen berücksichtigt, welche die im folgenden Kapitel definierten Kriterien erfüllen.

4.3.2. Optimale Konfiguration des Standardprofils

Das Standardprofil X besteht aus einer Abfolge pollenanalytisch untersuchter Proben. Der Abstand zwischen den Proben ist meistens sowohl geometrisch als auch zeitlich verschieden. Die Entscheidung, welche Arten für die Pollensumme und für die artabhängigen Transformationen zur Berechnung der Pollenprozentage benutzt werden sollen, ist weitgehend abhängig vom Ziel der Auswertung. Wird das Standardprofil für die Einordnung unbekannter Pollenproben benutzt, müssen die Pollenkurven des Standardprofils möglichst gut differenziert sein und möglichst nur Arten aufweisen, deren Pollen gleichmässig im Untersuchungsgebiet abgelagert wurden. Alle Pollen direkt im Gebiet gewachsenener Arten (lokale Arten) sollten ausgeschlossen werden und damit die räumliche Variabilität minimiert werden. Probleme bei der Auswertung der Proben des Standardprofils treten auf, wenn eine Probe sehr viele lokale Pollen enthält und diese bei der Auszählung nicht aus der Zählsumme ausgeschlossen wurden, und wenn eine nicht-lokale Pollenart in einer einzelnen Probe stark gehäuft auftritt. Um diese Probleme zu vermindern, werden im folgenden Abschnitt Auswerteregeln aufgestellt.

Wahl der Pollensumme und der Transformationen der Arten: Auswerteregeln

- (i) Nur Arten werden berücksichtigt, welche sowohl im Standardprofil als auch in den zu datierenden Proben vorkommen. Diese Arten enthalten Information für die Zuordnung zwischen Standardprofil und zu datierender Probe.
- (ii) Um lokale Einflüsse möglichst zu vermeiden, müssen alle in der näheren Umgebung der Probe gewachsenen Arten ausgeschlossen werden. Schwierig

wird dieser Ausschluss, wenn Pflanzen zu gewissen Zeiten Bestandteil der regionalen Vegetation sind, zu ändern jedoch nur im Moor vorkommen. In solchen Fällen können nach einer nichtlinearen Transformation der Zählraten die betreffenden Arten gleichwohl verwendet werden. (iii) Probleme bereiten auch die Pollen von Sporenpflanzen, da sie viel mehr Pollen freisetzen als Blütenpflanzen. Auch hier kann durch eine nichtlineare Transformation ihr Einfluss auf ein tolerierbares Mass reduziert werden. Dabei wird der Artvektor x_j zum Beispiel durch die Transformation $x_j' = \log x_j$ in seinem gesamten Einfluss vermindert und besonders hohe Werte reduziert. (iv) Pollenarten, die nur während eines kurzen Zeitabschnittes vorkommen, zudem im Standardprofil eine hohe Korrelation und geringe Pollenzahlen aufweisen, können zu einer einzigen Artengruppe zusammengefasst werden.

Diese Regeln führen zur Reduktion der ursprünglichen Anzahl Arten r' zur verminderten Anzahl r .

Um die Auswirkungen dieser Regeln zu testen, wurde eine Hauptkomponentenanalyse durchgeführt und deren Resultate mit der Hauptkomponentenanalyse in Schneebeli et al. (1989) verglichen, welche auf den gleichen Ausgangsdaten beruht. Die ersten zwei Faktoren erklären nach Anwendung der hier dargestellten Regeln 54% der Varianz, hingegen in Schneebeli et al. (1989) nur 28% der Varianz. Mit diesen Regeln lässt sich also das Rauschen des Signals und die Nichtlinearität vermindern.

Entfernen von Ausreißern

Nach der Auswahl der Arten, welche für die Pollensumme verwendet werden, finden sich in den Artvektoren x_j dennoch öfters Werte, welche die benachbarten Werte um ein mehrfaches übertreffen oder isoliert im Profil auftauchen. Diese als Ausreißer bezeichneten Werte stören die Zuordnung von Proben ins Standardprofil. Um diese Ausreißer zu eliminieren, wurde der gleitende Median MED über 5 Punkte $\{x_{i-2}, x_{i-1}, x_i, x_{i+1}, x_{i+2}\}$ bestimmt, und falls $x_i > 10 \text{ MED}$, wurde der extreme Wert x_i durch den Median MED ersetzt. Diese Methode lehnt sich in einem gewissen Sinn an die Ideen von Henley (1981) an. Ab welcher Grösse ein Wert als Ausreißer betrachtet wird, ist abhängig von der Datendichte einerseits, von der Echtheit der Spitze andererseits. Die Wahl des Faktors, mit der der gleitende Median multipliziert wird (hier 10), ist deshalb willkürlich.

Glätten des Standardprofils

Das bereinigte Standardprofil kann nun noch geglättet werden. Damit werden die (witterungsbedingten?) Schwankungen beseitigt. Dazu wird ein linearer Filter angewandt, welcher die originale Matrix X' in die gefilterte Matrix X umwandelt (Chatfield, 1984). Die Filterung wird dabei auf die originalen Artvektoren x_j' angewandt. Als Filter wird ein binomial gewichtetes

gleitendes Mittel genommen. Die Gewichte $\{a_q\}$ werden so gewählt, dass $\sum a_q = 1$, wobei $q = -g, \dots, +g$. Die Gewichte $\{a_q\}$ sind definiert durch

$$a_q = \binom{2g}{q+g} / 2^{2g} \quad (4.6).$$

Der Vektor x_j' wird in x_j mit der Operation

$$x_j(i) = \sum_{q=-g}^{+g} a_q x_j'(i+q) \quad (4.7)$$

umgewandelt. Für die Filterung der Pollendaten wurde ein gleitendes Mittel über 5 Punkte ($g = 2$) mit den Gewichten $\{1/16, 4/16, 6/16, 4/16, 1/16\}$ verwendet. Die Glättung ist an den Enden des Standardprofils nicht symmetrisch, da das Profil keine stationäre Serie darstellt. Für die Endpunkte wurden deshalb nur die jeweils linken beziehungsweise rechten Punkte einbezogen. Die Glättung ist erwartungstreu, das heisst der Mittelwert wird nicht verändert.

4.3.3. Ähnlichkeitsmasse und Transformation

Nach den vorangehenden Operationen sind nun die Matrix X des Standardprofils mit n Proben und r Arten und die $o \times s$ einzuordnenden Proben vorhanden, welche aus Vektoren y^T der Länge r bestehen. Gesucht ist ein Mass, mit welchem die Ähnlichkeit zwischen einer Probe des Standardprofils und der einzuordnenden Probe bestimmt werden kann (Abb. 4.5).

Die multivariate Statistik stellt zahlreiche solcher Masse zur Verfügung, da keine eindeutige Lösung im mehrdimensionalen Raum existieren muss (Wildi, 1986). Mögliche Ähnlichkeitsmasse sind unter anderem der lineare Korrelationskoeffizient, der Rangkorrelationskoeffizient und Kontingenz- oder Distanzmasse.

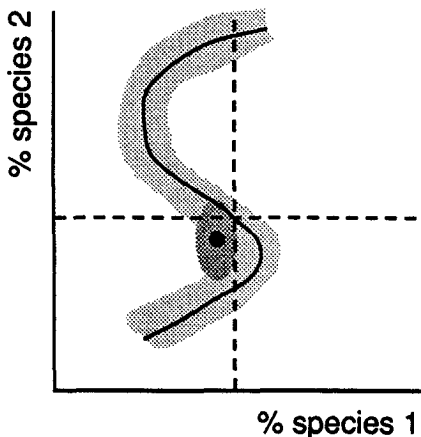


Abbildung 4.5 Darstellung des Prinzips der besten Korrelation einer Pollenprobe (schwarzer Punkt) unbekannter Einordnung in das Standardprofil (Linie). Für die Darstellung des Prinzips werden nur 2 Arten genommen, es lässt sich aber zwanglos für mehrere Arten im dann mehrdimensionalen Raum anwenden. Die grauen Flächen stehen für die Bandbreite $\pm\sigma$. Die Kreuzung der gestrichelten Linien weist den kleinsten Abstand zwischen Standardprofil und Probe auf.

Beim Korrelationskoeffizienten³ und bei den Kontingenzmassen ist es von Nachteil, dass auch Arten zu den Massen beitragen, welche in einer Probe fehlen, jedoch im Standardprofil vorkommen. Dies ist bei den Distanzmassen einfacher. Fehlt eine Art, so liefert sie einfach keinen Beitrag an die Distanz. Ein weiterer Vorteil der Distanzmasse ist ihre einfache Berechnung. Dies ist besonders günstig, wenn die kleinste Distanz (Minimum) zwischen der unbekannt Probe und den Proben des Standardprofils sowie der Vertrauensbereich des Minimums mit einer Monte-Carlo-Simulation bestimmt werden.

Aus diesen Gründen werden hier die Euklidische Distanz (EUK) und die Manhattan Distanz (MAN) verwendet. Die Euklidische Distanz (l_2 -Norm) minimiert die quadratischen Abweichungen, die Manhattan Distanz (l_1 -Norm) die Abweichungen (Tarantola, 1987). Die Euklidische Distanz ist erwartungstreu, aber empfindlicher auf Ausreisser, da sie eine Gauss-Verteilung der Fehler an den Daten (den Pollenproben) annimmt, die Manhattan-Distanz ist robuster, da sie eine doppelt exponentielle Verteilung der Fehler an den Daten annimmt. Die doppelt exponentielle Verteilung ist viel breiter als die Gauss-Verteilung⁴.

Der Distanzvektor d einer unbekannt Probe zu den Proben des Standardprofils wird nun aus den $i = 1, n$ Zeilenvektoren des Standardprofils x_i^T und dem Zeilenvektor y^T der Probe berechnet. Die resultierenden Formeln für das Distanzmass $\|d\|$ des Distanzvektors d sind

$$\|d\|_{\text{MAN}} = \sum_{j=1}^r |x_j^T - y_j^T| \quad (4.8)$$

$$\|d\|_{\text{EUK}} = \sum_{j=1}^r (x_j^T - y_j^T)^2 \quad (4.9)$$

Ob eine Distanz vorteilhafter als eine andere ist, hängt von den effektiven Verteilungsfunktionen der Vektoren x^T und y^T ab. Da die Verteilungsfunktion für jede Probe verschieden scheint, lässt sich keine optimale Verteilungsfunktion a priori ermitteln. Erst a posteriori kann entschieden werden, welches Distanzmass optimal war. Als optimal wird jenes Distanzmass betrachtet, welches die grösste Wahrscheinlichkeit hat.

Eine weitere Möglichkeit, um die Verteilungsfunktion der Daten zu beeinflussen, ist die Transformation der Elemente der Vektoren x^T und y^T . Im folgenden werden neben den Distanzmassen der untransformierten Daten auch

³Es wurden zahlreiche Versuche mit verschiedenen Varianten des Korrelationskoeffizienten durchgeführt. Sie erweisen sich aber nach Berechnung des Vertrauensintervalls als deutlich weniger effizient als die Distanzmasse.

⁴Bei der Gauss-Verteilung tritt ein Fehler grösser $\pm 2\sigma$ mit einer Wahrscheinlichkeit von 0.05 auf, bei der doppelt exponentiellen Verteilung mit einer Wahrscheinlichkeit von 0.14, also dreimal häufiger. Ein Fehler von $\pm 3\sigma$ tritt bei der doppelt exponentiellen Verteilung 20 mal häufiger auf als bei der Gauss-Verteilung.

die Distanzmasse der mit der Quadratwurzel transformierten Pollenprozentwerte berechnet.

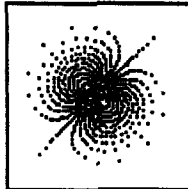
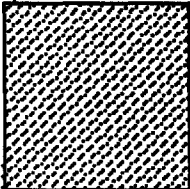
4.3.4. Bestimmen des Maximum Likelihood-Minimums und der Vertrauensintervalle

Die unbekannte Probe ist jener Probe des Standardprofils am nächsten, die im Distanzvektor d das kleinste Element aufweist. Wird der Distanzvektor d als Funktion $f(d)$ betrachtet, kann die Funktion eine recht komplizierte Form annehmen. Beispiele für ihre Form sind in Abb. 4.9 dargestellt. Das Minimum ist öfters sehr flach, oder die Funktion weist mehrere lokale Minima etwa gleicher Grösse auf. Je nach Distanzmass können sich die Minima auch an unterschiedlichen Stellen der Funktion $f(d)$ befinden, es resultieren unterschiedliche Lösungen. Eine eindeutige Lösung ist deshalb ohne weitere Informationen nicht immer möglich. Die Artvektoren x und y weisen verschiedene, unbekannte Verteilungen auf, eine analytische Berechnung eines Vertrauensintervalls ist deshalb nicht möglich. Um die Maximum-Likelihood (ML) des Distanzminimums und die Vertrauensintervalle der ML zu bestimmen, wurde eine Monte-Carlo-Simulation durchgeführt.

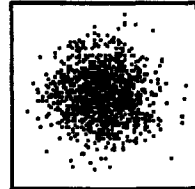
Die Monte-Carlo-Simulation beruht auf der Idee, dass dem Experimentator ein Datensatz $\mathcal{D}(0)$ bekannt ist, der eine mögliche Realisierung des wahren Datensatzes \mathcal{D} und eines Fehlervektors ε ist, d.h. $\mathcal{D}(0) = \mathcal{D} + \varepsilon$. Gleichfalls bekannt sind die gemessenen Parameter $a(0)$ (hier Minimum des Distanzvektors d und Quotient des Mittels der Distanzen zum Minimum), unbekannt jedoch a_{wahr} . Bei bekannter Verteilungsfunktion für ε können nun mit Hilfe eines Zufallszahlengenerators⁵ neue, hypothetische Datensätze $\mathcal{D}(1)$, $\mathcal{D}(2)$, ... erzeugt werden, welche ebenfalls Realisierungen von \mathcal{D} sind. Aus den

⁵Als Generator für die gleichverteilten Zufallszahlen $x \in [0,1]$ wird der lineare, kongruente Generator $y_i = (Ay_{i-1} + C) \bmod M \Rightarrow x_i = y_i / M$ verwendet. Der Multiplikator A beträgt 714025, die Verschiebung C 150889 und der Modulus M 714025. Diese Werte zeigen bis zu 6 Dimensionen keine Korrelation, die maximale Periodenlänge ist M . Anfangswert y_0 ist 13. Die Bedeutung der Zahlen A, C, M ist in der untenstehenden Abbildung illustriert, bei schlechter Wahl der Zahlen wird ein regelmässiges Muster in zwei Dimensionen erzeugt! Für die normalverteilten Zufallszahlen wurde der Algorithmus von Box-Muller nach Press et al. (1986) verwendet. Unten sind die Paare (x_i, x_{i+1}) für zwei kongruente Generatoren (0,1) und deren Transformation in eine Gauss-Verteilung ($A=65, C=1, M=2048$ bzw. $A=1366, C=150889, M=714025$) dargestellt.

M=2048 A=65 C=1



M=714025 A=1366 C=150889



Datensätzen $\mathcal{D}(h)$ lassen sich wiederum die statistischen Parameter $\mathbf{a}(1)$, $\mathbf{a}(2), \dots, \mathbf{a}(n)$ berechnen (Press et al., 1986, p.529). Die simulierten Parameter $\mathbf{a}(0), \dots, \mathbf{a}(h)$ ermöglichen nun, das Vertrauensintervall für die Parameter zu berechnen. Günstig für die Berechnung des Fehlervektors ε ist der zentrale Grenzwertsatz, aus welchem hervorgeht, dass für eine grosse Anzahl Realisierungen h die Annahme einer Gauss-Verteilung immer gerechtfertigt ist. Es ist deshalb nicht notwendig, die wahre Verteilung des Fehlervektors ε zu kennen.

Die Varianz der Elemente der Matrizen Y ist bekannt, da sie eine binomiale Verteilung aufweisen. Der Vektor der Erwartungswerte der Pollenzahlen sei $y(0)$ mit r Arten, die Varianzen σ^2 . Der Vektor der zufälligen Fehler an $y(0)$ sei ε . Unter der Annahme, dass der Fehler an einer Pollenart nicht mit dem Fehler einer anderen Pollenart korreliert ist, wird die neue Realisierung $y(h)$

$$y(h) = y(0) + \varepsilon \quad (4.10).$$

Die Varianz σ_b^2 der Binomialverteilung kann für $mp \geq 11$ (m Anzahl der gezählten Pollen, p Wahrscheinlichkeit) durch die Varianz einer Gauss-Verteilung ersetzt werden (Linder und Berchtold, 1979). Die Varianz σ_b^2 wurde auch für $mp < 11$ durch eine Gauss-Verteilung ersetzt, da die Abweichungen nicht gravierend sind. Wird ein Element der neuen Realisierung $y(h)$ negativ, wird dessen Absolutwert genommen, $|y(h)|$.

Aus den $nran$ Realisierungen $y(h = 1, nran)$ wird die neue Matrix $Y_{nran, r}$ gebildet. Aus den Matrizen X_{nr} und $Y_{nran, r}$ werden $nran$ Distanzvektoren d berechnet. In jedem Distanzvektor $d(h)$ wird das Minimum μ bestimmt, welches an eine Stelle i zu liegen kommt. Der aus allen $nran$ Minima μ erzeugte Vektor m wird als Häufigkeitsverteilung über $i = 1, n$ interpretiert. Der häufigste Wert κ entspricht dem Maximum-Likelihood der Menge der Minima μ , $ML(m)$. $ML(m)$ entspricht der Tiefe einer Probe im Standardprofil. Die Wahrscheinlichkeit p_μ (im folgenden nur noch p genannt) für κ an der Stelle i ergibt sich aus dem Verhältnis der Monte-Carlo-Realisierungen und der Anzahl der Minima an der Stelle i , $p = nran/\kappa$. Die Werte des Vektoren m sind nicht notwendigerweise symmetrisch um κ . Es sind dann auch die Vertrauensintervalle $\hat{\phi}$ nicht symmetrisch, da für die gleiche Wahrscheinlichkeit unterhalb von κ , p_l , beziehungsweise oberhalb κ , p_u , über mehr oder weniger Intervalle i summiert werden muss. Diese wahren, asymmetrischen Vertrauensintervalle $\hat{\phi}$ werden deshalb durch das symmetrische Vertrauensintervall Ψ ersetzt, wobei π die angestrebte Wahrscheinlichkeit für das Vertrauensintervall bezeichnet (Abb. 4.6). Die Vertrauensintervalle werden berechnet, indem abwechselungsweise von der Stelle i_κ ausgehend die Wahrscheinlichkeit $p = m(i)/nran$ addiert wird, bis die Wahrscheinlichkeit π erreicht ist. Das durch die Differenz der Indizes $i_u - i_l$, bezeichnete Vertrauensintervall $\hat{\phi}$ wird nun in eine Distanz $\delta_{lu} = \delta_u, -\delta_l$, transformiert. Das Vertrauensintervall Ψ ist dann die Hälfte der Distanz δ_{lu} . Liegt eine absolute Datierung zwischen

Tiefe und Zeit vor, lässt sich δ_{lu} , in eine Zeitspanne τ transformieren. Diese Zeitspanne τ umfasst ebenfalls die Wahrscheinlichkeit π . Das Vertrauensintervall Ψ_τ ist dann $\tau/2$. Als Algorithmus dargestellt ergeben sich folgende Formeln:

$$\begin{aligned}
 1: \quad \pi &\leq \sum_i m(i)/nran \quad ; i = +1, -1, +2, -2, \dots \rightarrow \iota = i_u - i_l, \\
 &1b: \quad \hat{\psi}_u = i_u \quad \hat{\psi}_l = i_l \\
 2: \quad \delta(i_u) &= \delta_u, \quad \delta(i_l) = \delta_l, \quad \rightarrow \quad \delta_{lu} = \delta_u - \delta_l, \\
 3: \quad \Psi &= \delta_{lu}/2 \\
 4: \quad \tau &\propto \delta_{lu}, \quad \rightarrow \quad \Psi_\tau = \tau/2
 \end{aligned} \tag{4.11}$$

Zusammengefasst: Im gemessenen und in den simulierten Distanzvektoren wird das Minimum bestimmt. Diese Minima bilden eine Häufigkeitsverteilung. Das Maximum der Häufigkeitsverteilung ist das Maximum-Likelihood für die entsprechende Tiefe im Standardprofil. Aus der Breite der Häufigkeitsverteilung lässt sich das Vertrauensintervall für das Maximum-Likelihood bestimmen.

4.3.5. Regelbasierte Bestimmung der optimalen Lösung

Werden für u Distanzmasse und v Transformationen die Distanzvektoren berechnet, entstehen $u \times v = v$ Lösungen. Für Pollenproben mit einer nicht durch extreme Werte beeinflussten Verteilung der Pollenprozentage ergeben sich dieselben κ Werte für die verschiedenen Lösungen, die Wahrscheinlichkeit p und das Konfidenzintervall Ψ sind jedoch verschieden. Die optimale Lösung OPT weist die grössten Wahrscheinlichkeiten beziehungsweise das kleinste Konfidenzintervall der v Lösungen auf. Öfters sind die κ Werte der Lösungen verschieden. Die optimale Lösung ist auch in diesen Fällen jene mit der maximalen Wahrscheinlichkeit p . Die optimalen Lösungen der Proben in einer Bohrung werden geprüft, ob ihre Tiefen

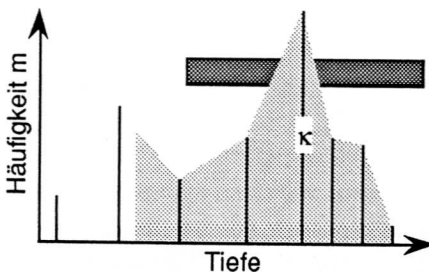


Abbildung 4.6 Vertrauensintervall der Häufigkeitsverteilung m . Die Häufigkeiten sind mit vertikalen Strichen dargestellt, hellgrau das wahre Vertrauensintervall für $\pi = 0.9$, dunkelgrau das symmetrische. Das Maximum-Likelihood ist mit κ bezeichnet.

(beziehungsweise Alter) mit derjenigen der stratigraphischen Reihenfolge übereinstimmen. Ist dies bei einer Probe nicht der Fall, wird in den Vektoren m der verschiedenen Lösungen v ein sekundäres Maximum κ' gesucht oder es muss eine mögliche geologische Erklärung⁶ der Schichtumkehr vorliegen. Das Kriterium der stratigraphischen Reihenfolge ist dadurch definiert, dass die Reihenfolge des Vektors y_{or} für $k = 1, o$ bewahrt bleibt. Der ganzzahlige Vektor $(1, 2, \dots, o)$ ω entspricht der ursprünglichen Reihenfolge, ω' dem Vektor nach Bestimmung von κ . Ist nun die Differenz ζ der Komponenten $\omega' - \omega \neq 0$, so befindet sich die Probe nicht mehr in der stratigraphischen Reihenfolge. Der Algorithmus für die optimale Lösung lautet

1: falls $\forall i_{\kappa}^{(u=1,v)} \equiv 1 \wedge \zeta = 0 \rightarrow \text{OPTIMAL}$

2: falls $\forall i_{\kappa}^{(u=1,v)} \neq 1$

2a: $\max p_{\kappa} \wedge \zeta = 0 \rightarrow \text{OPTIMAL}$

∨

2b: Schichtinversion $\wedge i_{\kappa}' \rightarrow \text{OPTIMAL}$ (4.12)

Zusammengefasst: Ist eine Probe älter als die tieferliegende Probe, ist die entweder geologisch bedingt, oder es muss ein sekundäres Maximum in den Distanzvektoren gesucht werden, um ein vernünftiges Alter zu erhalten.

4.3.6. Testen der Empfindlichkeit der Zuordnung

Um die Aussagekraft der Zuordnung zu prüfen, wurden einerseits einige Basisproben ¹⁴C- datiert (Kapitel 4.2.2.) und andererseits das originale, nicht ausreisser-bereinigte und nicht gefilterte Standardprofil X_{nr} mit dem gefilterten Standardprofil X_{nr} datiert (Kapitel 4.4.1.). Die Proben des originalen Standardprofils weisen etwa dieselben Eigenschaften auf wie die Basisproben, die Kreuzdatierung sollte damit wesentliche Hinweise auf die Datierbarkeit geben. Mit der Kreuzdatierung können auch besser oder schlechter datierbare Zeitabschnitte identifiziert werden.

4.3.7. Absolute Datierung der Pollenproben am Standardprofil

Die Identifikation⁷ der unbekanntenen Basis- und Transsektproben mit den beschriebenen Methoden bezieht sich immer auf eine Probe des Standardpro-

⁶Insbesondere bei den Basisproben scheint es in einigen Fällen auch stratigraphisch wahrscheinlich, dass die Schichtumkehrung durch einen Erdschlipf verursacht wurde.

⁷Der Begriff «Identifikation» wird in der Literatur (Wildi, 1986) benutzt, und bezeichnet die Einordnung einer multivariaten Probe in eine geordnete, multivariate Menge. Im hier

files, von der die Tiefe bekannt ist, jedoch nicht das absolute Alter. Wären die Proben des Standardprofils alle absolut datiert, dann könnte einer Tiefe direkt ein Alter zugeordnet werden. Sind die Standardabweichungen der absoluten ^{14}C -Datierungen kleiner als die Residuen der Regression zwischen Alter und Tiefe (Formel (4.1)), wird am besten linear zwischen zwei absolut datierten Proben interpoliert. Die Berechnung eines Zeitmasstabes für die Abweichungen lässt sich mit genügender Genauigkeit durch die Steigung der Regression zwischen Alter und Tiefe annähern.

4.4. RESULTATE DER STRATIGRAPHISCHEN KORRELATION IM TURBENRIET

4.4.1. Optimale Konfiguration des Standardprofils

Die Auswahl der Pollenarten und die Transformation ihrer Werte ist ein entscheidender Schritt für eine erfolgreiche Identifikation.

Auswahl der verwendeten Pollenarten

Die Auswahl der Pollenarten erfolgt nach den in Kap. 4.3.2 dargestellten Regeln. Birks (1986 a, p. 6) gibt für Moore von etwa 300 m Durchmesser als Fremdpollenquelle eine Fläche von etwa 10 km² an. Im Turbenriet sind somit die Höhenstufen von 1000–1500 m in einem Umkreis von etwa 2 km als hauptsächlichste Pollenquellen zu betrachten.

Im Gegensatz zu Schneebeli et al. (1989) wird *Alnus* als moortypische Art betrachtet, was zu einer wesentlichen Modifizierung und besseren Strukturierung des Pollendiagramms für die Identifikation führt. Pollen von *Selaginella selaginoides* und von *Poaceen* werden als Sporenpflanze bzw. als Gras mit dem natürlichen Logarithmus transformiert. Die Pollen von *Pinus* werden gleichfalls mit dem natürlichen Logarithmus transformiert, da *Pinus* im jüngsten Zeitabschnitt als Moorpflanze wächst. *Cerealia* und *Juglans* werden als Artengruppe zusammengefasst, da beide erst in jüngster Zeit und mit geringer Stetigkeit auftreten, jedoch als Kulturzeiger sehr typisch sind.

Entfernen von Ausreißern und Filterung des Standardprofile

Die aus dem Standardprofil entfernten Ausreisser sind in Anhang D, Seite D-2 aufgelistet. Die entfernten Arten in den entsprechenden Proben weisen meist Pollenzahlen zwischen eins bis fünf auf. Nur in zwei Fällen (*Apiaceae*,

beschriebenen Fall der Datierung handelt es sich um die Zuordnung zu einem eindimensionalen, multivariaten Vektor, eine Einreihung.

Probe 99, 30 Pollen; *Cichoriaceae*, Probe 319, 12 Pollen) liegen sie höher, nur bei Probe 99 wird der Ausreisser durch einen Wert grösser als Null ersetzt.

Die Filterung des Standardprofiles nach Gleichung (4.7) verändert die originalen Werte durchschnittlich um etwa 10–20% des ursprünglichen Signals. Die gefilterten Werte finden sich in Anhang D, Seite D-8 (MA5 of stratigraphic sequence).

Interpretation des Standardprofils

Die resultierenden ungefilterten und gefilterten Pollenprozentage der ausgewählten Pollenarten sind in Abbildung 4.7 dargestellt. Die Pollenkurven von *Corylus*, *Ulmus*, *Fagus*, *Cichoriaceae* und *Betula* weisen nicht wie in Schneebeli et al. (1989) zwei Maxima, sondern nur ein stärker ausgeprägtes Maximum auf. Die Kurven sind deshalb für die Datierung besser geeignet.

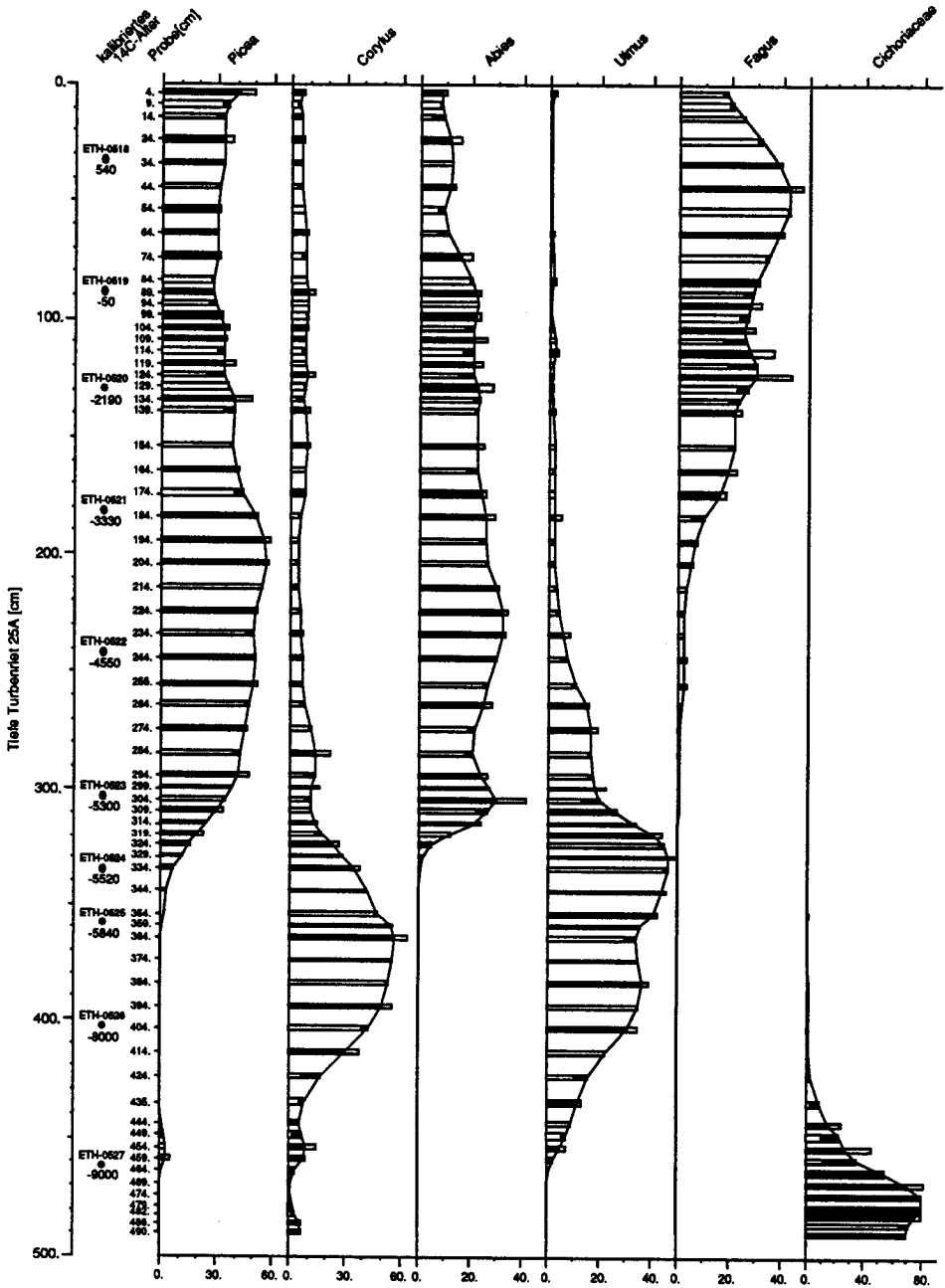
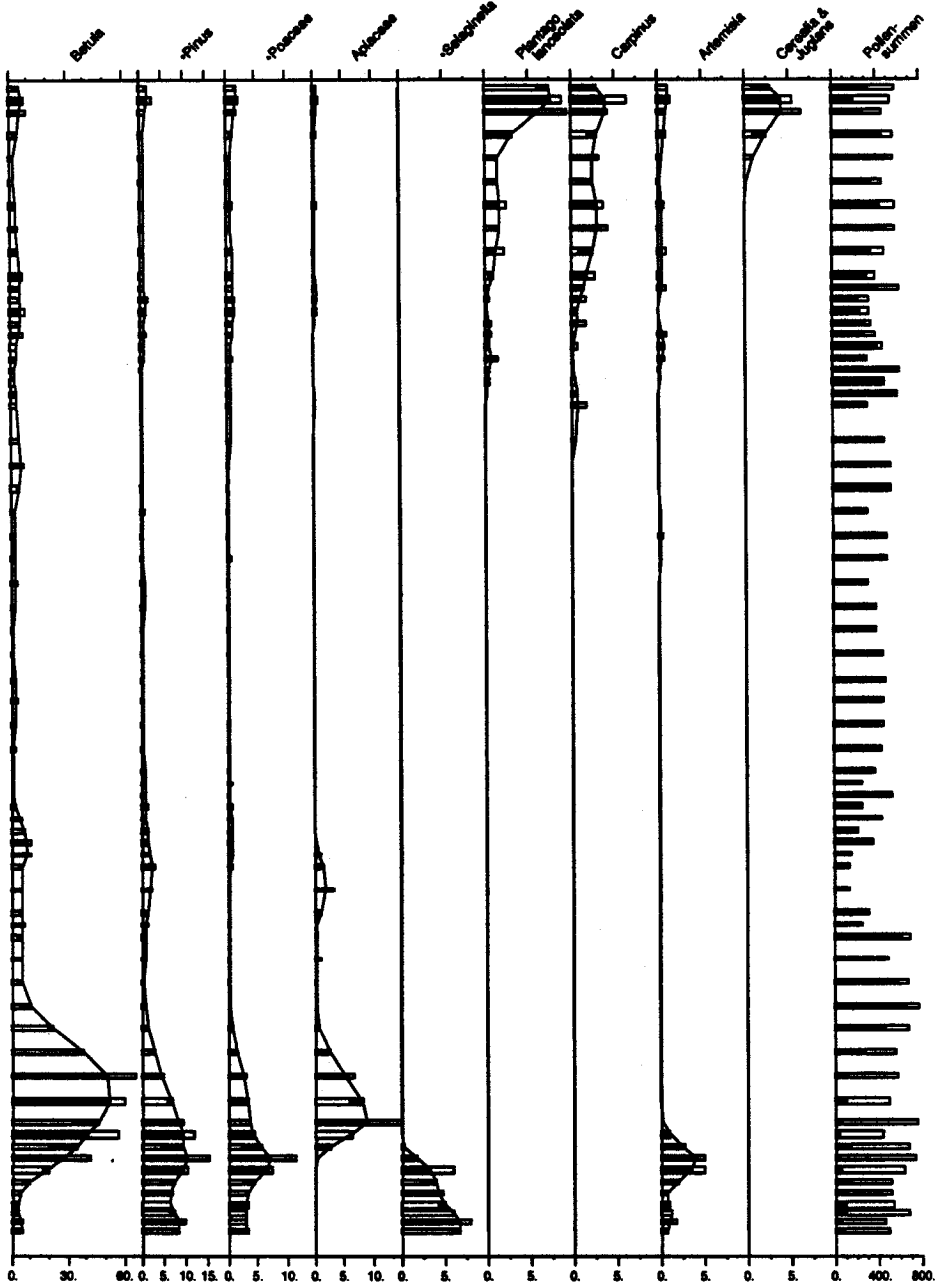


Abbildung 4.7 Pollendiagramm des Standardprofils 25A. Die durchgezogenen Linien stellen die gefilterten Werte dar. Ist der originale Wert kleiner als der gefilterte, sind die Balken weiss-schwarz, ist der originale Wert grösser als der gefilterte, sind die Balken schwarz-weiss. Mit dem natürlichen Logarithmus transformierte Pollen sind mit einem



(Fortsetzung Abb. 4.7) • vor dem Namen versehen. Der weiße Balken der Pollensumme entspricht der gezählten Anzahl Pollen, der schwarze der für die Prozentberechnung (nach Transformation) verwendeten Anzahl Pollen.

Identifikation der originalen an den geglätteten Daten: Maximum Likelihood und Vertrauensintervall

Je eindeutiger⁸ sich die Pollenprozentage im Standardprofil verändern und je geringer die Schwankungen der Kurve von Probe zu Probe (Rauschen) sind, umso besser lassen sich die Proben datieren. Die Veränderungen sind nicht über die ganze Profillänge gleich deutlich, sondern weisen charakteristische Abschnitte auf. Um die Genauigkeit der Identifikation zu überprüfen und kritische Abschnitte aufzufinden, wurden die originalen Daten des Standardprofils mit den gefilterten Daten korreliert (Kreuzdatierung). Die Abweichungen zwischen der effektiven Tiefe z der Probe i und den bei der ML-Schätzung mit den originalen Daten ermittelten Probtiefe z' sind in Abbildung 4.8 dargestellt. Der Mittelwert der Abweichungen zwischen z und z' , ζ , die Standardabweichung des Mittelwertes der Abweichungen σ_ζ und das Maximum der Abweichung max ist in Tabelle 4.3 aufgeführt. Für die Kreuzdatierung wurden 256 Realisierungen nach (4.10) erzeugt (Die Anzahl der Realisierungen ist, wenn nicht anders angegeben, im folgenden $nran = 256$).

Distanzmass	ζ [cm]	σ_ζ [cm]	max [cm]
MAN	8.82	19.1	105
EUK	8.14	14.33	60
MAN-SQ	3.98	9.13	55
EUK-SQ	3.14	5.72	30

Tabelle 4.3 Mittelwerte der Abweichungen ζ , Standardabweichungen der Mittelwerte σ_ζ und maximale Abweichungen max der verschiedenen Distanzmasse für die kreuzdatierten Proben des Standardprofils. Für die Distanzmasse werden folgende Abkürzungen verwendet: MAN: Manhattan, EUK: Euklid, für die Wurzeltransformation der Daten SQ

Die euklidische Distanz ist in den meisten Fällen etwas effizienter als die Manhattan-Distanz, die wurzeltransformierten effizienter als die nicht transformierten. Die Manhattan-Distanz findet jedoch in fast allen Fällen das stratigraphisch richtige sekundäre Minimum, im Gegensatz zur euklidischen Distanz. Die Mittelwerte der Abweichungen von 3.14 cm beim Distanzmass EUK-SQ entsprechen etwa 70 Jahren. Das Rauschen des Standardprofils über die Zeit lässt sich in Abbildung 4.8 deutlich erkennen. Ein sehr unruhiger Bereich liegt zwischen 140–70 cm Tiefe (etwa 2500 BC–0 AD). Bei Anwendung der euklidischen Distanz liegen 82% der Standardabweichung zwischen 70 und 145 cm Tiefe. Die hohe Standardabweichung beim Distanzmass MAN

⁸Die Eindeutigkeit ist an einem Vektor mit nur einer Art leicht zu erkennen: Ist die Art monoton zu- oder abnehmend, lässt sich jede andere Probe eindeutig in die Reihe einpassen. Die Eindeutigkeit ist im mehrdimensionalen Raum analog zu verstehen.

ist durch einen einzelnen Wert verursacht. Bei diesem Wert wurde ein sekundäres Minimum gefunden, dessen Wert in der richtigen Tiefe liegt.

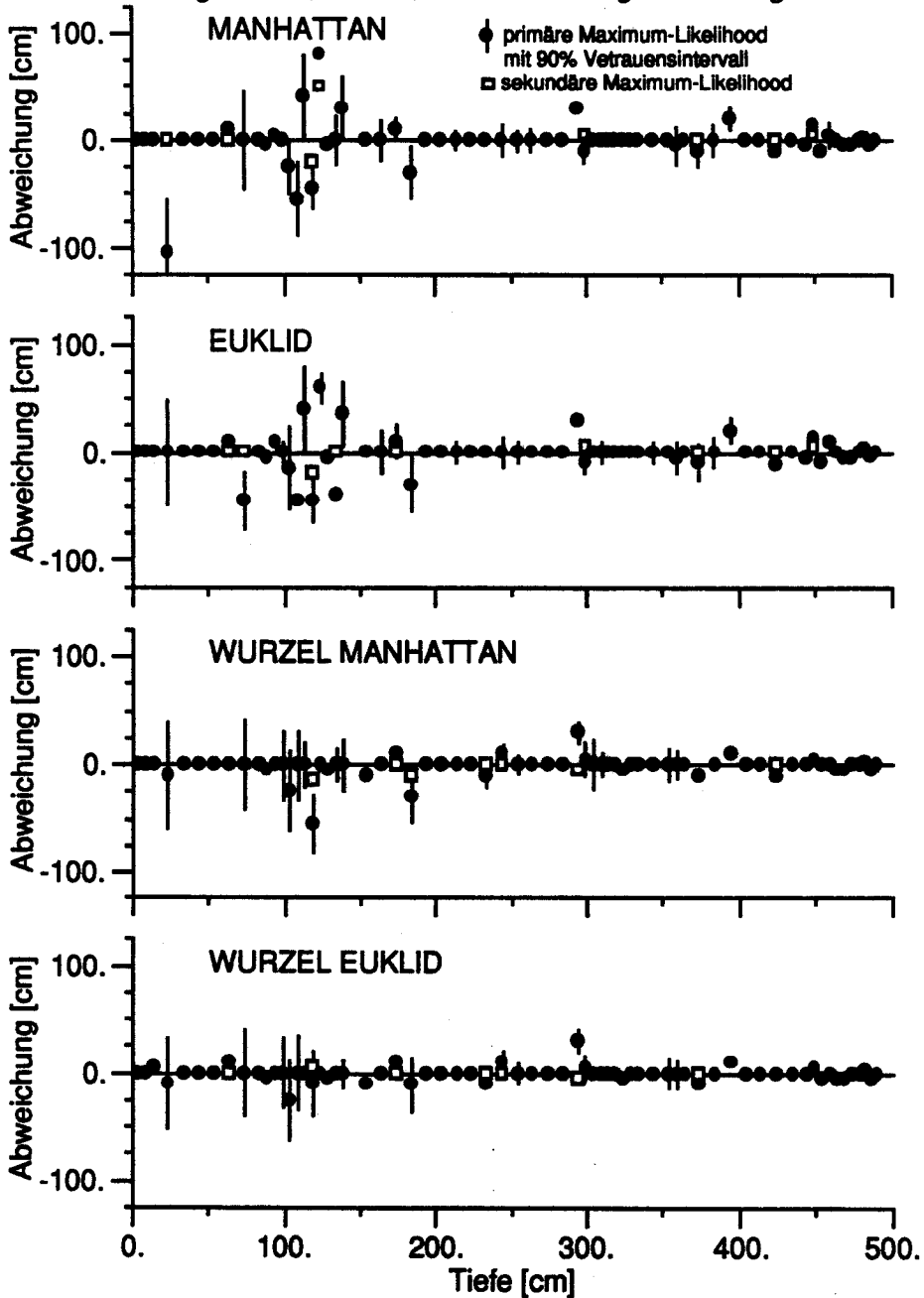


Abbildung 4.8 Abweichungen zwischen der effektiven Tiefe z und der scheinbaren Tiefe z' als Ergebnis der Identifikation der Kreuzdatierung.

4.4.2. Identifikation der Basis- und Transsektproben

Monte-Carlo Realisierungen und der Einfluss der Ähnlichkeitsmasse

Für jede unbekannte Probe Y_{kj}^l , wobei l die Bohrung, k die Probe in der Bohrung und j die Art bezeichnet, wurde eine Monte-Carlo Simulation durchgeführt. An der Standardprofilprobe der Tiefe 9 cm wurde überprüft, ob die nach (4.4) berechnete Standardabweichung σ_b mit der simulierten Standardabweichung σ_s der Realisierungen \mathcal{D} übereinstimmt. Die mittlere Abweichung zwischen σ_b und σ_s beträgt $\pm 6\%$. Die Korrelation zwischen den Arten spielt für die Berechnung der Fehlervektoren ϵ keine Rolle.

Bei schwierig einzureihenden Proben beeinflusst das gewählte Distanzmass das Resultat stark. Bei diesen Proben befindet sich das Häufigkeitsmaximum des Distanzminimums κ je nach Ähnlichkeitsmass und Transformation in deutlich verschiedener Tiefe. Die Breite der Vertrauensintervalle der verschiedenen Lösungen deutet nicht in jedem Falle darauf hin, dass κ schlecht bestimmt ist. Das Vertrauensintervall des Distanzmasses MANHATTAN zeigt eher als EUKLID eine schlechte Bestimmung von κ an. Im folgenden Bild (Abb. 4.9) sind die Distanzvektoren d der verschiedenen Lösungen für die schwierig zu datierende Probe 595 (Punkt 32, Tiefe 210 cm) dargestellt. Sie muss aufgrund der eindeutig datierbaren Basisproben am Punkt 32 jünger als die 210 cm-Probe des Standardprofils (*pst*) sein. Die nicht transformierte euklidische Distanz weist zwar bei 424 cm *pst* ein sehr klares Minimum auf, welches aber mindestens 210 cm tiefer als das vermutete Minimum in einem aus Altersgründen nicht plausiblen Bereich liegt. Die Wahrscheinlichkeit $p = 0.96$ und das Vertrauensintervall $\Psi = 4.9$ cm geben überhaupt keinen Hinweis auf diese Abweichungen. Sehr viel besser verhält sich die Manhattan-Distanz, welche zwar gleichfalls das falsche Minimum findet, aber eine niedrige Wahrscheinlichkeit $p = 0.43$ und das sehr breite Vertrauensintervall $\Psi = 155$ cm angibt. Der κ -Wert der Manhattan-Distanz der wurzeltransformierten Daten ist 164 cm *pst* mit einer Wahrscheinlichkeit von $p = 0.88$ und einem Vertrauensintervall $\Psi = 31$ cm. Der κ Werte der euklidischen Distanz der wurzeltransformierten Daten ist 99 cm *pst* mit einer Wahrscheinlichkeit von $p = 0.57$ und einem Vertrauensintervall $\Psi = 31$ cm. Die optimale Lösung entspricht dem κ -Wert, welcher mit den wurzeltransformierten Daten und der Manhattan-Distanz gefunden wird. Dieses Beispiel zeigt, dass unter Umständen verschiedene Ähnlichkeitsmasse und Transformationen notwendig sind, um die optimale Lösung zu finden. Auch wird anschaulich klar, wo der Vorteil der mit der Manhattan-Distanz realisierten robusten l_1 -Norm liegt.

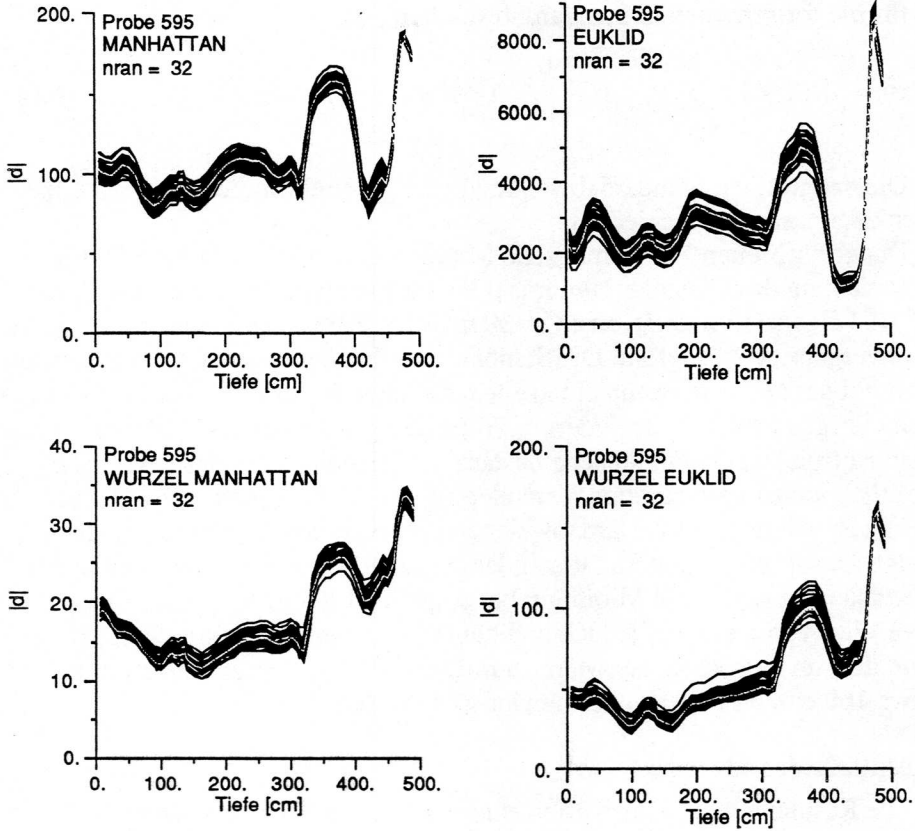


Abbildung 4.9 Distanzen d der zwei Ähnlichkeitsmass für die untransformierten Artvektoren und für die wurzeltransformierten Artvektoren der Probe 595 (Punkt 32, Tiefe 210 cm). Die Tiefe der x-Achse bezieht sich auf das Standardprofil.

Konvergenz der Monte-Carlo-Simulation

Um zu testen, wieviele Monte-Carlo-Simulationen notwendig sind, um eine stabile Verteilung der Werte des Distanzminimums μ zu erhalten, wurde das fortschreitende arithmetische Mittel und die fortschreitende Standardabweichung berechnet. Da es sich hier um eine numerische Analyse der Monte-Carlo Simulation handelt, wurde nicht das Vertrauensintervall Ψ berechnet, sondern die fortschreitende Standardabweichung σ_h . Die Formel für das fortschreitende Mittel μ_h , lautet

$$\mu_h = \mu_{nran} - 1/h \sum_{i=1}^h \kappa_i, \quad h=1, nran \quad (4.13),$$

für die fortschreitende Standardabweichung σ_h

$$\sigma_h = \left(\frac{1}{(h-1)} \sum_{i=1}^h (\kappa_i - \mu_h)^2 \right)^{1/2}, \quad h=1, n, n-1. \quad (4.14).$$

Die endgültigen Standardabweichungen σ_{256} sind für die einzelnen Ähnlichkeitsmasse unterschiedlich.

Das fortschreitende arithmetische Mittel und die fortschreitende Standardabweichung des Distanzminimums μ konvergieren bei normalen Daten bei $2^6 = 64$ Realisierungen in einen stabilen Wert. Bei schwierigen Proben ist die Konvergenz sehr langsam. Die Standardabweichung vergrößert sich sprunghaft bei der l_2 -Norm, wenn ein «seltenes» Ereignis eintritt. Als Beispiel einer schwierigen Probe wird wiederum Probe 595 genommen (Abb. 4.10). In diesem Beispiel ist die euklidische Distanz ein ungeeignetes Mass, was sich deutlich an der sprunghaften Veränderung des Mittelwertes und der drastischen Zunahme der Standardabweichung σ_h nach etwa 160 Realisierungen zeigt. Die sprunghaften Zunahmen lassen sich durchaus erklären: Bei einer Realisierung wurde ein Minimum bei ungefähr 120 cm gefunden. Der definitive Wert von σ_h deutet jedoch nicht auf eine unwahrscheinliche Lösung hin, dies im Gegensatz zur Manhattan-Distanz. Diese zeigt mit einem σ_h von etwa 160 cm, dass die Probe schwierig einzuordnen ist.

Resultate der Identifikation

Die Resultate der Identifikation sind tabellarisch in den Anhängen E.1 und E.2 als relatives Alter in bezug auf das Standardprofil und davon ausgehend als absolutes ^{14}C -Alter festgehalten. Die absoluten Alter wurden wie in 4.3.7 beschrieben berechnet, die Abweichungen wurden mit der Steigung von Gleichung (4.1) berechnet. Die Abbildungen der Lösungen mit den vier Ähnlichkeitsmasse sind in Anhang E.3 dargestellt, die optimalen Lösungen in Kap. 4.5. Über die Genauigkeit der Datierung geben die Tabellen 4.4 und 4.5 Auskunft.

n = 43	MAN	EUK	MAN-SQ	EUK-SQ	OPTIMAL
Mittel p	0.62	0.65	0.57	0.59	0.72
σ_p	0.20	0.20	0.17	0.17	0.17
Median Ψ [cm]	5	5	10	9	5 ± 0.11 ka
90 % Perzentil Ψ [cm]	42	34	38	30	29 ± 0.64 ka

Tabelle 4.4 Mittelwerte und Standardabweichung der Mittelwerte für die Wahrscheinlichkeit p des ML-Schätzers und Mediane und 90 % Perzentile für die Vertrauensintervalle Ψ der Basisproben.

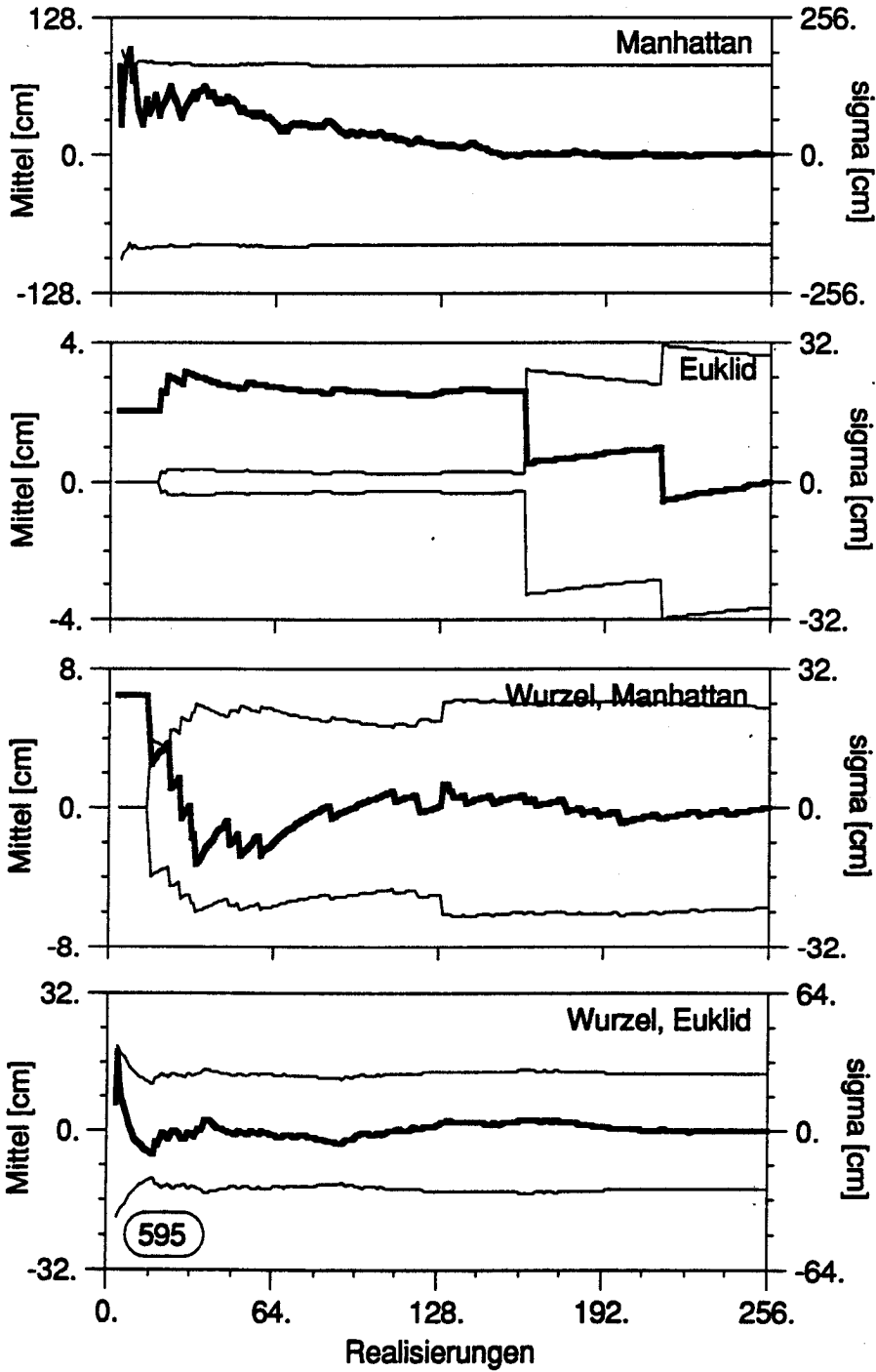


Abbildung 4.10 Konvergenz der Monte-Carlo-Simulationen für das zentrierte, fortschreitende Mittel der Minima (dicke Linie) und der Standardabweichungen (dünne Linien) der Probe 595 (Bohrung 32, Tiefe 210 cm).

n = 39	MAN	EUK	MAN-SQ	EUK-SQ	OPTIMAL
Mittel p	0.51	0.58	0.55	0.58	0.66
σ_p	0.19	0.20	0.22	0.21	0.20
Median Ψ [cm]	16	14	17	15	9 \pm 0.20 ka
90 % Perzentil Ψ [cm]	68	50	49	39	49 \pm 1.08 ka

Tabelle 4.5 Mittelwerte und Standardabweichung der Mittelwerte für die Wahrscheinlichkeit p des ML-Schätzers und Mediane und 90 % Perzentile für die Vertrauensintervalle Ψ der Transsektproben.

Die Resultate zeigen, dass die Basisproben besser zu datieren sind als die Transsektproben. Dieses Resultat scheint wesentlich daher zu rühren, dass die Varianz der Pollensequenz sich in jüngerer Zeit vergrößert. Die Transsektproben liegen über den Basisproben und sind deshalb mehrheitlich jünger. Die Varianz der Pollensequenzen der Transsektproben ist somit grösser.

Diskussion

Die Datierungen der Basisproben sehen bei allen Lösungen etwa gleich aus. Für die Datierung ist es wesentlich, dass immer zwei bis drei Basisproben entnommen werden, da es stratigraphisch nicht immer klar ist, wo die Torfsedimentation beginnt. Bei den Transsektproben treten grössere Unterschiede auf. Die vermutlich falsch datierten Proben sind jedoch meist leicht zu erkennen, da sie die Altersschichtung umkehren, und damit nicht zu einer optimalen Lösung nach Gleichung (4.14) führen. Eine Verdichtung der Transsektproben wäre sehr günstig, da man dann einige kritische Fälle eindeutiger einordnen könnte. Am effizientesten wäre die lineare Interpolation zwischen den schon entnommenen Proben (d.h. bei einer Bohrung würden nicht nur 3, sondern 7 Transsektproben entnommen). Unter der Annahme, dass die Messfehler der ^{14}C -Datierung normalverteilt sind, entspricht 2σ etwa dem 90% Vertrauensintervall. Die pollenanalytische und die ^{14}C -Datierung sind also gleich genau. Ob systematische Fehler zwischen pollenanalytischer und ^{14}C -Datierung auftreten, müsste an identischen Proben überprüft werden. Die räumliche Variabilität ist aufgrund der Resultate in 4.2.2 beträchtlich, weshalb der hier vorgenommene direkte Vergleich zwischen ^{14}C - und pollenanalytischer Datierung zu keiner eindeutigen Antwort führt.

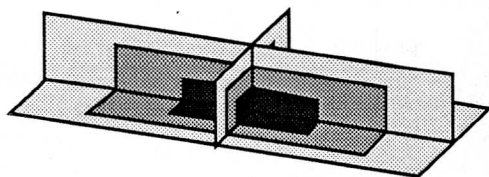


Abbildung 4.11 Schema der datierten Flächen im Moor. Jede Graustufe entspricht einem Altersbereich. Aus der Ebene und den Querschnittsflächen wird das Volumen bestimmt.

4.5. ENTWICKLUNG DES MOORES

Aus den nun vorliegenden Datierungen erfolgt die Berechnung früherer Oberflächen des Moores und der Zuwachsraten. Die Flächen- und Volumeberechnungen⁹ sind in Anhang F dargestellt. Die zeitliche Änderung der Oberfläche des Moores und zweier Querschnittsflächen ermöglicht, das Volumen zu einem bestimmten Zeitpunkt zu berechnen. Die Situation ist schematisch in Abb. 4.11 dargestellt. Die Lage der Querschnittsflächen ist im Turbenriet durch die zwei Transsekte bestimmt.

4.5.1. Horizontale Ausbreitung

Die ersten organischen Sedimente finden sich im untersten der durch Moränen getrennten Mulden (① in Abbildung 4.12) (bei den Mulden handelt es sich genauer um flachere Teilstücke eines Hanges). Sie begann etwa vor 12000 Jahren, das heisst um 10000 BC (Abb. 4.13). Nach einer raschen Ausdehnung im Muldenboden verlangsamte sich ab etwa 8000 BC die Versumpfung, weil sich das Moor in die stärker geneigten Hänge ausdehnte. Dies lässt sich aus der raschen Vermoorung der zweiten Mulde ② schliessen, welche etwa von 8000–6000 BC dauerte. Danach vermoorten die hangaufwärts gelegenen Hänge und die östliche Fortsetzung des durch eine kleine Geländestufe von der untersten Mulde ① getrennten Mulde ③. Dieses war vor der Vermoorung weitgehend mit Fichten bestockt¹⁰. In den hangaufwärts gelegenen Hängen zeichnen sich undeutlich ein bis zwei weitere

⁹Die Berechnung der Zuwachsflächen erfolgte über eine lineare Interpolation der Punktalter. Die Flächen wurden mit der Gauss'schen Flächenformel in der Ebene, aus Trapezen in den vertikalen Transsekten berechnet. Die Gauss'sche Flächenformel für die Fläche F lautet für ein sich nicht überschneidendes n -Eck (Chaperon, F. (1976), Vorlesung Vermessungskunde, ETHZ Abt. VIII) $2F = \sum_{i=1}^n x_i (y_{i+1} - y_{i-1})$.

¹⁰Reste von Fichten-Stämmen und -Zapfen wurden zwischen den Punkten 54 und 55, sowie 74 und 69, in der Übergangsschicht zwischen Mineralboden und Torf gefunden.

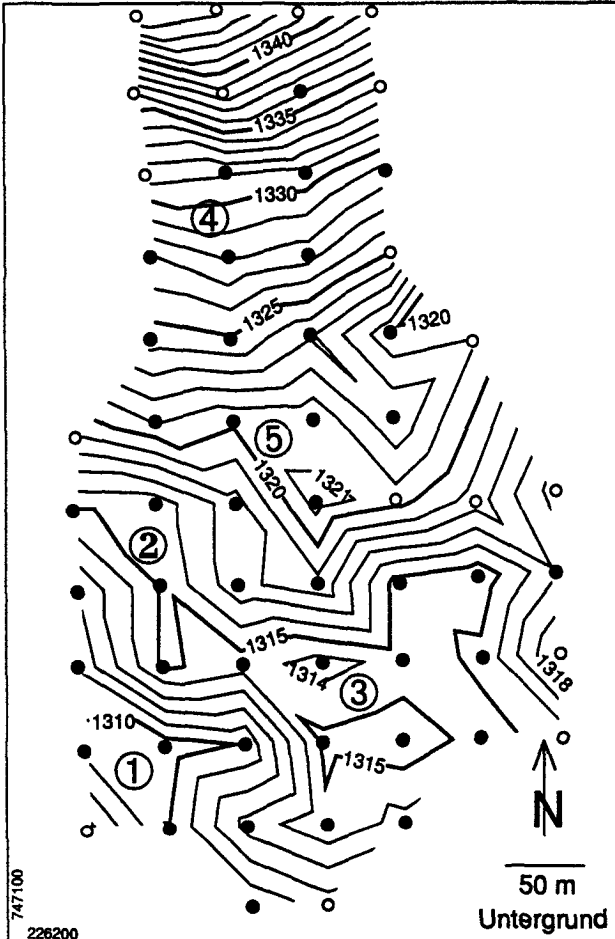


Abbildung 4.12 Mineralischer Untergrund des Turbenriets. Die Bohrpunkte, an welchen Torf gefunden wurde, sind mit schwarz gefüllten Kreisen bezeichnet, jene ohne Torf mit schwarz umrandeten Kreisen. Die einzelnen Mulden sind mit Nummern bezeichnet.

Moorzentren ④ ab. Zwischen 6000–4000 BC war die Hälfte der heutigen Moorfläche (Abb. 4.13) von organischen Sedimenten bedeckt. Das heute noch weitgehend intakte Moor ⑤ ist relativ jung.

Die Vermoorungsrate nahm nach etwa 4500 BC stetig ab, mit einem Minimum um 1500 BC. Danach stieg sie ein letztes Mal an, bevor sie um 0 AD an ihre geologischen Grenzen stiess. Diese Änderung drückt sich markant aus im Quotienten des mittleren Zuwachses der Querschnittsfläche zum Zuwachs der Oberfläche. Der Quotient bewegt sich von 8000 BC bis ungefähr 0 AD zwischen $0.005\text{--}0.02\text{ m}^2/\text{m}^2$ und steigt danach steil auf $0.1\text{--}0.3\text{ m}^2/\text{m}^2$ an (weitere Daten in Anhang F).

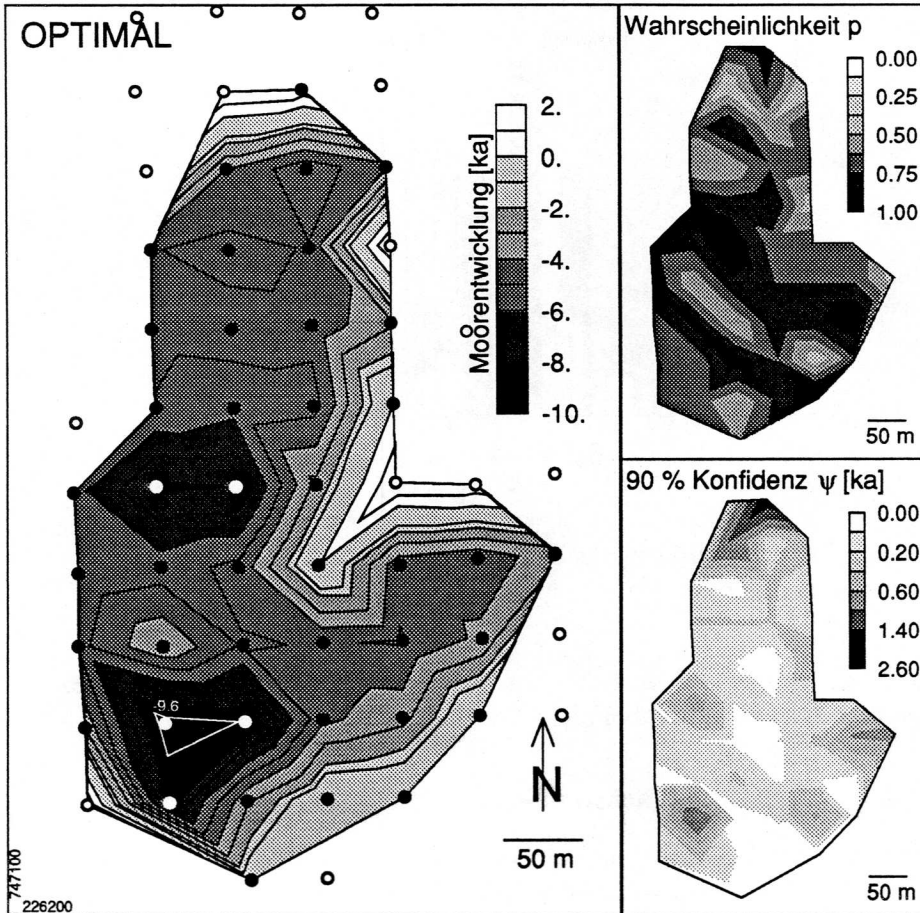


Abbildung 4.13 Die Ausbreitung des Moores in der Ebene. Der älteste datierte Punkt (9.6 ka BC) ist in der grossen Karte eingetragen. Dargestellt die optimale Lösung der pollenanalytischen Datierung. Die Datierung erfolgte in den schwarzen, beziehungsweise weissen Punkten. In den schwarz umrandeten Punkten konnten keine Pollenproben entnommen werden. Die kleinen Abbildungen stellen die Wahrscheinlichkeit p und das 90% Vertrauensintervall Ψ dar, welche die Unsicherheit der Datierung beschreiben.

Anhand der Vertrauensintervalle der datierten Punkte kann belegt werden, dass die Ausbreitungsgeschichte auf wenige hundert Jahre genau rekonstruiert werden kann, einzig in der nordöstlichsten Ecke ist die Datierung unsicher (Ψ grösser ± 1.4 ka, Abb. 4.13).

Zusammenfassend erkennt man ein gewisses Muster der Moorausbreitung. Die Ausbreitung begann an den tiefsten Punkten des Gebietes und die Aus-

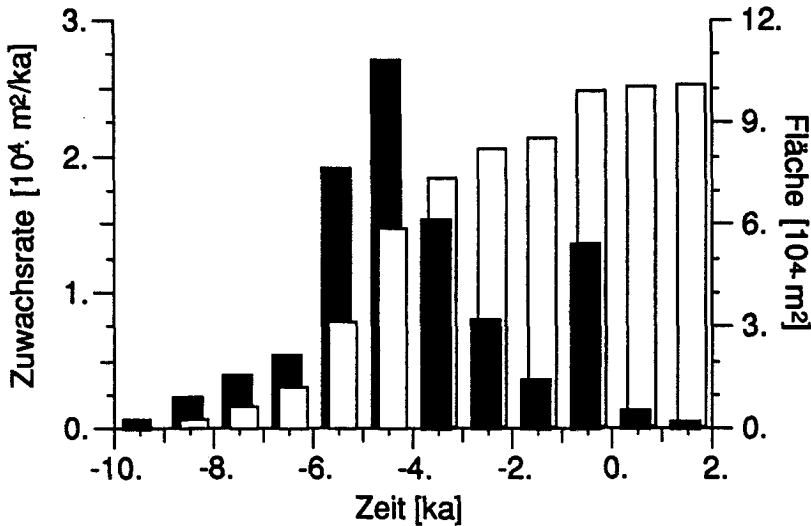


Abbildung 4.14 Flächen-Zuwachsrate (schwarze Balken) und Fläche (weiss) des Turbenriets in der Ebene.

breitungsrichtung war hangaufwärts. Das Zentrum als nässeste Stelle des Moores verschob sich dabei gleichfalls hangaufwärts.

4.5.2. Vertikales Wachstum in den Transsekten

Aus den Transsekten (Abb. 4.15 und 4.16) geht deutlich hervor, dass die Versumpfung in konkaven Geländeteilen begann. Werden die wegen der starken Sackung infolge Drainage und Torfabbau komprimierten Profile auf die ursprüngliche Höhe zurückgerechnet, kommt man zum Ergebnis, dass die moormächtigen Stellen leicht gewölbt (konvex) sind (Details der Berechnung der ursprünglichen Oberfläche in Schneebeil, 1988). Damit bestätigt sich die aus der Torfstratigraphie gewonnene Erkenntnis, dass es sich um ein Hangmoor mit stark ombrogenem Einfluss handelt. Die spät vermoorten Stellen auf den Moränenrücken zeichneten sich vor der Entwässerung noch deutlicher als heute von den mächtigen, alten Stellen ab. Die drei Becken waren an ihrer stark ombrogenen Vegetation im Zentrum deutlich erkennbar.

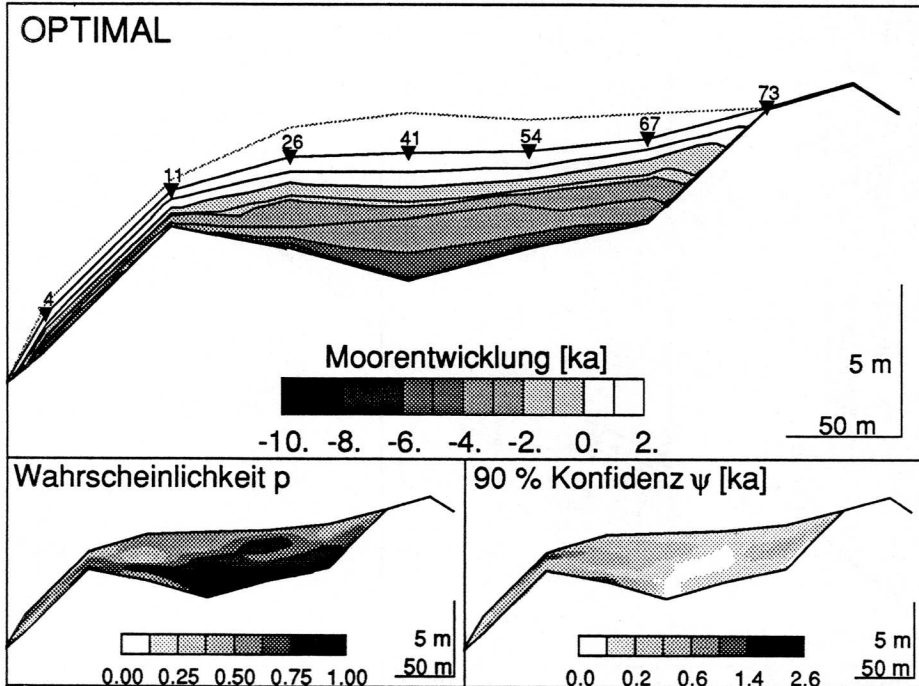


Abbildung 4.15 Die Entwicklung des Turbenriets im Querschnitt von Transsekt 4–73 (West–Ost). Die vermutete Oberfläche vor der Abtorfung ist mit einer punktierten Linie eingezeichnet. Die Dreiecke mit Nummern bezeichnen die Bohrpunkte.

Auffällig sind die sehr dünnen Bänder des Zuwachses zwischen 2000–1000 BC. Ihre Dicke ist beinahe konstant und sie lassen sich über beide Transsekte verfolgen. Zu dieser Zeit müssen entweder sehr ungünstige Klimabedingungen für die Pflanzenproduktion, gute Bedingungen für die Mineralisierung des Torfes oder eine grossflächige Erosion stattgefunden haben. Werden die datierten Schichten zusammen mit den stratigraphischen Daten (Abb. C.4 und C.14) verglichen, fällt auf, dass das Ende der Braunmooschichten etwa mit dieser Periode sehr geringen Wachstums zusammenfällt. Zu diesem Zeitpunkt beginnen in Punkt 25 oligotrophere Pflanzenarten Torf zu bilden.

Werden die korrigierten Zuwachsraten der zwei unteren Becken mit jenen der obersten Vermoorung verglichen, ist sie dort nach 0 AD viel kleiner (Abb. 4.16), vermutlich wegen des Bachlaufs, der die Westseite erodierte.

Die Zuwachsrate weist bis um 0 AD einen ähnlichen Verlauf wie jene der horizontalen Ausbreitung auf, erholt sich aber vollständig nach dem Einbruch von 1500 BC (Abb. 4.17). Der kumulative Zuwachs ist nahezu linear, der Einbruch von 1500 BC widerspiegelt sich nur schwach (Abb. 4.18).

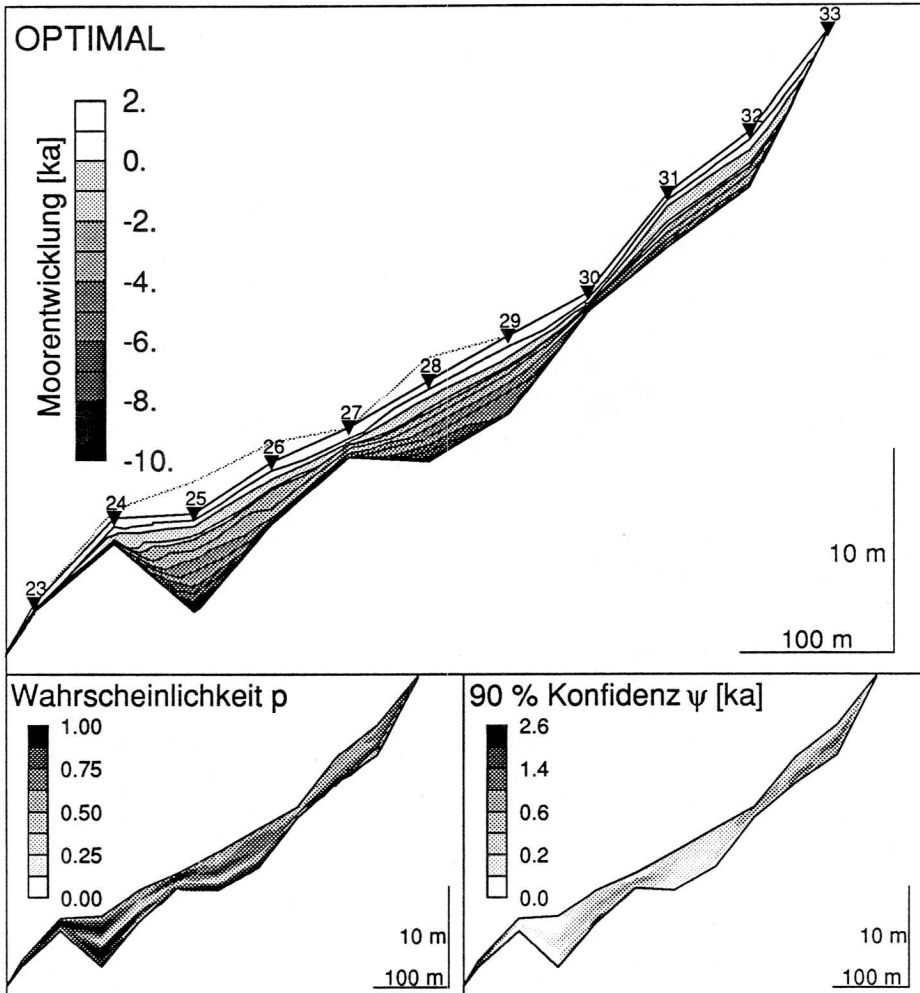


Abbildung 4.16 Die Entwicklung des Turbenriets im Querschnitt von Transekt 23–33 (Süd–Nord). Die vermutete Oberfläche vor der Abtorfung ist mit einer punktierten Linie eingezeichnet. Die Dreiecke mit Nummern bezeichnen die Bohrpunkte.

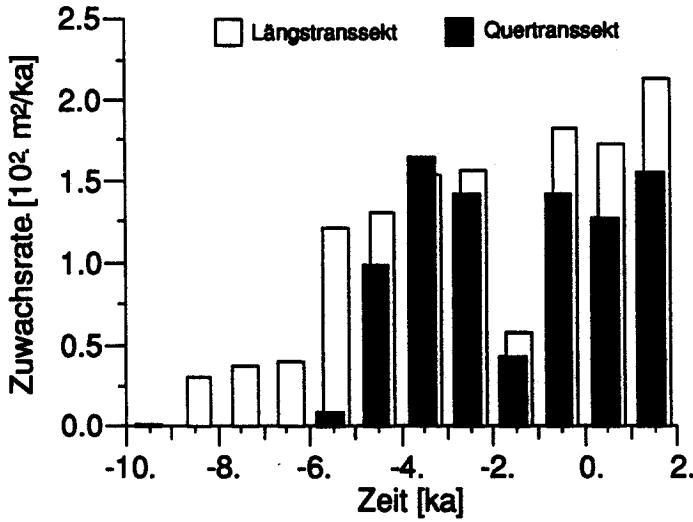


Abbildung 4.17 Zuwachsraten im Quertranssekt 4–73 und im Längstranssekt 23–33.

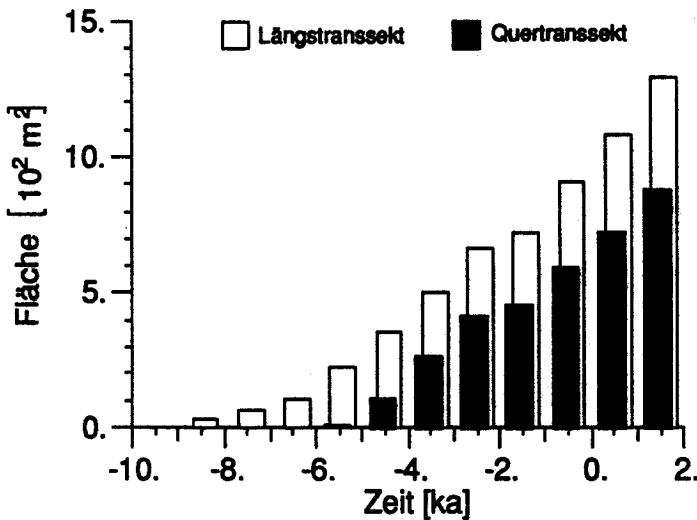


Abbildung 4.18 Querschnittsfläche (kumulativer Zuwachs) im Quertranssekt 4–73 und im Längstranssekt 23–33.

Abbildung 4.19 stellt das Wachstum der Transsekte im Vergleich zum Standardprofil 25 dar. Die Linien verlaufen etwa parallel zu jenen des Standardprofils, das Höhenwachstum in den Punkten 41, 54, 26 und 67 war dabei etwas grösser als im Punkt 25, in den Punkten 30, 27 und 4 deutlich kleiner. Die Punkte 41, 54 und 67 befinden sich im Zentrum des um 5000 BC vermoorten untersten Beckens. Die Punkte 30, 27 und 4 liegen an den geologischen Wachstumsgrenzen des Moores. Es wird deutlich, dass die Torfbildung in den beiden zentralen, etwa gleichzeitig vermoorten Punkten 25 und 28 parallel läuft. Punkt 41 im Becken ③ wächst anfänglich sehr rasch. Mit der Zeit nähert es sich jenem von Punkt 25.

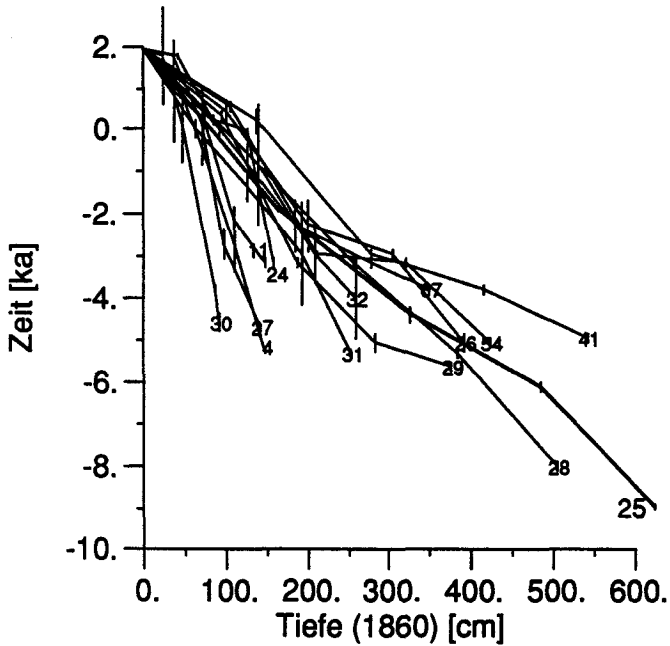


Abbildung 4.19 Torfwachstum in den Bohrungen der Transsekte. An den datierten Stellen ist das 90 % Vertrauensintervall Ψ angegeben. Es treten deutlich jene Profile hervor, welche schneller (41) bzw. langsamer (30) als das Standardprofil 25 wachsen.

Die Langsamkeit des Zuwachses (der reziproke Wert der Geschwindigkeit) zwischen den Transsektproben weist naturgemäss eine grosse Variabilität auf (Abb. 4.20). Die mit dem gewichteten gleitenden 5-Punkt-Mittel gefilterten Daten zeigen jedoch zwei markante Spitzen auf: Die erste zwischen 5000 bis 3000 BC, die zweite um 1500 BC. Eine konsistente Erklärung für diese Spitzen konnte nicht gefunden werden. Wird als Grundgesamtheit die beobachtete Zeitspanne betrachtet, ist die Verteilungsfunktion der Langsamkeit unge-

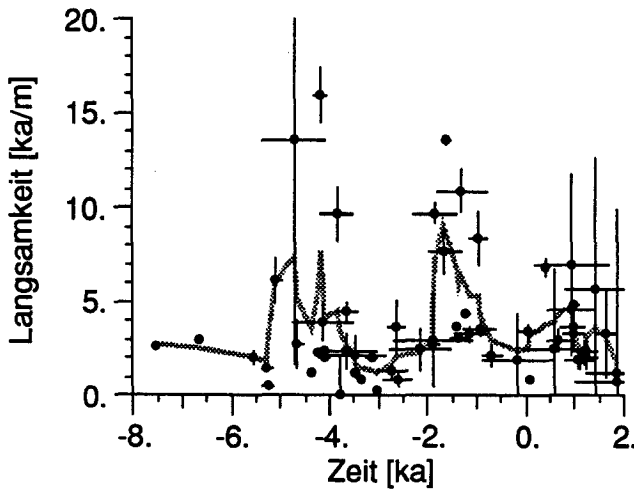


Abbildung 4.20 Langsamkeit des Zuwachses zwischen den Proben der Transsekte. Die Fehlerbalken wurden aus den 90 % Konfidenzbereichen der optimalen Datierung berechnet. Die grau gepunktete Linie ist das gewichtete, gleitende Mittel über 5 Punkte.

fähr lognormal. Es treten allerdings mehr extrem hohe Werte auf, als bei einer lognormalen Verteilung erwartet werden. Dies wurde mit dem Chi-Quadrat-Test (Brandt, 1976) geprüft. Die mittlere Langsamkeit beträgt 3.8 ka/m, der Median der Langsamkeit 2.7 ka/m, die Standardabweichung 3.4 ka/m. Die vertikale Langsamkeit, beziehungsweise die Zuwachsrate, weist keinen langfristigen Trend auf, sondern bleibt stationär. Die Zuwachsrate scheint an den Rändern etwas geringer, ein räumlicher Trend (Abb. 4.19) ist vorhanden.

4.5.3. Volumetrische Sedimentation

Die volumetrische Sedimentationsrate S_i wurde aus den gemittelten Zuwachsflächen der Transsekte $At1_i$ und $At2_i$ und den Zuwachsflächen der Ebene Ae_i errechnet, i ist der Index für die Interpolation über ein Jahrtausend

$$S_i = \frac{At1_i + At2_i}{2} Ae_i \quad (4.15).$$

Die Sedimentationsrate nimmt mit Ausnahme des Ereignisses um 1500 BC recht konstant zu (Abb. 4.21). Die maximale Sedimentationsrate beträgt $4.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{ka}$, das gesamte Torfvolumen heute rund $20 \times 10^4 \text{ m}^3$. Das mit diesem Verfahren berechnete Torfvolumen überschätzt das aufgrund der Bohrungen bestimmte Volumen von $18.2 \times 10^4 \text{ m}^3$ um 10%.

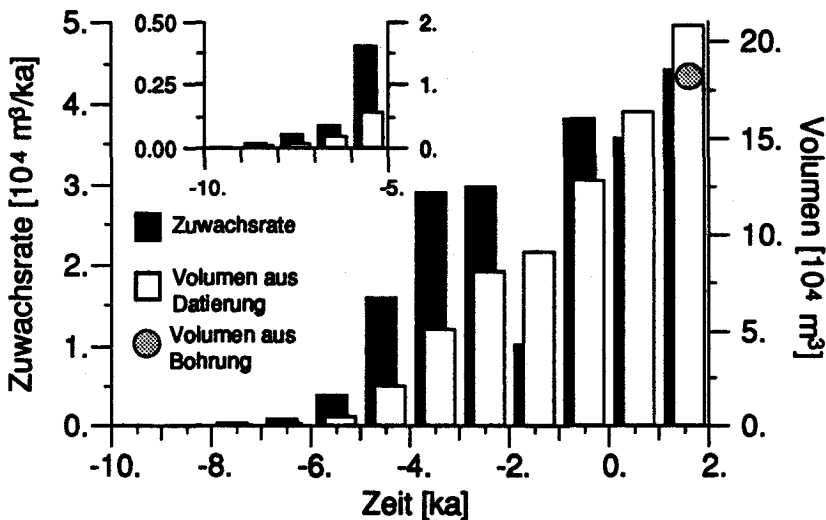


Abbildung 4.21 Volumetrische Zuwachsrate und Volumen. In der kleinen Abbildung sind in einem grösseren Masstab die Zuwachsrate und das Volumen zwischen 10000 BC bis 5000 BC dargestellt. Das totale Torfvolumen aufgrund der Bohrungen ist mit einem Punkt eingezeichnet.

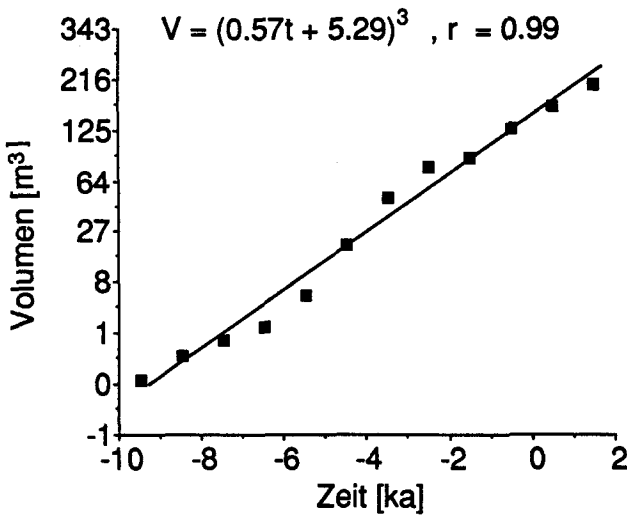


Abbildung 4.22 Lineare Regression der Kubikwurzel des Torfvolumens gegen die Zeit.

Die kubische Wurzel der volumetrischen Sedimentation korreliert erstaunlich gut mit dem Alter als unabhängiger Variable (Abb. 4.22). Das Torfvolumen V lässt sich damit als eine einfache kubische Funktion in Abhängigkeit des Alters t und einer Konstante b darstellen

$$V = (at + b)^3, \quad -10 \leq t \leq 2 \quad (4.16)$$

Die Steigung a ist 0.57 m/ka, die Konstante b 5.3 m, der Korrelationskoeffizient r 0.99. Die in den vorangehenden Abbildungen über den vertikalen Zuwachs gefundenen linearen Abhängigkeiten bestätigen sich.

4.5.4. Vergleich mit anderen Mooren

Ob dieses mit einfachen linearen und kubischen Funktionen beschreibbare Wachstum auch in anderen Mooren auftritt, ist bisher nicht untersucht worden. Dem Turbenriet direkt vergleichbare untersuchte Beispiele fehlen. Für das von Foster et al. (1988) beschriebene Hammarmosse in Schweden lassen sich die Beziehung zwischen Torfmächtigkeit und Alter der Basisproben (Abb. 4.23), zwischen «Durchmesser» des Moores und Zeit (Abb. 4.25) und die über die Torftiefe gemittelte vertikale Langsamkeit (Abb. 4.24), die horizontale Langsamkeit (Abb. 4.26) und Ausbreitungsraten in der Ebene (Abb. 4.27) berechnen. Die Daten für diese Berechnungen sind in Anhang G aufgeführt¹¹.

¹¹Die Daten werden aufgeführt, da alle ¹⁴C-Alter (Zeitangabe in Jahre BP) in kalibrierte ¹⁴C-Alter (Zeitangabe in Jahre BC/AD) umgerechnet werden mussten. Wird diese Transformation nicht durchgeführt, ist der Zeitmassstab bei älteren Daten als 0 AD systematisch verkürzt, das heisst die Proben erscheinen zu jung.

Hammarosse ist ein konzentrisches, ovales Hochmoor auf einer mit 0.11–0.2% geneigten, glazial geformten Ebene, etwa 2.5 km lang und etwa 1 km breit. Die Ränder des Moores sind deutlich steiler als die zentralen Teile und baumlos, an der Längsseite beträgt die Neigung etwa 3%. Die Torfmächtigkeit erreicht maximal etwa 4 m. Die horizontale Ausbreitung wurde bis heute nicht massiv durch geomorphologische Grenzen behindert.

Die Beziehung zwischen Torfmächtigkeit und Alter der Basisproben (Abb. 4.23) zeigt, dass die Torfmächtigkeit etwa proportional dem Alter der Basis¹² ist. Die Abbildung 4.23 stellt für Hammarosse die analogen Daten dar wie Abb. 4.19 für das Turbenriet. Der mittlere vertikale Zuwachs ist im Turbenriet wie im Hammarosse nahezu gleich. Im Turbenriet wachsen die ausserhalb des Zentrums gelegenen Punkte etwa gleich schnell oder langsamer als das Zentrum, während im Hammarosse die ausserhalb des Zentrums gelegenen Punkte schneller wachsen. Dies lässt sich auch aus dem Vergleich der vertikalen Langsamkeit, Abb. 4.20 für das Turbenriet, Abb. 4.25 für das Hammarosse, erkennen. Während die Langsamkeit im Turbenriet etwa gleichbleibt, nimmt sie im Hammarosse systematisch ab,¹³ was auf zwei Arten interpretiert werden kann. Einerseits könnte die Torfbildung p_k an den jüngeren Stellen grösser als an den älteren Stellen, andererseits könnte die Zersetzung α_k im Katotelm bedeutend sein, das heisst grösser als 10^{-5} a^{-1} , und die gesamte Torfmächtigkeit deshalb an den alten Stellen abnehmen. Qualitativ stimmt die zuletzt erwähnte Möglichkeit mit den Berechnungen von Clymo (1984, p. 644–646) überein. Welche der aufgeführten Möglichkeiten zutrifft, könnte entschieden werden, wenn das älteste Profil in verschiedenen Tiefen datiert wäre.

¹²Die stratigraphische Lage der Basisprobe ist in Foster et al. (1988) nicht näher beschrieben.

¹³Die geringere Variabilität im Hammarosse ist dadurch bedingt, dass nur Basis- und keine Transsektproben für die Berechnung zur Verfügung standen. Da das Wachstum aber etwa linear ist, weisen die Werte nicht einen systematischen Fehler auf.

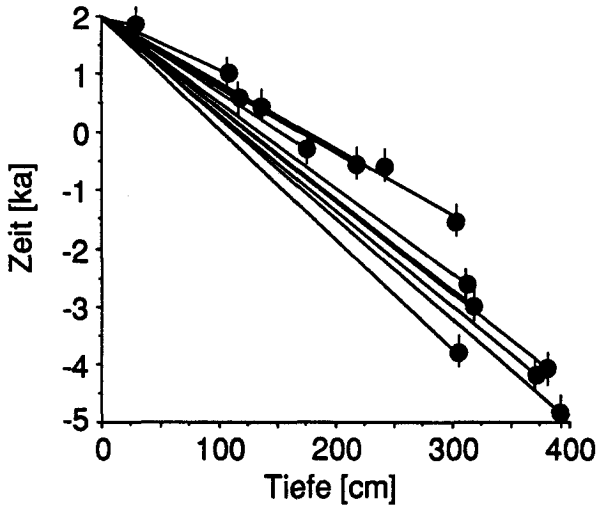
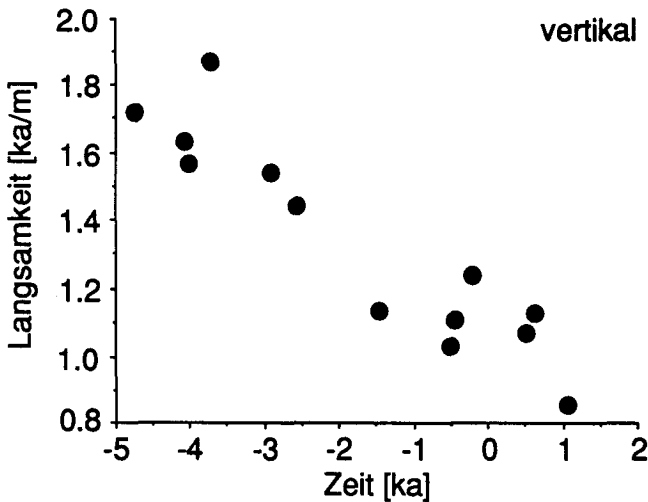
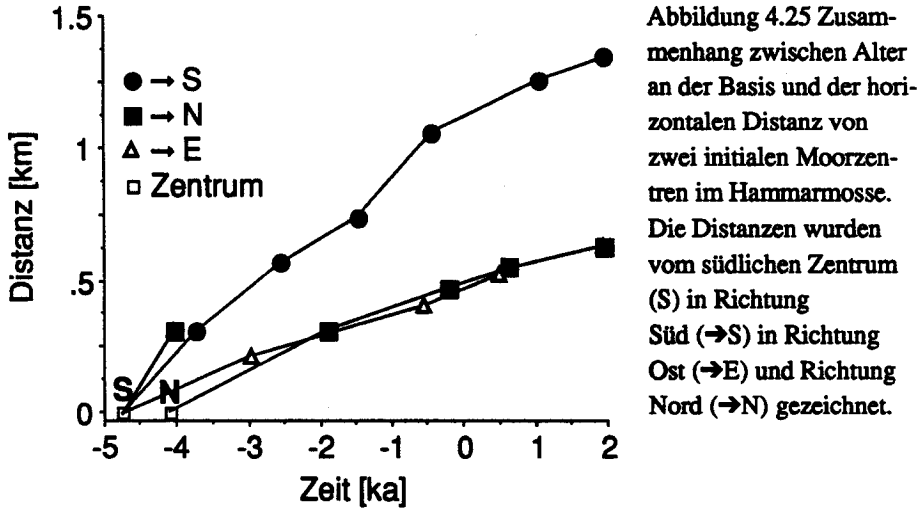


Abbildung 4.23 Zusammenhang zwischen Torfmächtigkeit (Tiefe) und deren Alter an der Basis, dem Übergang zwischen Mineralboden und Torf im Hammarmosse. Die Striche geben die geschätzte Standardabweichung σ von ± 0.25 ka der kalibrierten ^{14}C -Alter an.

Die horizontale Ausdehnung (Abb. 4.25) ist etwa linear. Die Ausbreitung nach Süden ist schneller als nach Norden. Am langsamsten breitete sich das Moor nach Osten und Westen aus. Die horizontale Langsamkeit (Abb. 4.26) nimmt mit der Zeit systematisch zu, das Moor dehnt sich je älter desto langsamer aus. Eine Regression zwischen Zeit und Langsamkeit (mit dem kleinen Korrelationskoeffizienten $r = 0.5$) zeigt, dass der konstante Term etwa viermal grösser ist als die Steigung. Die Verzögerung ist deshalb gering, und die Ausbreitung ist vom konstanten Term dominiert, das heisst die Geschwindigkeit der Moorausbreitung erscheint praktisch konstant. Der aus der Integration der Geschwindigkeit hervorgehende parabolische Trend zur Abnahme

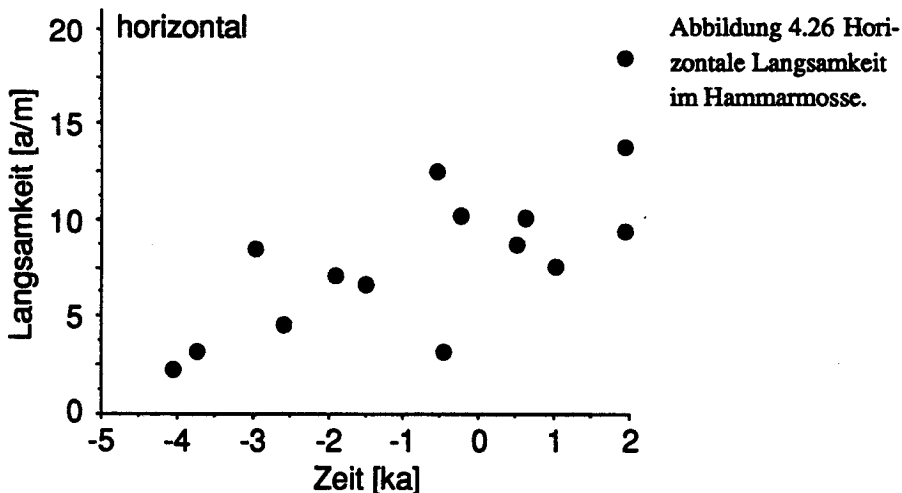


vertikal Abbildung 4.24 Über die Torfmächtigkeit gemittelte vertikale Langsamkeit im Hammarmosse.



der Ausbreitung ist deshalb in Abb. 4.25 nicht erkennbar. Wie schon beim vertikalen Wachstum stimmt auch dieses Verhalten mit den Berechnungen von Clymo (1984, Abb. 20) überein.

Die Zuwachsraten der Moorfläche (Versumpfungsraten) (Abb. 4.27) zeigen ein ähnliches, wenn auch viel gleichmässigeres Bild, als das Turbenriet (Abb. 4.14) vor dem Erreichen der Wachstumsgrenzen um 2000 BC. Die Zuwachsrate der Fläche nimmt bis 1000 AD ständig etwa linear zu und bleibt auf dem hohen Niveau stehen. Die gesamte Moorfläche nimmt linear zu. Die Zuwachsrate der versumpften Fläche ist etwa hundertmal grösser als im Turbenriet. Die Versumpfungsrates ist im Gegensatz zur vertikalen Wachstumsrate stark von der Neigung des Geländes abhängig. Die Neigung des Turbenriets



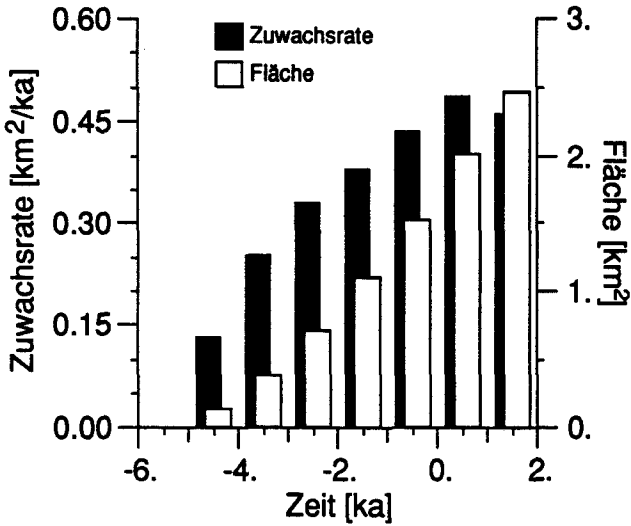


Abbildung 4.26 Ausbreitungsrate und Fläche im Hammarosse in der Ebene.

beträgt etwa 2–10%, die des Hammarosse 0.1–0.2%. Das Neigungsverhältnis dieser beiden Moore ist also in der gleichen Größenordnung wie das Versumpfungsverhältnis. Das in Kapitel 3 dargestellte hydrologische Modell erklärt diese Situation. Die Ablagerung organischen Materials im Zentrum führt zur Vernässung der Ränder der Ablagerung, und diese Vernässung ist umso ausgedehnter, je flacher das Gelände ist.

5. SIMULATION UND VERIFIKATION DER MODELLE

In Kapitel 3 wurden Modelle der Moorbildung vorgestellt. In Kapitel 4 wurde für zwei Moore die Entwicklungsgeschichte möglichst detailliert nachvollzogen. Lassen sich nun die Modelle mit den Beobachtungen in Einklang bringen? In Kapitel 5.1 wird die Hypothese, dass die Oberfläche des Moores dem Gleichgewichts-Wasserspiegel entspricht, getestet, die Auswirkungen unterschiedlicher Verteilungen von Leitfähigkeit und Speicherkoeffizient auf die Wasserspiegelschwankungen simuliert und die Veränderung der hydrologischen Verhältnisse des Moores nach einer Entwässerung modelliert. In Kapitel 5.2 werden die Wachstumsmodelle mit den experimentellen Daten im Turbenriet verglichen.

5.1. HYDROLOGISCHE MODELLE

5.1.1. Gleichgewichts - Modell

Verifikation an gemittelten Oberflächen

In Kapitel 3.3.2 wird die Hypothese aufgestellt, dass die Form der Moorbefläche einer Grundwasseraufwölbung entspricht. Die Hypothese kann belegt werden, indem die Oberfläche eines einzelnen Moores (Ingram, 1982) oder gemittelter Oberflächen¹ zahlreicher Moore mit dem simulierten Wasserspiegel verglichen werden (Schneebeli, 1989). Die Auswertung von Schneebeli (1989) wird im folgenden ausführlicher interpretiert. Die hydraulische Leitfähigkeit K wird aus den gegebenen Randbedingungen für ein kreisförmiges Moor mit der nach K aufgelösten Gleichung (3.18) bestimmt. Mit der nach h aufgelösten Gleichung (3.18) wird der Wasserspiegel h zwischen $x = 0$ und $x = L$ und daraus die Abweichung zwischen Oberfläche und Wasserspiegel berechnet (Tab. 5.1 und 5.2). Das Resultat ist zufriedenstellend, denn die maximale Abweichung der piezometrischen Höhe vom Modell beträgt 10%. Auffällig ist die systematische Abweichung des Wasserspiegels von der Oberflächenform im Falle der nordwestdeutschen

¹Die Mittelung der Oberflächen ist unter der Annahme erlaubt, dass sich Moore weitgehend wie ein lineares System verhalten.

Moore. Der berechnete Wasserspiegel liegt mit dem homogenen Modell zwischen den fixierten Potentialen systematisch zu tief, im Maximum 0.4 m. Dieses Verhalten kann erklärt werden, wenn angenommen wird, dass das Moor am Rand weniger durchlässig ist als im Zentrum. Die Abweichungen bei den bayrischen Mooren sind nicht eindeutig und im Bereich der Messfehler. Auffällig ist die fünfmal kleinere hydraulische Leitfähigkeit der bayrischen Moore. Dieser Tatsache wird im folgenden Kapitel nachgegangen.

Abstand x [m]	Oberfläche z [m]	Wasserspiegel h [m]	Differenz z-h [m]
0	5.0	5.0	0.0
1000	4.8	4.7	+0.1
1500	4.6	4.3	+0.3
2000	4.1	3.7	+0.4
2500	3.1	2.8	+0.3
2750	2.2	2.0	+0.2
3000	0.0	0.0	0.0

Tabelle 5.1 Vergleich des berechneten Wasserspiegels mit den Mittelwerten der Oberflächen für nordwestdeutsche Moore. Daten aus Eggelsmann (1967). Gegeben ist der Radius L des mittleren Moores mit 3000 m; Anreicherungsrate U mit 250 mm/a (entspricht 0.68 mm/d). Die berechnete Leitfähigkeit (nach Gleichung (3.17)) K beträgt 2.85×10^{-3} m/s, was 245 m/d entspricht.

Abstand x [m]	Oberfläche z [m]	Wasserspiegel h [m]	Differenz z-h [m]
0	3.3	3.3	0.0
125	3.2	3.2	0.0
250	2.8	2.9	-0.1
375	2.0	2.2	-0.2
500	0.0	0.0	0.0

Tabelle 5.2 Vergleich des berechneten Wasserspiegels mit den Mittelwerten der Oberflächen für bayrische Moore. Daten aus Eggelsmann und Schuch (1980). Gegeben ist der Radius L des mittleren Moores mit 500 m; Anreicherungsrate U mit 800 mm/a (entspricht 2.19 mm/d). Die berechnete Leitfähigkeit K (nach Gleichung (3.17)) beträgt 5.82×10^{-4} m/s, was 50 m/d entspricht.

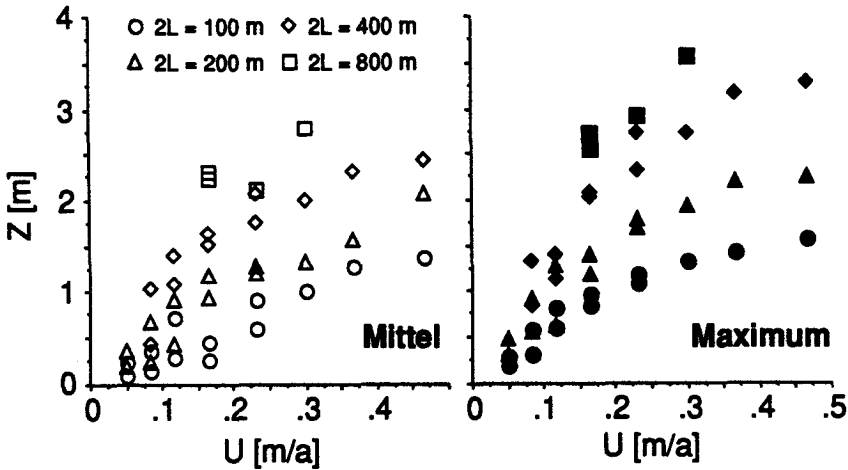


Abbildung 5.1 Zusammenhang zwischen Nachlieferung U , Mächtigkeit Z und Länge L des Moores. «Mittel» bezeichnet den Mittelwert der Daten von Granlund (1932), «Maximum» die Maximalwerte. Die Signaturen der linken Seite gelten analog für die rechte Seite. Diese Darstellung gibt die Ausgangsdaten für die Berechnungen wieder.

Leitfähigkeit als Systemparameter

Die hydraulische Leitfähigkeit ist ein wesentlicher Parameter der Moore. Ihre Veränderung drückt sich im Zersetzungsgrad des Torfes aus. In einem realen Moor ist sie nicht konstant, sondern variiert. Die unterschiedliche Zersetzung kann durch den Niederschlag, die Ausdehnung des Moores oder die Torfmächtigkeit verursacht sein². Die Leitfähigkeit wird aus der Moormächtigkeit Z , der Länge (oder dem Radius) L und der Nachlieferung U berechnet (Abb. 3.8). Werden diese Faktoren in genügend vielen Mooren gemessen, lassen sich die hauptsächlichen Ursachen für die unterschiedliche Zersetzung des Torfes herauskristallisieren. Ein solcher Datensatz stellt das von Granlund (1932) aufgenommene grossflächige Inventar in Südschweden dar. Er mass die Distanz von Moorzentrum zu Moorrand L und die Moormächtigkeit Z in Gebieten mit unterschiedlichem Niederschlag N . Die Länge und die Moormächtigkeit wurden auf einem Transsekt gemessen, welches etwa durch das Moorzentrum führt. Im folgenden wird die Moormächtigkeit Z als identisch mit dem maximalen Wasserspiegel h_{max} betrachtet. Die Nachlieferung U wurde von Granlund nicht bestimmt. Die Evapotranspiration E wird mit

²Für das Turbenriet zeigte Schneebeli (1988, p. 202 f), dass die Leitfähigkeit sich mit grosser Wahrscheinlichkeit während der Entwicklung veränderte.

der Formel $E = 2/3 N - 0.25$ (alle Masse in Meter)³ (Dracos, 1980, p. 56) geschätzt. Die Nachlieferung U ist dann, unter Vernachlässigung des Oberflächenabflusses, $N - E$. Da in Granlund (1932) nicht angegeben ist, ob das Transsekt in einem Gebiet mit konzentrischen oder parallelen Potentiallinien liegt, muss die Leitfähigkeit für beide Modelle, Gleichungen (3.17) und (3.18), berechnet werden. Aus den Gleichungen (3.17) und (3.18) lässt mit der gegebenen Länge L , der gegebenen Nachlieferung U und der Höhe $Z \equiv h_{max}$ die durchschnittliche Leitfähigkeit K berechnen.

In Abbildung 5.1 sind die Ausgangsdaten dargestellt. Es fällt auf, dass die Mächtigkeit mit zunehmender Nachlieferung und zunehmender Länge grösser wird. Granlund und Wickman schlossen daraus, dass die Mächtigkeit der Moore durch den Niederschlag begrenzt wird.

Bei zunehmender Länge L nimmt die Variabilität der berechneten Leitfähigkeit K ab (Abb. 5.2). Die Leitfähigkeit ist grösser bei niedrigen Niederschlägen⁴ und kleiner bei hohen Niederschlägen, wie dies auch im Vergleich mit den bayrischen und nordwestdeutschen Mooren festzustellen ist (Abb. 5.2). Das Phänomen könnte dadurch erklärt werden, dass die Schwankungen des Wasserspiegels bei höherer Nachlieferung grösser sind, der Torf deshalb stärker belüftet wird und sich mehr zersetzt. Es fehlen jedoch die Daten, um dies zu testen.

Die Annahme von Granlund und Wickman, dass die Mächtigkeit des Moores abhängig vom Niederschlag ist, ist aufgrund der Leitfähigkeiten wenig wahrscheinlich, da ja die in Gebieten mit geringer Nachlieferung liegenden Moore die minimale Durchlässigkeit nicht erreicht haben.

Der Zusammenhang zwischen Höhe Z und hydraulischer Leitfähigkeit K zeigt (Abb. 5.3), dass die geringste hydraulische Leitfähigkeit bei etwa einem Meter Mächtigkeit liegt, darunter und darüber steigt sie wieder an. Die höheren hydraulischen Leitfähigkeiten bei geringerer Torftiefe deuten darauf hin, dass dort soligenes Grundwasser und kapillarer Aufstieg wirksam sind. Das Auftreten natürlicher Entwässerungsgräben würde die grössere Leitfähigkeit mit zunehmender Mächtigkeit und Länge erklären. Der Torfkörper kann in diesem Fall physikalisch nicht mehr als homogenes poröses Medium behandelt werden, sondern als poröses Medium mit zwei deutlich verschiedenen Leitfähigkeiten.

³Ingram (1983, p. 148) nimmt an, dass die Verdunstung konstant 480 mm/a beträgt. Es ist für die weiteren Betrachtungen unwesentlich, welcher Wert genommen wird

⁴Da es üblich ist, nach dem Niederschlag N zu stratifizieren, wird es hier so gemacht. Die Nachlieferung U ist das physikalisch wirksame Mass. N und U sind zueinander linear.

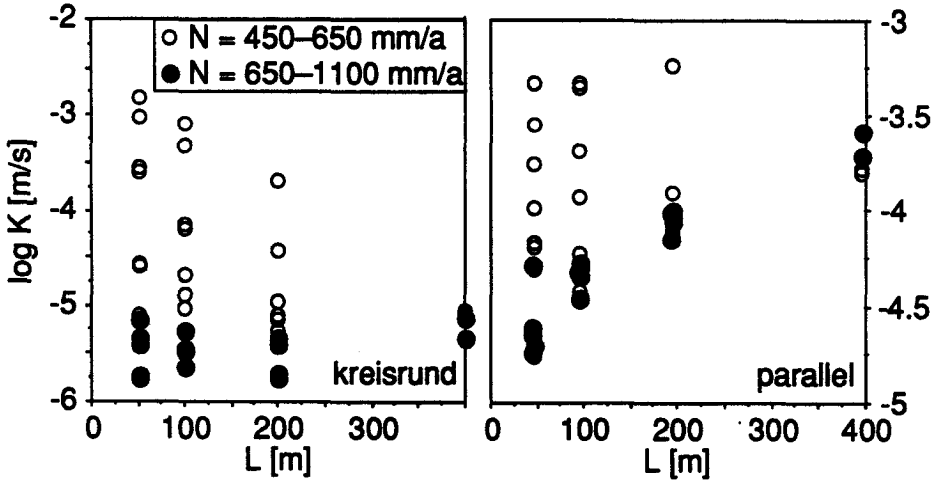


Abbildung 5.2 Zusammenhang zwischen gegebener Länge L und dem Logarithmus der berechneten hydraulischen Leitfähigkeit K bei unterschiedlichem Niederschlag N . (Daten aus Granlund, 1932). Links der Zusammenhang für das kreisrunde Modell (Gleichung 3.18), rechts für das parallele Modell (Gleichung 3.17).

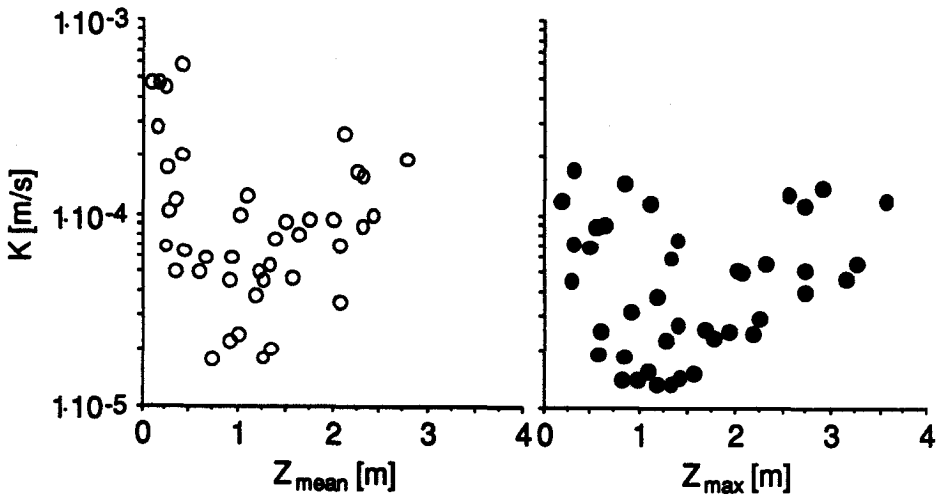


Abbildung 5.3 Zusammenhang zwischen gegebener Mächtigkeit Z_{mean} und Z_{max} und berechneter hydraulischer Leitfähigkeit K (Daten aus Granlund, 1932).

5.1.2. Amplitude des Wasserspiegels bei variabler Leitfähigkeit und variablem Speicherkoeffizienten

Idee

Die Leitfähigkeit K ist im Modell der Gleichungen (3.17) und (3.18) räumlich konstant. Der Speicherkoeffizient S wird nicht benutzt, da Gleichgewichtszustände berechnet werden. Der reale Torfkörper ist jedoch heterogen und wechselnde Nachlieferung verursacht instationären Wasserfluss. Um die Auswirkungen dieser Faktoren auf den Wasserspiegel zu simulieren, wird in einem eindimensionalen Modell mit der Boussinesq-Gleichung (3.21) der instationäre Wasserspiegel bei räumlich variabler Leitfähigkeit K_x und variablem Speicherkoeffizient S_x modelliert. Aus den Simulationen lässt sich ein Amplitudendiagramm berechnen, welches die Variabilität des Wasserspiegels in Abhängigkeit von der Leitfähigkeit und des Speicherkoeffizienten darstellt (Abb. 5.17). Die Leitfähigkeit und der Speicherkoeffizient des Torfes sind in intakten Mooren eng mit der darauf wachsenden Pflanzenformation korreliert. Leitfähigkeiten und Speicherkoeffizienten in verschiedenen Pflanzenformationen finden sich in Ivanov (1981, Appendix 1 bzw. p. 71). Der Quotient der Leitfähigkeit bzw. der Quotient des Speicherkoeffizienten aus zwei Pflanzenformationen charakterisiert hydrologisch die Abfolge zweier Formationen. Wird die Amplitude für verschiedene Quotienten berechnet, wird der Zusammenhang zwischen der Anordnung der Pflanzenformationen und den Wasserspiegelschwankungen deutlich.

Modell, Anfangs- und Randbedingungen

Das Programm zur Berechnung basiert auf einer Finiten-Differenzen Lösung. Die Lösungsmethode ist in Kapitel 3.2.5, Gleichungen (3.20 ff) beschrieben. Das Programm «FD1dis» ist in Anhang H.1, zusammen mit den Inputfiles, beschrieben. Die Basis für die Simulation bildet ein poröses Medium mit der Länge L von 200 m in positiver x -Richtung und unendlicher Ausdehnung in y -Richtung. Die linke Randbedingung ($x = 0$) ist eine undurchlässige Grenze oder Wasserscheide, die rechte Randbedingung ($x = 200$) ein konstantes Potential. Die linke Randbedingung an der Stelle $x = 0$ entspricht in einem echten Moor dem Zentrum. Die Leitfähigkeit K beträgt im homogenen Fall 10 m/d, der Speicherkoeffizient S ist 0.4 (Abb. 5.4).

Für die instationäre Nachlieferung $U(t)$ wurde der Datensatz aus Schmeidl et al. (1970) benutzt. Schmeidl et al. massen in einem ungestörten Hochmoor während 10 Jahren Niederschlag N , Verdunstung E und Abfluss G . Der Einfluss des Schnees und der Schneeschmelze auf die Nachlieferung wurden nicht gemessen. Die Nachlieferung U ist deshalb $N - E$. Die statistische Aus-

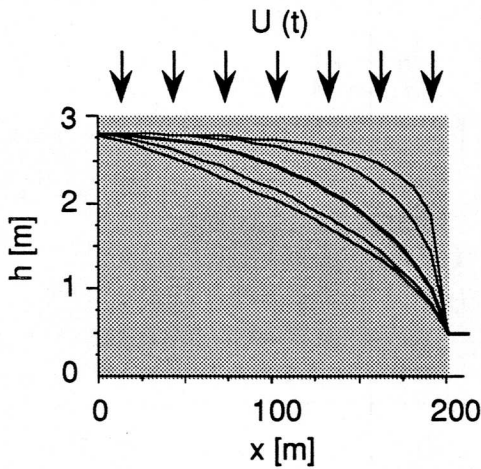


Abbildung 5.4 Stationäre Wasserspiegel für verschiedene Quotienten der hydraulischen Leitfähigkeit. Nachlieferung $U = 1.92$ mm/d. Mittlere dicke Linie: stationärer Wasserspiegel in einem homogenen porösen Medium mit der Leitfähigkeit $K = 10$ m/d. Oberste Linie: Quotient $K_{(x=0)}/K_{(x=200)} = 100$. Unterste Linie: $K_0/K_{200} = 0.01$. Dazwischen: $K_0/K_{200} = 50$, beziehungsweise 0.02 (siehe Abb. 5.6). Die Wasserscheide befindet sich bei $x = 0$.

wertung der Nachlieferung U ist in Tabelle 5.3 dargestellt, der Verlauf in Abb. 5.5.

n	μ_U mm/d	σ_U mm/d	Minimum $_U$ mm/d	Maximum $_U$ mm/d
120	1.92	1.90	-2.51	9.70

Tabelle 5.3 Statistische Masse der monatlichen Nachlieferung $U = N - E$. Die Anzahl Werte beträgt n , der Mittelwert μ_U , die Standardabweichung σ_U .

Die Nachlieferung U ist ein stochastischer Prozess, welcher durch den Niederschlag N und die Verdunstung E gegeben ist. Da der Niederschlag N und die Verdunstung E nur sehr wenig miteinander korreliert sind, müssen N und E (beziehungsweise die Klimadaten, um E zu berechnen), als gemessene Zeitreihe vorliegen.

Die Leitfähigkeit wird so variiert, dass verschiedene gleichmässig ändernde Quotienten entstehen und der maximale stationäre Wasserspiegel immer dem maximalen Wasserspiegel bei homogener Verteilung der Leitfähigkeit entspricht. Die stationären Wasserspiegel bei verschiedenen Leitfähigkeits-Quotienten sind in Abb. 5.4 dargestellt. Ist die Leitfähigkeit am undurchlässigen Rand ($x = 0$) hoch und beim konstanten Potential ($x = 200$) klein, so ist das Verhältnis $K_{(x=0)}/K_{(x=200)}$ (im folgenden mit der abgekürzten Notation K_0/K_{200}) gross. Diese Situation entspricht den höher gelegenen Kurven in Abb. 5.4. Umgekehrt entsprechen die tiefer gelegenen Kurven einem kleinen Verhältnis K_0/K_{200} . Es wurden in der Simulation die in Tabelle 5.4 dargestellten neun Leitfähigkeitsquotienten verwendet.

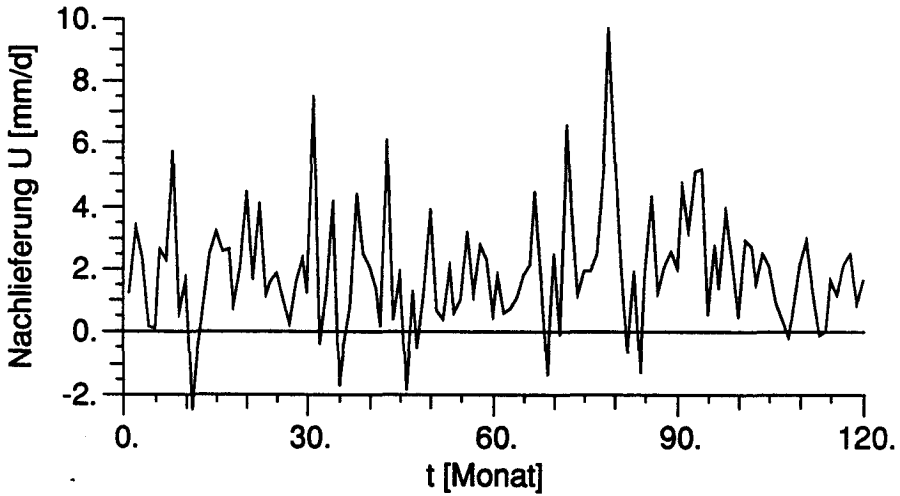


Abbildung 5.5 Nachlieferung über den Zeitraum von 120 Monaten (Daten aus Schmeidl et al., (1970).

	\mathcal{K}_1	\mathcal{K}_2	\mathcal{K}_3	\mathcal{K}_4	\mathcal{K}_5	\mathcal{K}_6	\mathcal{K}_7	\mathcal{K}_8	\mathcal{K}_9
$\log_{10} (K_0/K_{200})$	-2.	-1.5	-1.	-0.5	0.	0.5	1.	1.5	2.
K_0/K_{200}	0.01	0.032	0.1	0.32	1.0	3.16	10.0	31.6	100.
K_0 [m/d]	0.195	0.587	1.66	4.36	10.1	20.1	34.7	51.7	66.5
K_{200} [m/d]	19.5	18.6	16.7	13.8	10.1	6.35	3.47	1.64	0.665

Tabelle 5.4 Leitfähigkeitsquotienten \mathcal{K} zur Berechnung des Amplitudendiagramms.

Die Leitfähigkeiten für die verschiedenen Quotienten sind in Abb. 5.6 dargestellt. Die mittlere Leitfähigkeit, welche wegen der nichtlinearen Mittelung und dem fixierten maximalen stationären Wasserspiegel variieren muss, ist in Abb. 5.7 dargestellt. Die resultierenden Leitfähigkeiten sind in Torfen unterschiedlichen Zersetzungsgrades anzutreffen.

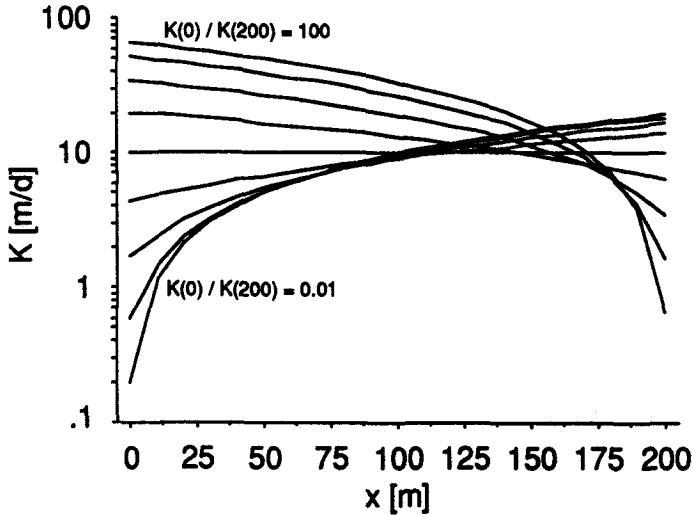


Abbildung 5.6
Räumliche Anordnung der Leitfähigkeiten der 9 Quotienten.

Die in Tabelle 5.4 und in Abbildungen 5.6 und 5.7 dargestellten Leitfähigkeitsquotienten werden für die mittlere Leitfähigkeit $K = 10$ m/d mit Gleichung (3.12) berechnet. Dabei wird angenommen, dass die Leitfähigkeit vertikal homogen ist. Gleichung (3.12) führt zu einer räumlich nicht linearen Funktion der Leitfähigkeit. Der Wasserspiegel h_0 eines bestimmten Leitfähigkeitsverhältnisses an der Stelle $x = 0$, der Wasserscheide, wird danach an den Wasserspiegel h_0 bei homogener Leitfähigkeit angepasst, indem die mittlere Leitfähigkeit solange verändert wird, bis die Wasserspiegel an der Stelle $x = 0$ identisch sind. Als Minimierungsalgorithmus wird Newton-Raphson mit numerischer Differentiation benutzt (Press et al, 1986, Kap.

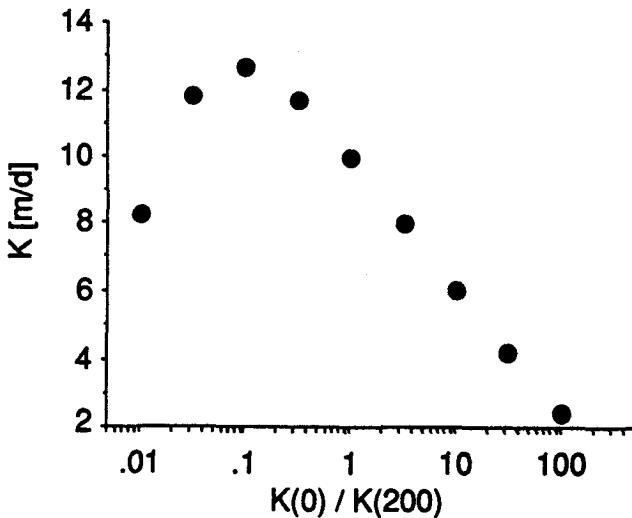


Abbildung 5.7
Mittlere Leitfähigkeiten der 9 Quotienten. Die mittlere Leitfähigkeit variiert, weil für die Simulation angenommen wurde, dass die piezometrische Höhe an der Wasserscheide immer gleich hoch ist.

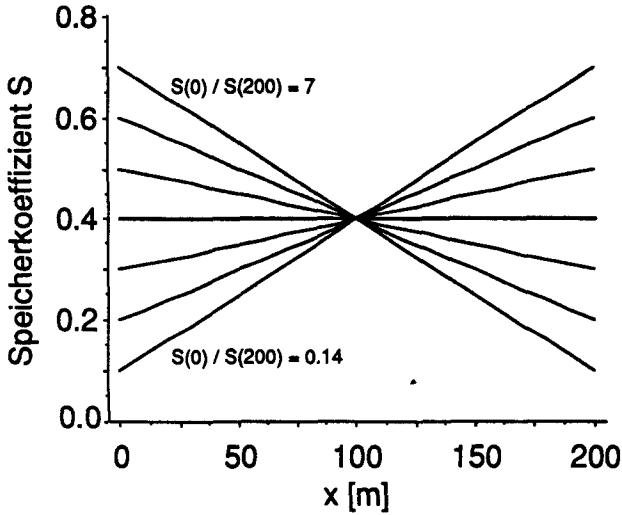


Abbildung 5.8 Räumliche Anordnung des Speicherkoeffizienten für die sieben simulierten Quotienten.

9.4). Der vollständige Algorithmus ist in den Subroutinen «mini1d» und «kprop» im Anhang H.1. enthalten. In der Hydrologie wird diese Optimierung als inverses Problem bezeichnet (Yeh, 1986).

Der mittlere Speicherkoeffizient S beträgt 0.4. Zwischen dem Speicherkoeffizienten an der Stelle $x = 0$ und der Stelle $x = 200$ wurde linear interpoliert. Es wurden sieben Quotienten des Speicherkoeffizienten S_0/S_{200} zwischen 0.14 und 7.0 simuliert (Tab. 5.5, Abb. 5.8).

	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6	S_7
S_0/S_{200}	0.143	0.333	0.60	1.0	1.67	3.0	7.0
S_0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7
S_{200}	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1

Tabelle 5.5 Quotienten des Speicherkoeffizienten S und ihre Größe an den Stellen $x = 0$ und $x = 200$, mit welchen das Amplitudendiagramm berechnet wird.

Der Speicherkoeffizient von 0.7 entspricht demjenigen in einem wenig zersetzten Torfes, einer von 0.1 demjenigen in einem sehr stark zersetzten Torf.

Nicht alle Kombinationen der 7×9 Quotienten sind physikalisch in einem isotropen porösen Medium möglich. Eine sehr hohe Leitfähigkeit kann nicht mit einem kleinen Speicherkoeffizienten verbunden sein, wie auch eine sehr niedrige Leitfähigkeit nicht mit einem hohen Speicherkoeffizienten. In Tabelle 5.6 sind die physikalisch möglichen Verhältnisse dargestellt.

Quotient der Leitfähigkeit	Quotient des Speicherkoeffizienten						
	0.14	0.33	0.60	1.0	1.67	3.0	7.0
100.	○	○	○	●	●	●	●
31.6	○	○	●	●	●	●	●
10.0	○	●	●	●	●	●	●
3.16	●	●	●	●	●	●	●
1.00	●	●	●	●	●	●	●
0.32	●	●	●	●	●	●	○
0.10	●	●	●	●	●	●	○
0.032	●	●	●	●	●	○	○
0.010	●	●	●	●	○	○	○

Tabelle 5.6 In einem isotropen Torfkörper physikalisch mögliche Kombinationen des Quotienten aus der Leitfähigkeit und dem Speicherkoeffizienten sind mit einem gefüllten Punkt bezeichnet, nicht mögliche mit einem Kreis.

In einem anisotropen porösen Medium sind auch die extremen Kombinationen möglich. Das anisotrope Medium ist aus hydraulisch sehr leitfähigem Torf mit grossem Speicherkoeffizienten, M_h , und wenig leitfähigem Torf mit kleinem Speicherkoeffizienten, M_l , zusammengesetzt (Abb. 5.9). Liegen dünne Streifen des Torfes M_h parallel zur Fliessrichtung in einem Torf M_l entsteht ein sehr leitfähiger Torfkörper mit kleinem Speicherkoeffizienten. Dieser Körper wird parallel-anisotropes poröses Medium genannt, M_p . Befinden sich im Torf M_l quer zur Fliessrichtung Streifen von M_h , weist der anisotrope Torfkörper eine geringe Leitfähigkeit mit einem hohen Speicherkoeffizienten auf, genannt senkrecht-anisotropes poröses Medium, M_s . Zwei Beispiele illustrieren diese Verhältnisse.

Beispiel 1:

Leitfähigkeit und Speicherkoeffizient in einem parallel-anisotropen Medium M_p

gegeben: Leitfähigkeit des Medium M_h , $K_h = 1000$ m/d, Speicherkoeffizient $S_h = 1.0$, Schichtdicke $B_h = 0.05$ m

Leitfähigkeit des Medium M_l , $K_l = 0.01$ m/d, Speicherkoeffizient $S_l = 0.05$, Schichtdicke $B_l = 0.95$ m

Resultat: Leitfähigkeit $K_p = 50$ m/d (berechnet mit Formel 3.12), Speicherkoeffizient $S_p = 0.10$.

Beispiel 2:

Leitfähigkeit und Speicherkoeffizient in einem senkrecht-anisotropen Medium M_s

gegeben: Leitfähigkeit des Medium M_h , $K_h = 1000$ m/d, Speicherkoeffizient $S_h = 1.0$, Schichtdicke $B_h = 0.65$ m

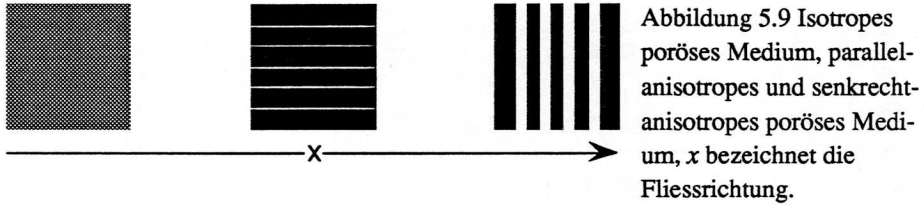


Abbildung 5.9 Isotropes poröses Medium, parallel-anisotropes und senkrecht-anisotropes poröses Medium, x bezeichnet die Fließrichtung.

Leitfähigkeit des Medium M_1 , $K_1 = 0.05$ m/d, Speicherkoeffizient $S_1 = 0.1$, Schichtdicke $B_1 = 0.35$ m

Resultat : Leitfähigkeit $K_S = 0.14$ m/d (berechnet mit Formel 3.11), Speicherkoeffizient $S_S = 0.70$.

Das Resultat von Beispiel 1 entspricht einem Torfkörper, der bei einem Leitfähigkeitsquotienten von $K_0/K_{200} = 100$ und einem Quotienten des Speicherkoeffizienten von $S_0/S_{200} = 0.14$ an der Stelle $x = 0$ simuliert wird, das Beispiel 2 demjenigen bei einem Leitfähigkeitsquotienten von $K_0/K_{200} = 0.01$ und einem Quotienten des Speicherkoeffizienten von $S_0/S_{200} = 7.0$ an der Stelle $x = 0$. Das parallel-anisotrope Medium lässt sich in einem Moor als Rüllenstruktur (Rüllen: natürliche Abflussrinnen in einem Moor) interpretieren, das senkrecht-anisotrope Medium als Bult-Schlenken-Struktur.

Stufenantwortfunktion des homogenen Systems

Bevor das Amplitudendiagramm simuliert wird, wird das instationäre homogene System näher betrachtet. Eine charakteristische Grösse für das System ist die Halbwertszeit $t_{1/2}$. Die Halbwertszeit $t_{1/2}$ ist jene Zeitdauer, welche das System benötigt, um die Hälfte der Auslenkung zurückzulegen, welche von einem stationären Anfangszustand nach einer Störung, z.B. einem Niederschlag, auftritt.

Die Stufenantwort (Chatfield, 1984) des Systems ist der zeitliche Verlauf des Wasserspiegels vom Beginn einer Störung ($t = 0$) bis zum neuen Gleichgewichtszustand ($t = \infty$), $h(x, t = 0, \infty)$. Sie wird erzeugt, indem die stationäre Nachlieferung U um einen Betrag δU erhöht wird (Abb. 5.10). Die graphisch bestimmten Halbwertszeiten $t_{1/2}$ an verschiedenen Stellen x des Systems aus der Stufenantwort sind in Tabelle 5.7 dargestellt.

Die Halbwertszeit wird kleiner, je näher die Stelle am Rand mit dem konstanten Potential liegt. Das System ist also am Rand weniger gepuffert als im Zentrum.

Stufenantwort h [m]	$x = 0$ [m]	$x = 100$ [m]	$x = 150$ [m]
$h_{(t=0)}$	2.82	2.45	1.90
$h_{(t=t_{1/2})}$	3.38	2.94	2.27
$h_{(t=\infty)}$	3.95	3.43	2.63
Halbwertszeit [Monat]			
$t_{1/2}$	4.69	4.63	4.20

Tabelle 5.7 Stufenantworten und Halbwertszeiten für das homogene hydrologische System an den Stellen $x = 0$, $x = 100$ und $x = 150$ m. Das System ist durch die Leitfähigkeit $K = 10$ m/d, $S = 0.4$, die Randbedingungen Fluss $q(x=0) = 0$ und konstantes Potential $h(x=200) = 0.5$ m, die Nachlieferung $U_{[t=-\infty,0[} = 1.92$ mm/d, $U_{[t=0,\infty[} = 3.84$ mm/d charakterisiert.

Aus der Halbwertszeit kann nun die Stufenantwortfunktion, abgekürzt SAF, berechnet werden. Die SAF beschreibt, wie der Ausgang, die piezometrische Höhe h , eines Systems mit dem Eingang, der Nachlieferung U , zusammenhängt. Im Falle des hier betrachteten Modells kann die IAF als autoregressiver Prozess der Ordnung p mit exponentiellem Abfall der Gewichte $\{a_p\}$ betrachtet werden (Abb. 5.11). Die sogenannte Zerfallskonstante λ ist mit der Halbwertszeit $t_{1/2}$ durch $\lambda = \ln 2/t_{1/2}$ verknüpft. Die Gewichte der SAF, $\{a_p\}$ sind dann

$$a'_k = \begin{cases} e^{-\lambda(k-1)} & 0 < k \leq p \\ 0 & k \leq 0 \end{cases} \quad (5.1).$$

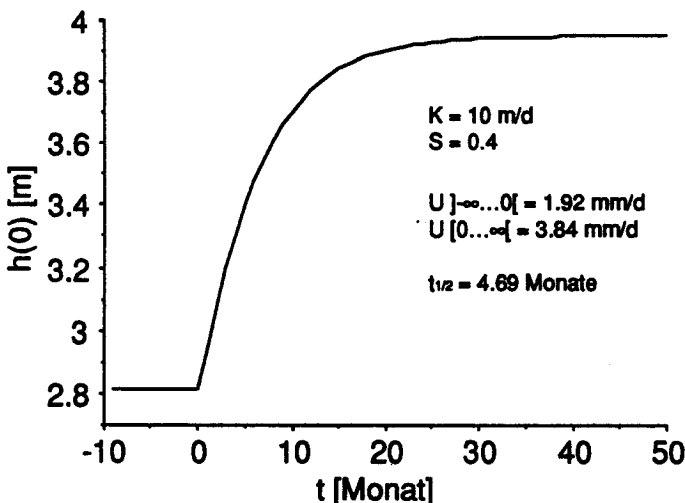


Abbildung 5.10 Stufenantwort der piezometrischen Höhe h an der Stelle $x = 0$ nach einer konstanten Verdoppelung der Nachlieferung U . Die Halbwertszeit $t_{1/2}$ dieses Systems ist 4.7 Monate.

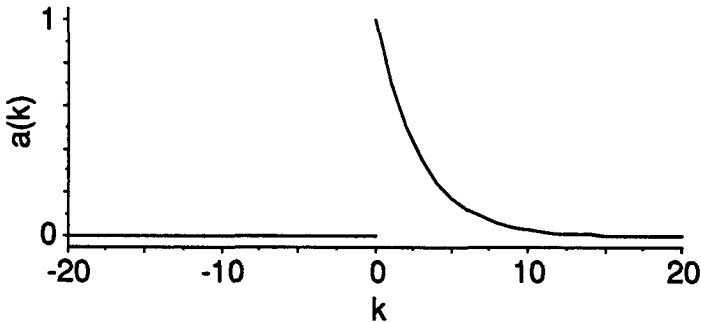


Abbildung 5.11 Stufenantwortfunktion (IAF) des untersuchten Systems an der Stelle ($x = 0$), welche den Gewichten $\{a_p\}$ der autoregressiven Reihe $h(t)$ mit der Halbwertszeit $t_{1/2} = 4.5$ Monate entspricht. Gewichte höherer Ordnung als $k = 20$ werden nicht dargestellt, da kleiner als 1×10^{-3} .

Die Gewichte werden noch normiert

$$A = \sum_{k=1}^{\infty} a'_k$$

$$a_k = a'_k / A \quad (5.2).$$

Die piezometrische Höhe $h(t)$ kann mit den Gewichten der IAF direkt aus der Nachlieferung $U(t)$ berechnet werden. Die Konstanten α und c werden aus einer linearen Regression der gewichteten unabhängigen Variablen $U'(t)$ mit der abhängigen Variablen $h(t)$ berechnet. Der Wasserspiegel $h(t)$ ist dann durch folgende Formel bestimmt

$$U'(t) = \sum_{k=1}^p a_k U(t-k-1) \quad (5.3),$$

$$h(t) = \alpha U'(t) + b \quad (5.4).$$

Im hier betrachteten System ist die Konstante α 0.64 mm/d und b 1.58 m. Die Korrelation U' gegen h ist hoch korreliert ($r = 0.997$).

Es ist somit auf einfache Art möglich, für den hier simulierten Grundwassersträger, der im wesentlichen einem Hochmoor entspricht, den Verlauf des Wasserspiegels zu berechnen, wenn die Nachlieferung und die Gewichte $\{a_p\}$ bekannt sind. In Abbildung 5.12 ist der Zusammenhang zwischen dem berechneten Wasserspiegel und der Nachlieferung U , beziehungsweise der nach (5.3) gewichteten Nachlieferung U' dargestellt. Die hellgraue, dicke Linie zeigt den geringen Zusammenhang zwischen der Nachlieferung $U(t)$

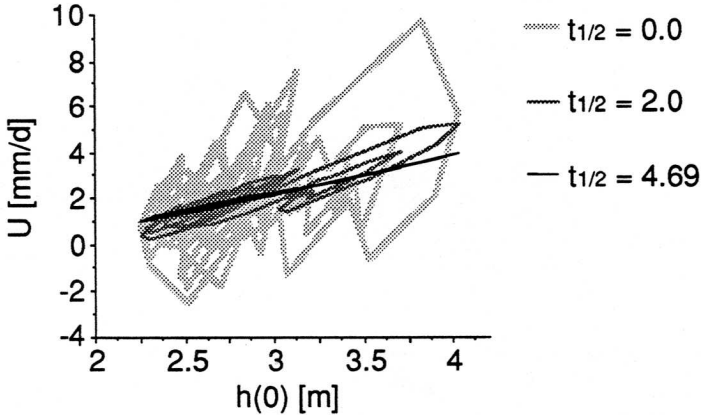


Abbildung 5.12 Darstellung der piezometrischen Höhe h des simulierten Modells an der Stelle $x = 0$ und der Nachlieferung U beziehungsweise U' . Die einzelnen aufeinanderfolgenden Zeitpunkte sind mit einer Linie verbunden. U wurde mit verschiedenen Halbwertszeiten $t_{1/2}$ in eine neue autoregressive Reihe U' transformiert (Gleichung 5.3). Für $t_{1/2} = 4.69$ Monate, was der Halbwertszeit des simulierten Systems entspricht, ist die Beziehung zwischen h und U' linear.

und dem berechneten Wasserspiegel $h(t)$. Die Halbwertszeit 0.0 bedeutet, dass das System ungedämpft die Änderung des Eingangs an den Ausgang weitergibt. Der Zusammenhang ist in diesem Fall niedrig, da dies hier nicht zutrifft. Wird die Nachlieferung $U(t)$ mit den Gewichten $\{a_p\}$, welche einer Halbwertszeit von 2 Monaten entsprechen, zur Nachlieferung U' transformiert, ist der Zusammenhang zwischen Wasserspiegel und Nachlieferung schon deutlich besser. Mit der für das simulierte System berechneten Halbwertszeit von 4.69 Monaten ist die Korrelation zwischen Wasserspiegel und Nachlieferung U' perfekt.

Analog kann die Methode auf Messungen des Wasserspiegels und der Nachlieferung in einem realen Hochmoor angewandt werden. Schmeidl et al. (1970) messen neben der Nachlieferung auch den Wasserspiegel etwa im Zentrum des wenig gestörten Moores. Die Darstellung des Wasserspiegel-Nachlieferungs-Diagramms zeigt, dass mit den für die Transformation der Nachlieferung benutzten Halbwertszeiten kein deutlicher Zusammenhang hergestellt werden konnte. Das Diagramm zeigt in allen Fällen eine extreme Nichtlinearität, das heisst bei gleicher Nachlieferung U treten ganz verschiedene Wasserspiegel h auf. Dieses Resultat wird einerseits durch die verwendeten Daten verursacht, da die Nachlieferung Schnee und die Speicherung in der Schneedecke nicht berücksichtigt, andererseits das hydrologische Modell einen vertikal homogenen Torfkörper annimmt. Dies ist einem schlenkenrei-

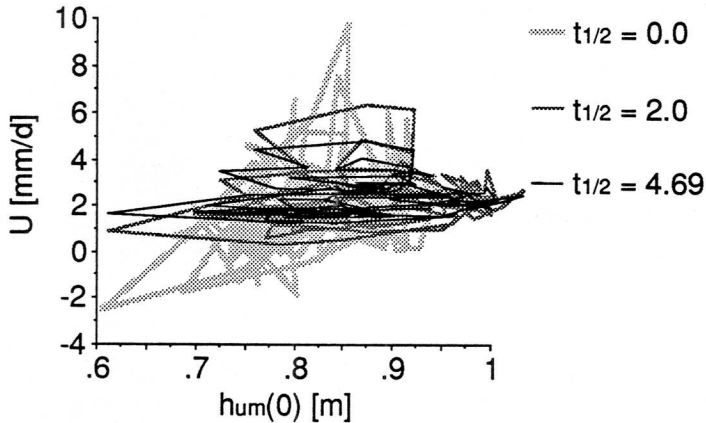


Abbildung 5.13 Darstellung der piezometrischen Höhe h wie sie von Schmeidl et al. (1970) in einem Hochmoor mit ähnlichen Eigenschaften wie das simulierte Modell gemessen wurde und der Nachlieferung U beziehungsweise U' . Das reale System ist nicht linear und lässt sich deshalb nicht durch eine zeitunabhängige Impulsantwortfunktion darstellen.

chen Hochmoor, wie in diesem Fall, sicher nicht der Fall. Die Leitfähigkeit des Torfkörpers nimmt mit steigendem Wasserspiegel zu. Auch die Kompressibilität des Torfs wurde im Modell nicht simuliert. Sie verstärkt gleichfalls die im realen Moor beobachtete Nichtlinearität.

Das hier dargestellte Modell ist also in einem realen Moor nur gültig, wenn sich die vertikale Leitfähigkeit in einem Torfkörper nicht stark ändert.

Resultate

Die simulierten piezometrischen Höhen sind in Abb. 5.14 dargestellt für das homogene Modell und jene Quotienten der Leitfähigkeit- bzw. des Speicherkoeffizienten, welche die maximale und minimale Varianz des Wasserspiegels erzeugen. Die Wasserspiegelschwankungen sind in komplexer Art und Weise vom Quotienten des Speicherkoeffizienten und der Leitfähigkeit abhängig. Die Schwankungen des Wasserspiegels sind im Vergleich zu den Veränderungen der Nachlieferung stark gedämpft. Dies wird deutlich beim Vergleich von Abb. 5.14 mit Abb. 5.5. Wird die Autokorrelation der Zeitreihe $U(t)$, der Nachlieferung, und $h(t)$, dem Wasserspiegel, berechnet, ist die Nachlieferung U nicht autokorreliert, während die piezometrische Höhe h über einige Monate deutlich autokorreliert ist (Abb. 5.15). Der gegenwärtige Wasserspiegel ist also immer vom vorangehenden Wasserspiegel beeinflusst, und zwar über einige Monate.

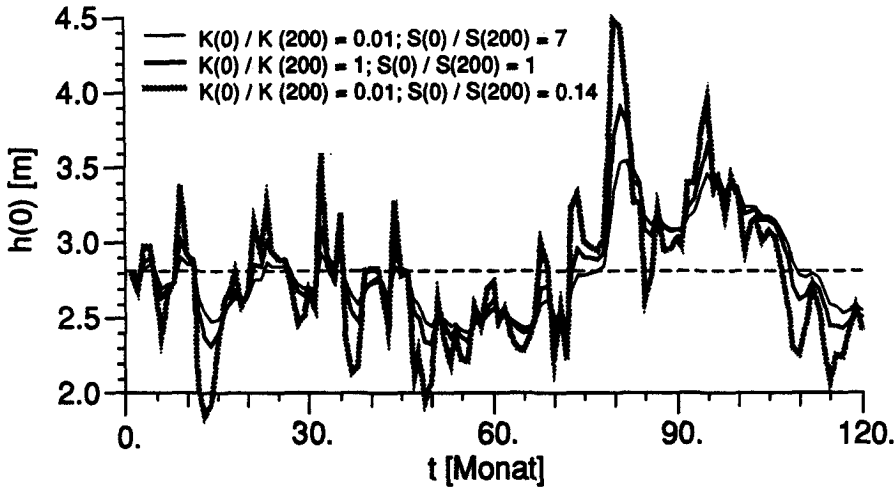


Abbildung 5.14 Zeitlicher Verlauf der piezometrischen Höhe h für verschiedene Quotienten der Leitfähigkeit K und des Speicherkoeffizienten S . Die gestrichelte Linie gibt die Lage des stationären Wasserspiegels an. Die Varianz der piezometrischen Höhe $h(x=0)$ ist für $K_0/K_{200} = 0.01$ und $S_0/S_{200} = 0.14$ maximal, für $K_0/K_{200} = 0.01$ und $S_0/S_{200} = 7.0$ minimal. Die Randbedingungen sind gegeben durch den Fluss $q(x=0) = 0$ und das konstante Potential $h(x=200) = 0.5$ m, die Nachlieferung U ist zeitabhängig (Abb. 5.5).

Die resultierenden Maxima der Simulation sind viel höher, als sie in einem Moor entstehen können, was auf der Annahme beruht, dass das simulierte poröse Medium gegen oben unbegrenzt ist, während es in Realität wenige Dezimeter über dem mittleren Wasserspiegel aufhört. Die Spitzen der Kurven in

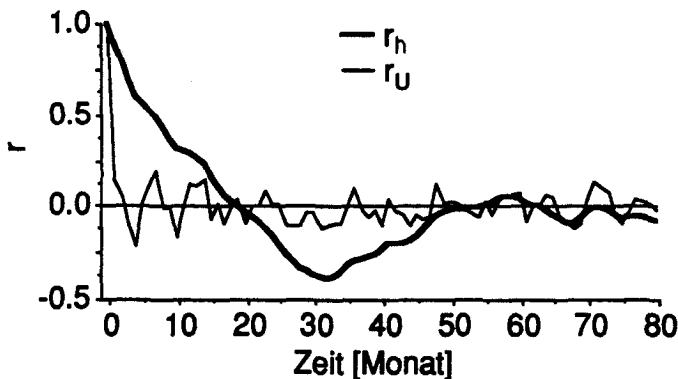


Abbildung 5.15 Autokorrelation der Nachlieferung $U(t)$ und der piezometrischen Höhe $h(t)$ für das homogene Modell.

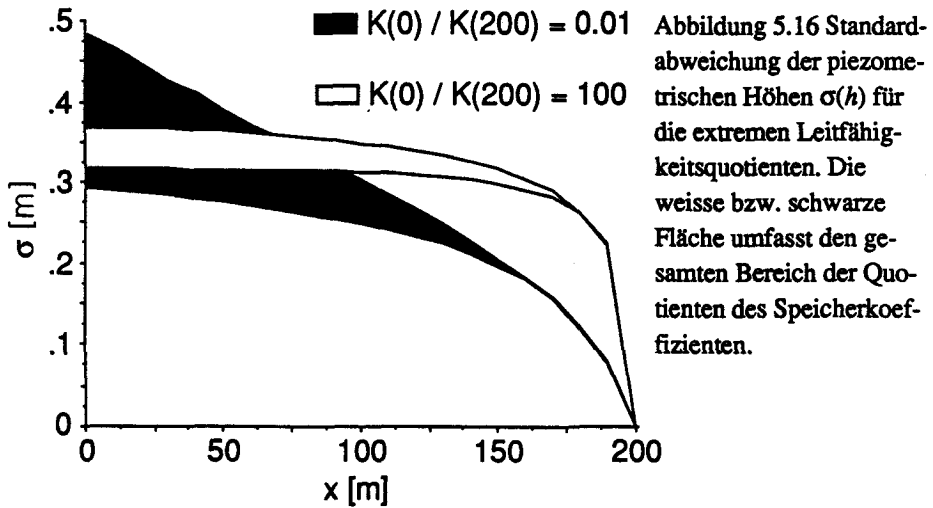


Abbildung 5.14 wären also in einem Moor wesentlich niedriger.

Die Standardabweichungen der piezometrischen Höhen, $\sigma(h)$ werden im Querschnitt des simulierten Modells für die extremen Quotienten der Leitfähigkeit (Abb. 5.16) und des Speicherkoeffizienten (Abb. 5.17) betrachtet. Das Amplitudendiagramm stellt alle 40 m die Variation der Standardabweichung der piezometrischen Höhen, $\sigma(h)$ im gesamten Gitter dar, welches durch die 9 Quotienten der Leitfähigkeit und die 7 Quotienten des Speicherkoeffizienten definiert ist (Abb. 5.18).

Die Standardabweichung $\sigma(h)$ ist in Abbildung 5.16 für den grössten (die Leitfähigkeit ist nahe der Wasserscheide hoch, am Rand des Moores niedrig) und kleinsten Quotienten der Leitfähigkeit K_0/K_{200} dargestellt. Der Leitfähigkeitsquotient beeinflusst die Standardabweichung vor allem am Rand des Moores. Die Ausdehnung der weissen bzw. schwarzen Fläche zeigt den Einfluss der Quotienten des Speicherkoeffizienten. Bei einem kleinen Quotienten der Leitfähigkeit ist der Einfluss des Speicherkoeffizienten auf die Standardabweichung bedeutend, bei einem grossen Quotienten der Leitfähigkeit gering.

Die Quotienten des Speicherkoeffizienten S_0/S_{200} (Abb. 5.17) beeinflussen die Standardabweichung des Wasserspiegels σ_h vor allem nahe der Wasserscheide. Das Minimum der Schwankungen tritt auf, wenn ein grosser Quotient des Speicherkoeffizienten mit einem kleinen Quotienten der Leitfähigkeit kombiniert wird. Diese Situation entspricht physikalisch einem senkrecht-anisotropen Medium im ersten Viertel des Querschnitts (etwa $0 < x < 50$ m) und einem parallel-anisotropen Medium im letzten Viertel des Querschnitts (etwa $150 < x < 200$) (Abb. 5.9). Eine verhältnismässig kleine Leitfähigkeit am Rand des Moores und grössere Speicherkoeffizienten im Innern

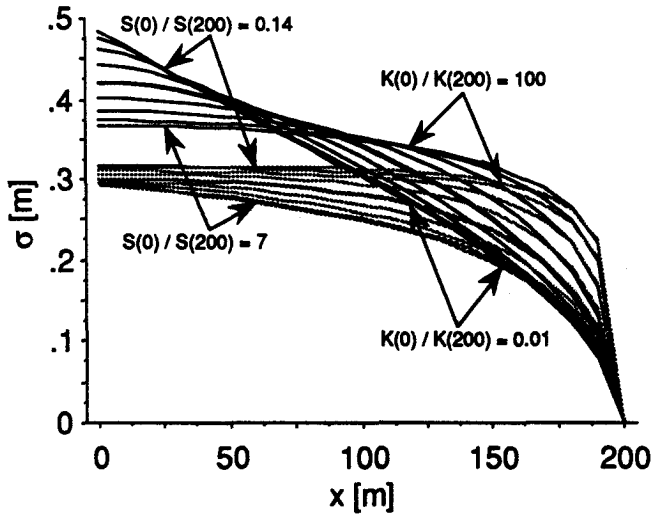


Abbildung 5.17 Standardabweichung der piezometrischen Höhen $\sigma(h)$ für die extremen Quotienten der Speicherkoeffizienten S über den gesamten Bereich der Quotienten der Leitfähigkeit K .

des Moores puffern die Wasserspiegelschwankungen. Eine grössere Leitfähigkeit am Rand lässt eine zusätzliche Nachlieferung schnell abfließen. Ein kleiner Speicherkoeffizient im Inneren führt zu einem schnellen Anstieg des Wasserspiegels im Zentrum und erhöht dann den hydraulischen Gradienten rasch.

Ökologisch lässt sich dies als Bult-Schlenken-Struktur im Zentrum und Rillen-Struktur am Rand interpretieren. Auffällig in Abbildung 5.17 ist die Kreuzung der oberen Kurvenschar für $S_0/S_{200} = 0.14$. Die Kreuzung kommt daher, dass mit dem Leitfähigkeitsverhältnis $K_0/K_{200} = 0.01$ die Standardabweichung stark ansteigt. Die grosse Standardabweichung rührt daher, dass der Gradient des Wasserspiegels recht gleichmässig ist (der stationäre Wasserspiegel entspricht dem tiefstgelegenen in Abb. 5.4) und die geringe Speicherkapazität nahe der Wasserscheide führt zu einer schnellen Übertragung des Impulses.

Die Amplitudendiagramme, dargestellt im Abstand von 40 m, zeigen ein komplexes Bild (Abb. 5.18). Die Richtung des Gradienten der Standardabweichung σ_h zeigt, ob der Quotient der Leitfähigkeit oder des Speicherkoeffizienten von grösserem Einfluss auf die Amplitude der Wasserspiegelschwankung σ_h ist. An der Stelle $x = 0$ m ist der Speicherkoeffizient von überragendem Einfluss, denn die Isolinien verlaufen etwa vertikal. Mit zunehmender Entfernung von der Wasserscheide gewinnt der Leitfähigkeitsquotient an Bedeutung. An der Stelle $x = 160$ m verlaufen die Isolinien praktisch horizontal. Das Minimum der Amplitude σ_h , σ_{min} , befindet sich immer beim kleinsten Leitfähigkeitsquotienten und dem grössten Quotienten des Speicherkoeffizienten.

Den Parametern des physikalisch begründeten Minimums σ_{min} entsprechen ökologisch am ehesten die in ungestörten Mooren im Zentrum auftretende Bult-Schlenken-Struktur und die Rüllenstruktur am Rand des Moores. Die in einem intakten Moor auftretende Abfolge von Pflanzenformationen ist eine optimale Struktur um die Amplitude des Wasserspiegels zu minimieren. Eine minimale Schwankung des Wasserspiegels ist auch für die Torfsedimentation optimal, da dann Zeitabschnitte mit aeroben Bodenverhältnissen selten sind. Werden die anisotropen Medien nicht berücksichtigt und nur die in einem homogenen Medium möglichen Quotienten betrachtet, so ist das homogene Modell bei wenig variierender Nachlieferung wahrscheinlich. Variiert die Nachlieferung stark, so ist das Modell mit einem grossen Leitfähigkeitsquotienten wahrscheinlich, da dann der Moorwasserspiegel öfters tief absinkt. Die Folgen einer solchen Entwässerung werden im nächsten Kapitel simuliert.

5.1.3. Auswirkung einer Entwässerung auf Leitfähigkeit und Wasserspiegel

Idee

In Kapitel 3.1.2, «Prozesse in einem Desaquist», wurde gezeigt, dass die hydraulische Leitfähigkeit des Torfes nach einer Entwässerung abnimmt. Da die Abnahme der Leitfähigkeit mit dem Flurabstand gekoppelt ist (positive Rückkoppelung), führt eine lineare Betrachtung nicht zum Ziel. Es werden deshalb in einem zweidimensionalen Modell eines Moorkörpers die zeitlichen und räumlichen Veränderungen der Leitfähigkeit $K(t, x, y)$, der piezometrischen Höhe (Wasserspiegel) $h(t, x, y)$ und der Wasserspiegeländerungen $\delta h(t, x, y) = h(t, x, y) - h(t_0, x, y)$ bzw. des Flurabstandes simuliert.

Modell, Anfangs- und Randbedingungen

Für das Modell wird Gleichung (3.3), welche die Abnahme der Leitfähigkeit beschreibt, mit Gleichung (3.26), welche den stationären Wasserfluss in einem zweidimensionalen Gebiet beschreibt, verknüpft. Der Wasserfluss wird mit dem Finiten-Differenzen-Modell, Gleichung (3.29 ff), simuliert.

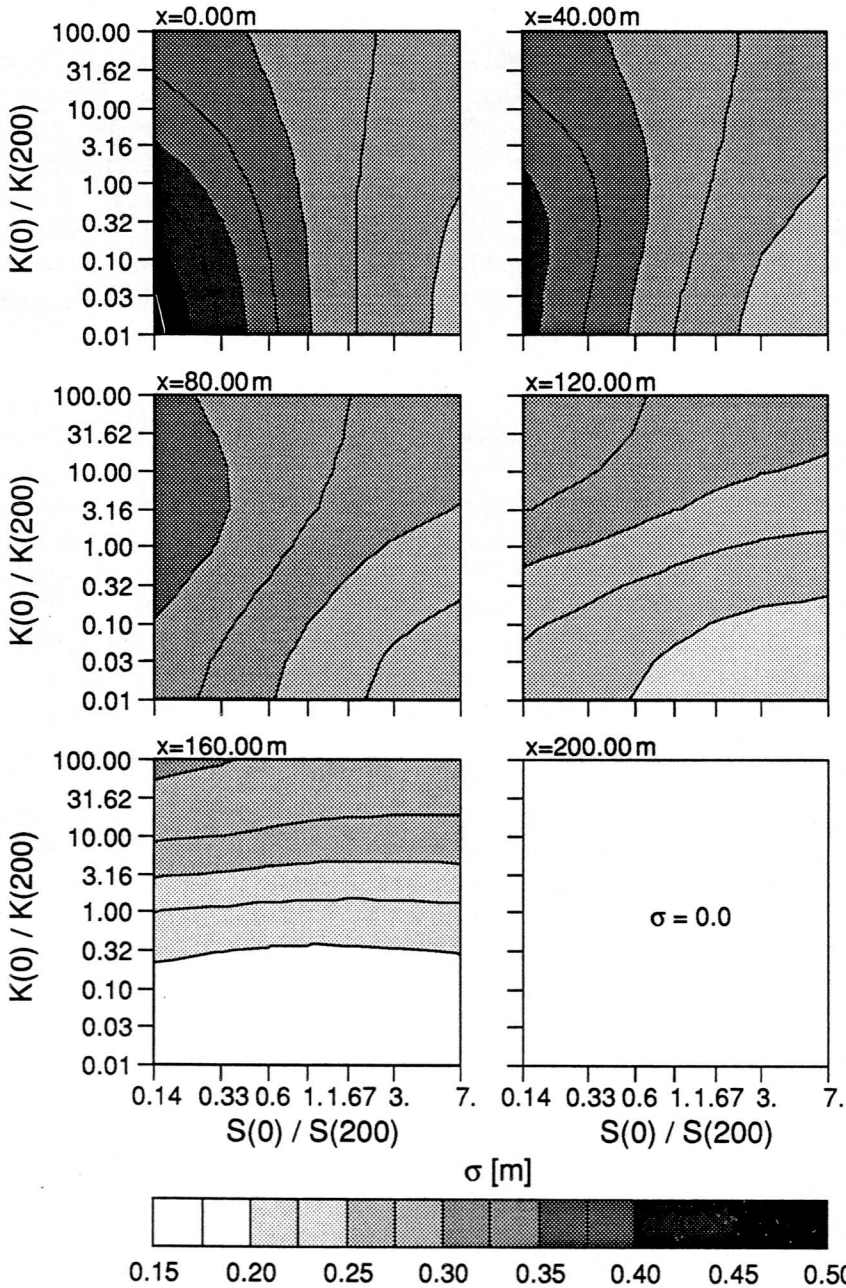


Abbildung 5.18 Amplitudendiagramm der Standardabweichung σ_h für die Quotienten der Leitfähigkeit K_0/K_{200} und des Speicherkoeffizienten S_0/S_{200} . Das Modell ist in Abb. 5.4, die Parameter in Abb. 5.6 – 5.7 abgebildet.

Die Simulation der Rückkoppelung geschieht folgendermassen: Zuerst wird ein stationärer Wasserspiegel simuliert. Dieser Wasserspiegel ist identisch mit der Mooroberfläche (Kap. 5.1.1). Im simulierten Gebiet werden «Entwässerungsgräben gezogen», das heisst neue Randbedingungen definiert und der stationäre Wasserspiegel mit den neuen Randbedingungen berechnet. Die Wasserspiegeländerung wird dann dazu benutzt, die Änderung der Leitfähigkeit nach einem Zeitschritt mit Formel (3.1) zu berechnen. Wiederum wird ein stationärer Wasserspiegel berechnet, diesmal jedoch mit den veränderten Leitfähigkeiten. Dieser Vorgang wird fortgesetzt, bis die Änderungen der Leitfähigkeit und des Wasserspiegels nur noch klein sind. Dieser Zustand entspricht dann einem lange Zeit entwässerten Moor.

Der Grundriss des Modellgebietes ist in Abb. 5.19 dargestellt. Das Ausgangsmedium hat eine homogene hydraulische Leitfähigkeit K von 10 m/d. Die Grundfläche ist quadratisch mit 400 m Seitenlänge. Das Potential am Rand h_0 beträgt 0.5 m, darunter ist eine undurchlässige Schicht. Zur Zeit $t = 0$ werden von der Mooroberfläche ausgehend 1 m tiefe Entwässerungsgräben gezogen mit einem Abstand von 50 bzw. 100 m. Die Anordnung der Gräben ist spiegelbildlich. Es entstehen damit 4 Typen von Einzugsgebieten, ① bis ④. Das quadratische Gebiet ① beinhaltet das Zentrum des Moores, die Seitenlänge beträgt 200 m. Gebiet ② und ④ liegen beide mit je einer Seite am Rand des Moores und sind auf drei Seiten drainiert. Gebiet ② ist quadratisch mit einer Seitenlänge von 50 m, Gebiet ④ rechteckig mit der längeren Seite von 100 m parallel zum Rand. Gebiet ③ ist auf zwei Seiten am Rand des Moores gelegen und sonst wie Gebiet ②. Im Modell wurde der rechte untere Quadrant des in Abb. 5.19 dargestellten Gebietes simuliert, die anderen Quadranten sind spiegelbildlich. Das simulierte Gebiet $\Omega(x, y)$ ist definiert durch $\Omega(x, y) = \{0 \leq x \leq 200, 0 \leq y \leq 200\}$. Für die räumliche Diskretisierung wird ein konstanter Knotenabstand von 3.125 m verwendet. Dies führt zu 65×65 effektiven Knoten für den Quadranten.

Die Nachlieferung wird mit 1.92 mm/d angenommen, was 700 mm/a entspricht.

Der Zeitpunkt $t = -1$ a bezeichnet den stationären Zustand im nicht drainierten porösen Medium. Die Entwässerungsgräben werden zur Zeit $t = 0$ gezogen. Die Simulation wird dann bis zum Zeitpunkt $t = 10$ a durchgeführt, bei welchem die Änderungen der Leitfähigkeit und des Wasserspiegels nur noch klein sind. In der Simulation wird der Zeitraum $0 \leq t \leq 10$ in $n = 14$ bzw. $n = 26$ Zeitschritte δt aufgeteilt. Für $n = 14$ beträgt $\delta t = 0.5$, $0 \leq t \leq 3$ und $\delta t = 1.$, $3 < t \leq 10$, für $n = 26$ sind die Zeitschritte halbiert.

Die Torfverdichtungsfaktoren γ entsprechen jenen der Tabelle 3.1. Die nach der Zeit $t = 10$ a wieder zunehmende Leitfähigkeit wird nicht simuliert, da hier von unkultivierten, nur entwässerten Moor ausgegangen wird. Die Torfverdichtungsfaktoren stellen empirisch erhobene Werte dar. Die hier simulierten Zeiten treffen für diese Faktoren zu, aber es kann vermutet

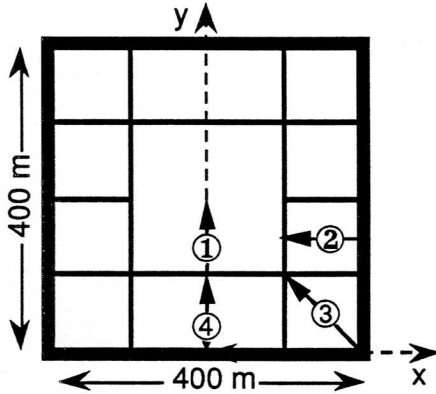


Abbildung 5.19 Grundriss des simulierten Gebietes. Die dicken Linien bezeichnen die natürlichen Randbedingungen mit $h_0 = 0.5$ m und den Rand des nicht entwässerten Moores. Die dünnen Linien bezeichnen die Drainagegräben, deren Sohle 1 m unter der ursprünglichen Oberfläche liegt. Die Pfeile bezeichnen Lage und Richtung der dargestellten Transsekte, deren Koordinate mit ξ bezeichnet wird.

werden, dass sie vom Klima abhängig sind. Die Zeitangaben sind deshalb unsicher, nicht jedoch der Prozess an sich.

Das Program für die Berechnungen «bogflo.for» ist in Anhang H.2., p. H-11 ff, dokumentiert.

Numerische Interpretation der Simulation

Ein Finite-Differenzen Modell wurde mit der analytischen Lösung (3.19) verglichen. Die Differenzen der Potentiale δh des analytisch berechneten Potentials h_{ana} und des numerisch berechneten Potentials h_{num} sind für das 6×6 Gitter kleiner 0.3 %, wie Abbildung 5.20 zeigt. Die Massenbilanz (Nach-

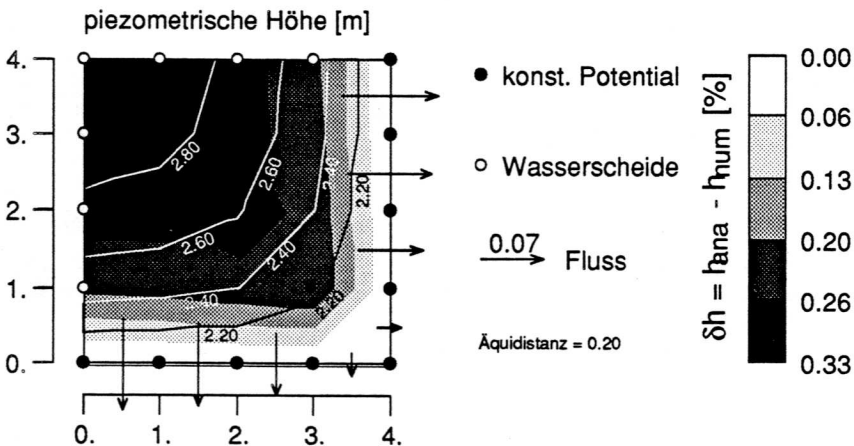


Abbildung 5.20 Vergleich einer Lösung des Finiten-Differenzen Modells mit der analytischen Lösung. Die gerasterten Flächen stellen die Abweichungen in Prozent dar, die beschrifteten Isolinien die analytische berechneten piezometrischen Höhen.

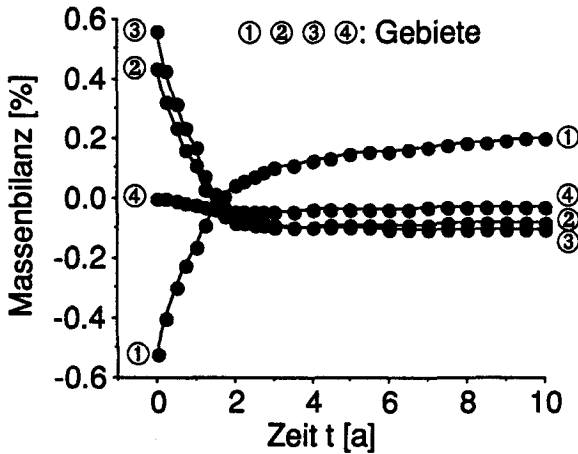


Abbildung 5.21 Massenbilanz des stationären Wasserflusses der Gebiete 1 bis 4 für jeden Zeitschritt.

lieferung – Ausfluss) ist besser als 0.02 %. Die homogen gewählten Parameter sind Leitfähigkeit $K = 0.1$ m/d, Nachlieferung $U = 0.05$ m/d, das konstante Potential am Rand $h_0 = 2$ m.

Im 65×65 Gitter ist Massenbilanz der einzelnen Gebiete und der einzelnen Zeitschritte für alle Gebiete deutlich besser als ein Prozent (Abb. 5.21). Die berechneten piezometrischen Höhe weichen deshalb gleichfalls vom wahren Wert wenig ab. Die unterschiedlichen Abweichungen von der Massenbilanz verursachen die Randbedingungen und die am Rande auftretenden Gradienten.

Die zeitliche Änderung der hydraulischen Leitfähigkeit in Gebiet ① ist in Abb. 5.22 dargestellt. Es ist dies das einzige Gebiet, in welchem während der Simulation die Leitfähigkeit zu oszillieren zunimmt und sich immer stärker aufschaukelt. Dieses Verhalten verursacht die Randbedingung der Wasserflussgleichung (3.26), welche im Gebiet ① auf zwei anschließenden Seiten eine Wasserscheide ist. Diese Randbedingung führt zu einer sehr sensitiven Rückkoppelung, in welcher eine kleine Veränderung der Leitfähigkeit an den Rändern mit konstantem Potential zu einer grossen Änderung der piezometrischen Höhe am höchsten Punkt führt, wo sich die Wasserscheiden vereinigen. Deshalb oszilliert die Leitfähigkeit in Abbildung 5.22 im höchsten Punkt ($x = 0, y = 200$) am meisten.

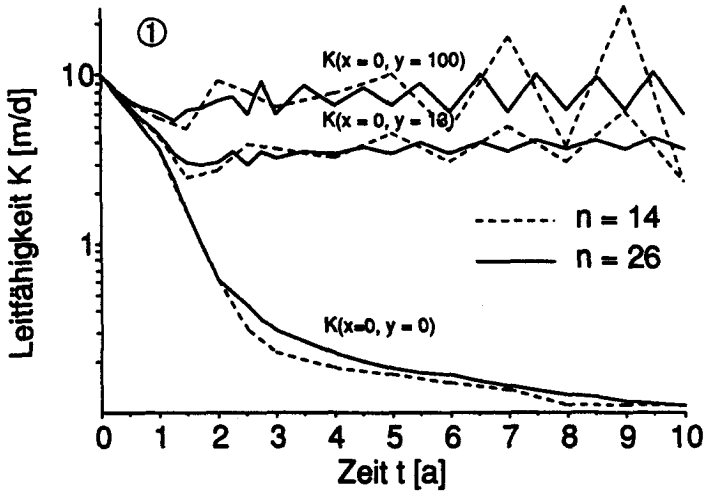


Abbildung 5.22 Zeitliche Änderung der hydraulischen Leitfähigkeit im Gebiet ①. Es sind die Stellen $(x=0, y=0)$ (unmittelbar neben Entwässerungsgraben), $(x=0, y=13)$ und $(x=0, y=100)$ dargestellt. Bei der Lösung mit $n=14$ Zeitschritten beginnt sich das System an den Stellen $(x=0, y=13)$ und $(x=0, y=100)$ aufzuschaukeln. Mit $n=26$ Zeitschritten ist die Oszillation gedämpft.

Die piezometrischen Höhen liegen in einem solchen Fall über der Mooroberfläche. Beim nächsten Zeitschritt wird die Leitfähigkeit dann wieder erniedrigt, was zu einem krassen Wasserspiegelabfall führt. Ist der Zeitschritt zu gross, nähert sich die Lösung nicht genügend langsam dem Gleichgewichtszustand. Auch mit 26 Zeitschritten ist eine, wenn auch wesentlich kleinere Oszillation zu sehen. Da die Lösung aber stabil ist, und mit der Lösung mit 14 Zeitschritten im Mittel übereinstimmt, wurde die Zeit nicht mehr feiner diskretisiert.

Hydrologische und ökologische Interpretation

Die Resultate der Simulation sind auf den folgenden Seiten als eine Art Bilderbuch einmal als Transsekt und einmal als Projektion in die Ebene dargestellt (Abb. 5.23 bis 5.25 Transsekt Darstellungen, Abb. 5.26 bis 5.29 Darstellungen in der Ebene). Auf den hier dargestellten Transsekten, welche lokale Symmetrieachsen bilden, sind die Änderungen am grössten. Sie werden hier gebietsweise zusammen besprochen.

Die hydraulische Leitfähigkeit nimmt in Gebiet ① am Rand zum Entwässerungsgraben stark ab. Die Randverdichtung ist so hoch, dass die Wasserspiegeländerung nur bis etwa 25 m vom Grabenrand entfernt kleiner als 0.2 m wird. Diese Wiedervernässung geht nach dem Modell sehr schnell, nach 2 Jahren ist der endgültige Wasserspiegel schon nahezu erreicht. Der endgülti-

ge Wasserspiegel liegt etwa 0.1 m tiefer als der Wasserspiegel vor der Entwässerung. Die Leitfähigkeit wird in etwa Dreiviertel des Gebietes um mehr als die Hälfte verringert. Der Quotient der Leitfähigkeit wie auch des Speicherkoeffizienten wird zwischen Zentrum und Rand gross.

Die Entwicklung der Leitfähigkeit und des Wasserspiegels sind in Gebiet ②, ③ und ④ sehr ähnlich. Die Transsektdarstellungen unterscheiden sich kaum, obwohl im Gebiet ④ nur halb soviel Quergräben simuliert wurden. Das am stärksten sich verändernde Gebiet ist Teilgebiet ②. Die Auswirkung des zusätzlichen Quergrabens in der Fläche ② ist deutlich sichtbar. In allen drei Gebieten wird der ursprüngliche Wasserspiegel nur gegen den äusseren Rand des Gebietes wieder erreicht, dessen Potential ja nicht abgesenkt wurde.

Die Resultate zeigen, dass die Verringerung der Leitfähigkeit, welche durch einen niedrigeren Wasserspiegel stattfindet, am effizientesten am Unterrand wirkt, wie Teilgebiet ① zeigt. Die Abdichtung wirkt sich weniger am Oberrand aus, wie die anderen Teilgebiete zeigen. Das Modell stimmt mit den Messungen, welche im Turbenriet (Schneebeli, 1988) gemacht wurden, überein. Die Sackung des Torfkörpers wurde in diesem Modell nicht berücksichtigt. Sie führt zu einer noch geringeren Differenz zwischen Oberfläche und Wasserspiegel als hier simuliert.

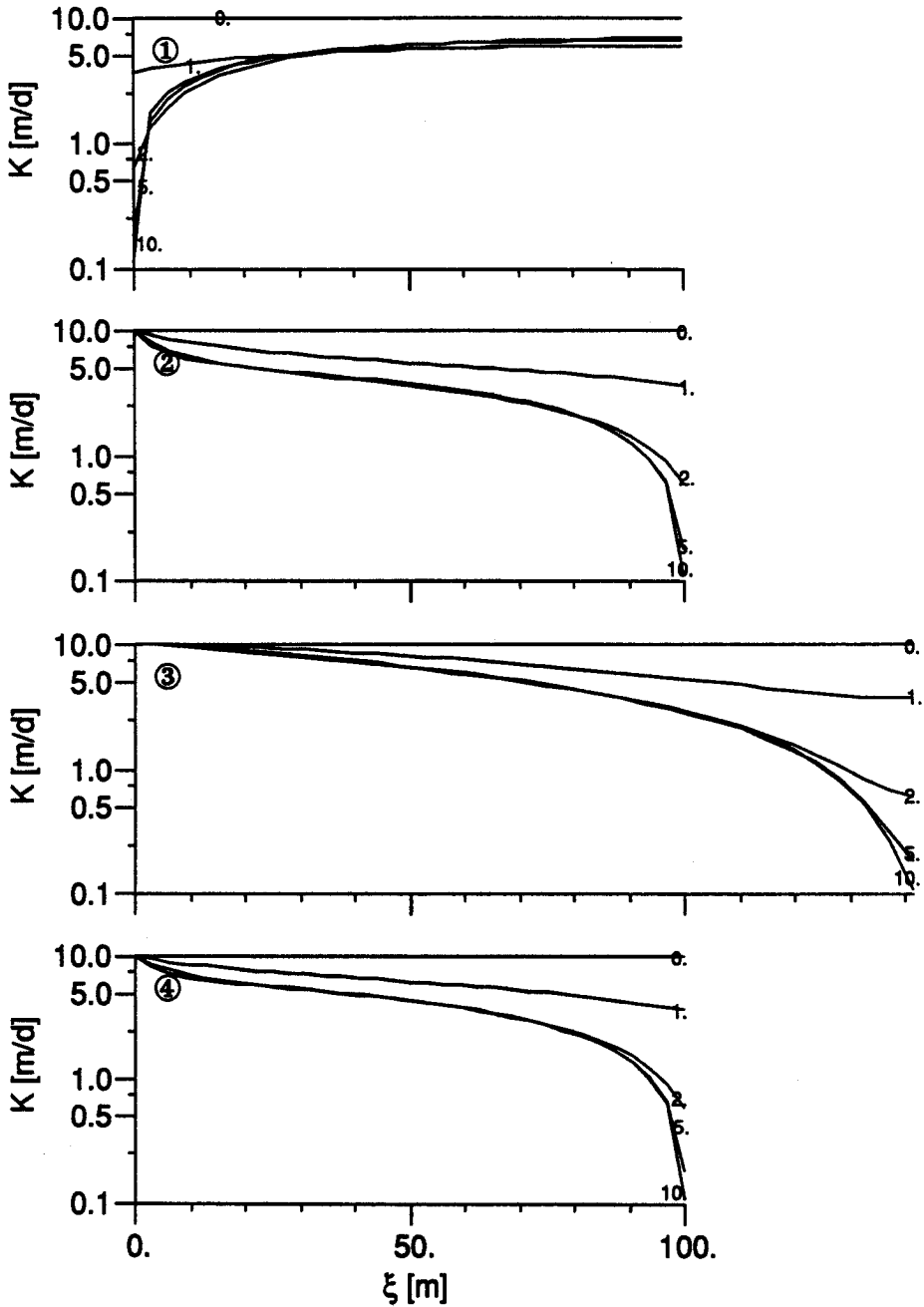


Abbildung 5.23 Zeitliche und räumliche Änderung der Leitfähigkeit in den Transekten 1 bis 4 dargestellt in Abb. 5.18. Die Änderungen sind für die Zeiten 0, 1, 2, 5 und 10 Jahre dargestellt. Die Leitfähigkeit für $t = -1$ ist gleich wie für $t = 0$.

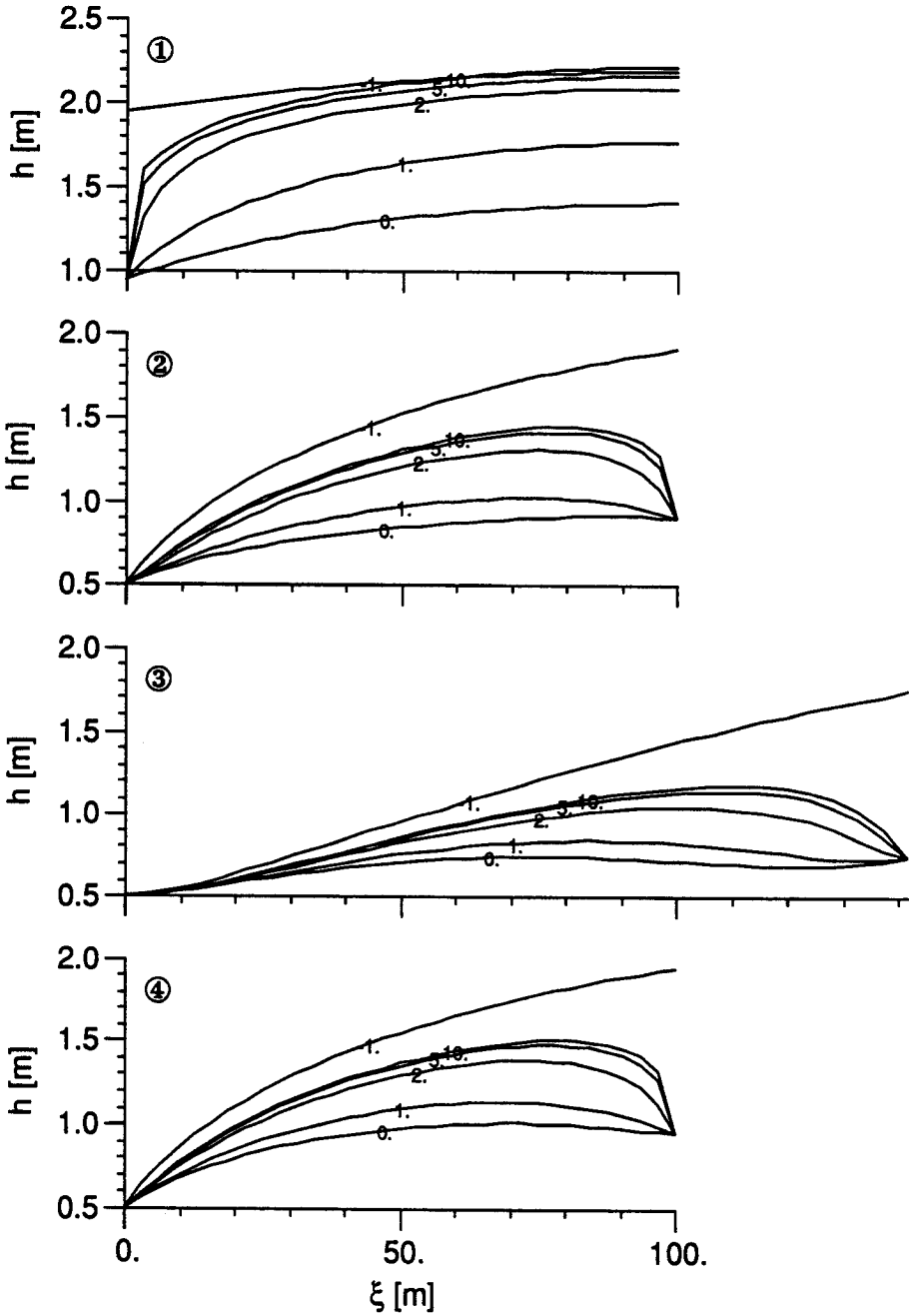


Abbildung 5.24 Zeitliche und räumliche Änderung der piezometrischen Höhe h in den Transekten 1 bis 4. Die Änderungen sind für die Zeiten 0, 1, 2, 5 und 10 Jahre dargestellt. Der Wasserspiegel zur Zeit $t = -1$ entspricht dem Wasserspiegel vor der Entwässerung und repräsentiert die Mooroberfläche.

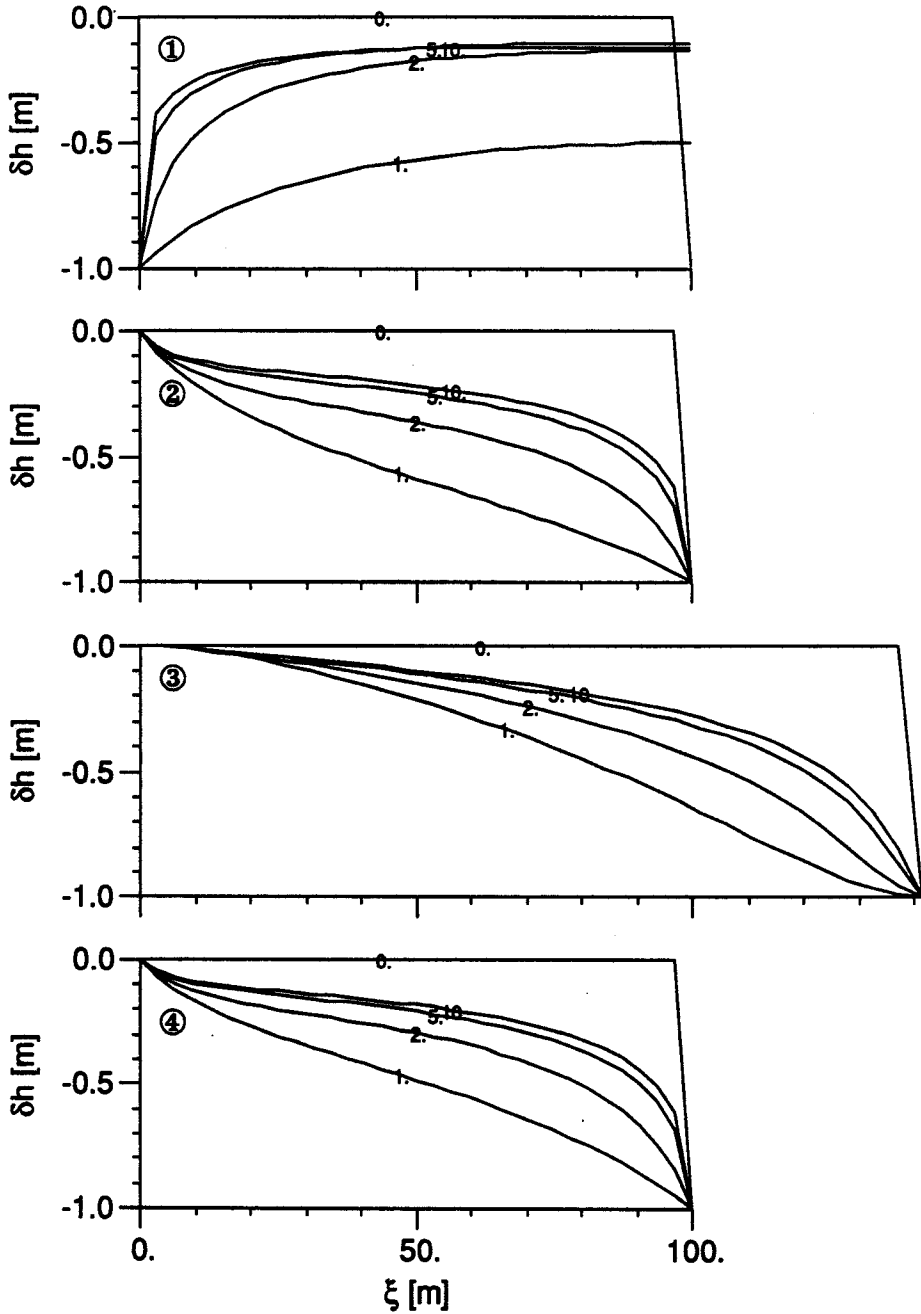


Abbildung 5.25 Zeitliche und räumliche Änderung des Wasserspiegels δh gemessen vom Ausgangswasserspiegel zur Zeit $t = -1$ in den Transsekten 1 bis 4. Die Änderungen sind für die Zeiten 0, 1, 2, 5 und 10 Jahre dargestellt.

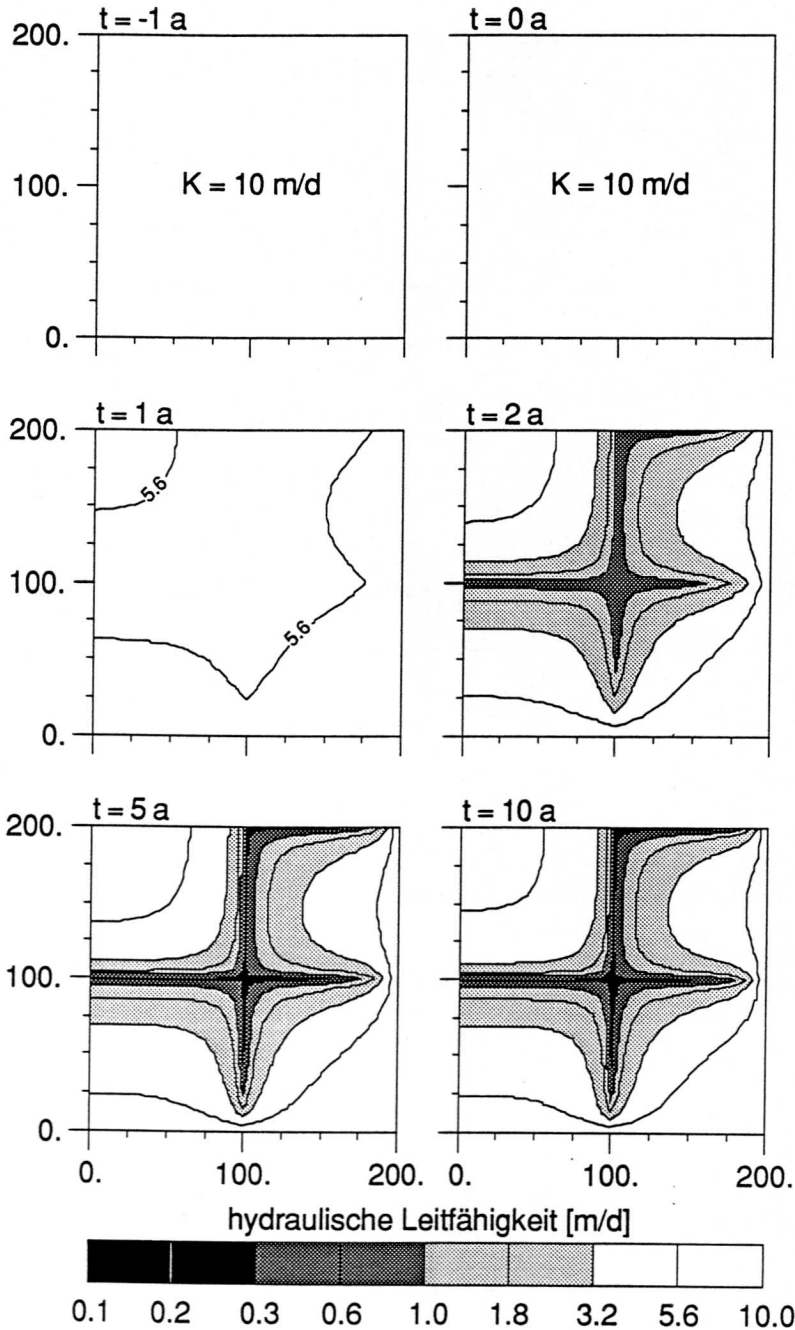


Abbildung 5.26 Räumliche und zeitliche Darstellung der Leitfähigkeit in der Ebene vor und nach der Entwässerung. Im Zeitpunkt $t = 1$ ist die Leitfähigkeit zwischen den Isolinen kleiner als 5.6 m/d . In den Zeichnungen ist immer der rechte, untere Quadrant des Gesamtgebietes abgebildet.

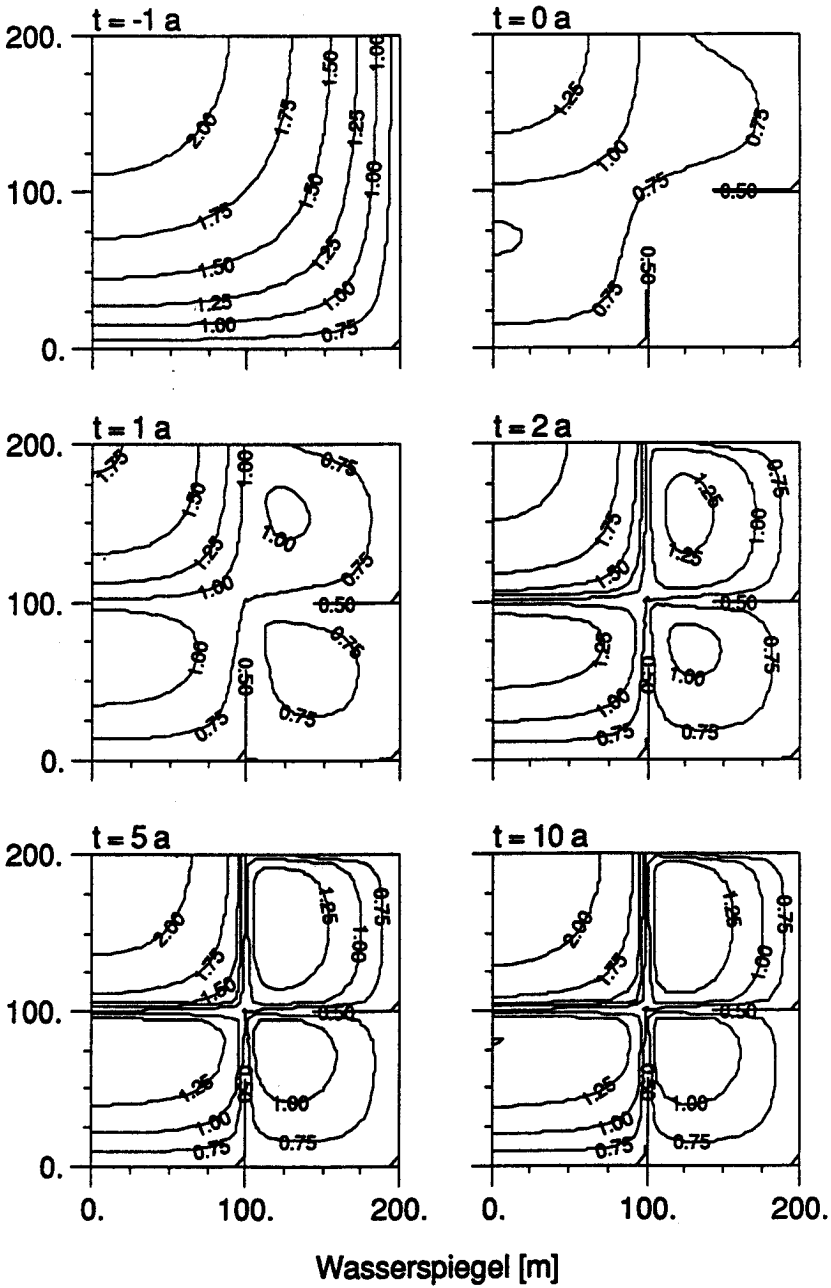


Abbildung 5.27 Räumliche und zeitliche Darstellung der piezometrischen Höhe in der Ebene vor und nach der Entwässerung. In den Zeichnungen ist der rechte, untere Quadrant des Gesamtgebietes abgebildet.

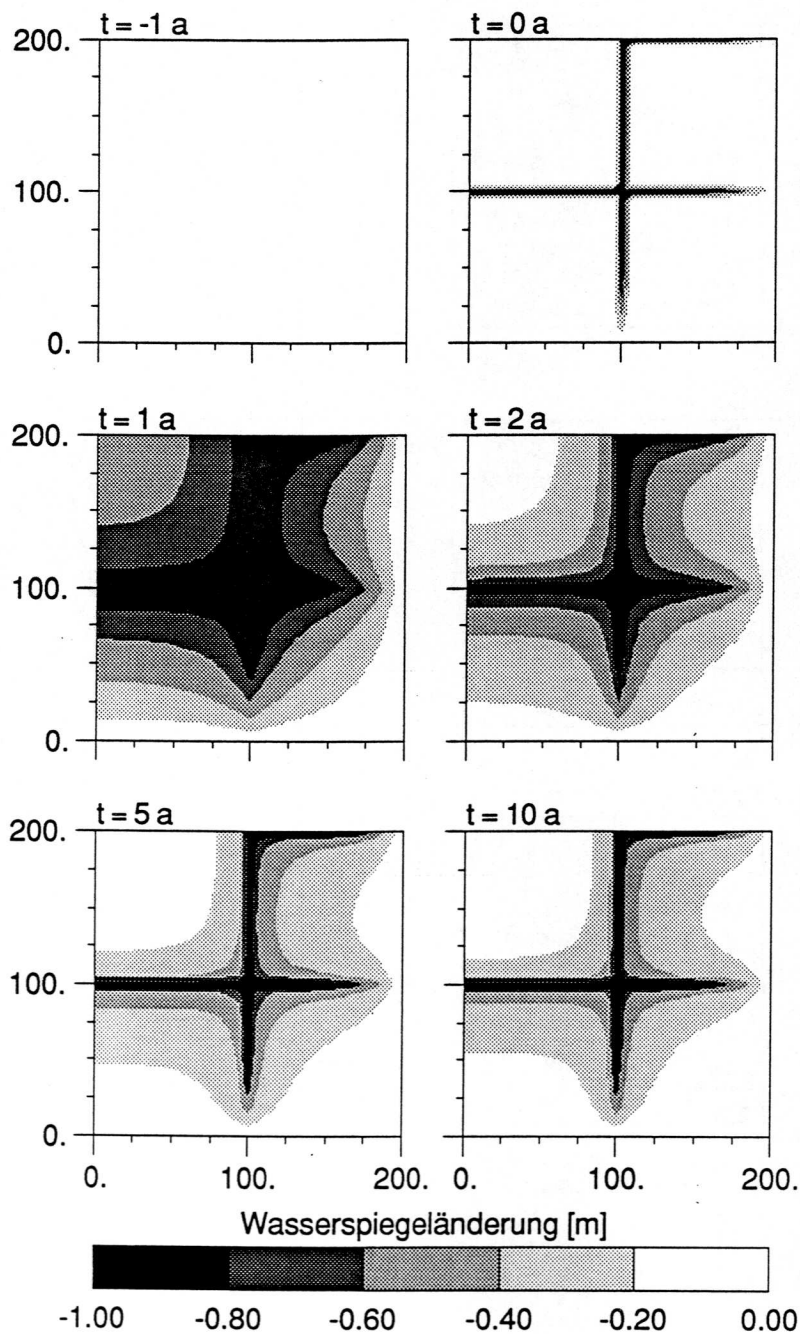


Abbildung 5.28 Räumliche und zeitliche Darstellung der Veränderung des Wasserspiegels gemessen von der Mooroberfläche (Flurabstand) in der Ebene vor und nach der Entwässerung. In den Zeichnungen ist der rechte, untere Quadrant des Gesamtgebietes abgebildet.

5.2. WACHSTUMSMODELL

In Kapitel 3 wurde einerseits das Klötzchen-Modell (Gleichungen 3.36 bis 3.38) und das gekoppelte Sedimentations-Grundwasser-Modell (Gleichungen 3.39 bis 3.46) hergeleitet. Die Flächen und Volumen, welche seit Beginn des Moorwachstums für das Turbenriet berechnet wurden (Kapitel 4.5), können mit diesen Modellen verglichen werden.

Für die Anpassung wird dabei der Anfangs- und Endwert vorgegeben, die Form der Kurve des Flächen- bzw. Volumenwachstums variiert. Für das Turbenriet kann angenommen werden, dass der Zersetzungsfaktor im Katotelm α_k sehr klein ist, es wird deshalb mit dem linearen Modell (3.43) gerechnet.

Die Berechnungen ergeben, dass die beiden Modelle perfekt übereinstimmen. Dieses überraschende Resultat ist eine Folge der sehr viel grösseren horizontalen Ausdehnung im Vergleich zur Höhe. Der Vergleich beschränkt sich deshalb auf das Klötzchen-Modell.

Das Modell wurde mit den Parametern $p_h = 1.87 \times 10^{-2}$ m/a für die horizontale Ausbreitungsrate, $p_v = 5.0 \times 10^{-4}$ m/a für die vertikale Sedimentationsrate berechnet.

In Abbildung 5.29 ist die Alter-Flächen-Kurve dargestellt. Das Modell kann den schnellen Flächenzuwachs, der um 6000 BC beginnt, nicht nachvollziehen. Würde der Endpunkt schon bei 0 AD festgelegt, so würde die Modellkurve eine kleinere Ausbauchung bilden. Ein Modell mit zeitlich variablen Parametern würde für das Turbenriet einen sigmoiden Verlauf aufweisen. Die sehr wenigen gemessenen Punkte erlauben jedoch kein Modell mit mehr Parametern.

Die Zeit-Volumen Kurve (Abb. 5.30) passt sich den Daten sehr gut an. Das zu Beginn zu kleine Volumen im Modell wird durch den raschen Anstieg um

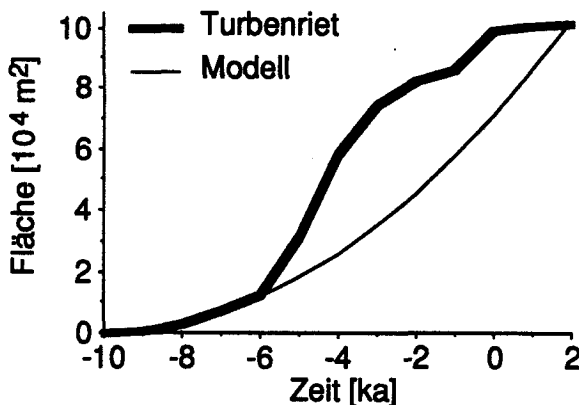


Abbildung 5.29 Vergleich der mit dem Klötzchen-Modell simulierten Fläche und der gemessenen Fläche im Turbenriet. Anfangs- und Endpunkt sind im Modell fixiert.

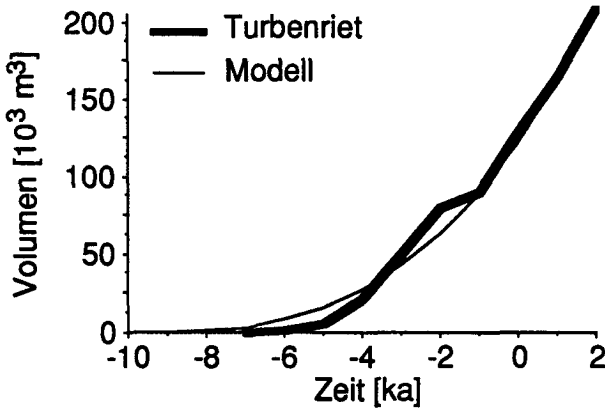


Abbildung 5.30 Vergleich des mit dem Klötzchen-Modell simulierten Volumens und dem gemessenen Volumen im Turbenriet. Anfangs- und Endpunkt sind im Modell fixiert.

6000 BC ausgeglichen. Das Klötzchen-Modell modelliert die langfristige Volumenentwicklung somit recht genau. Es steht somit ein einfaches Modell zur Verfügung, um die langfristige Sedimentation in Mooren abzuschätzen.

Diese Modellrechnung am Beispiel Turbenriet validiert die zugrunde liegenden vereinfachenden Gleichungen, welche die einzelnen Prozesse beschreiben. Der Anfangszustand, Fläche und Volumen gleich Null, ist gegeben. Der Schlusszustand ist ein Modellinput, nämlich die heutige Ausdehnung und Form des Moores. Die Validierung besteht nun darin, dass die Form des Modells der gemessenen Formentwicklung erstaunlich gut folgt. Die Messung des Hochmoorwachstums ist modellunabhängig und beruht auf der in Kapitel 4 dargestellten Datierung mittels Pollen- und ^{14}C -Analysen.

6. ANWENDUNG AUF DIE REGENERATION

Die in den vorangehenden Kapiteln dargelegten Erkenntnisse lassen sich bei der Planung einer Moorregeneration anwenden. In den Kapiteln 3.3 und 5.1.3 wird gezeigt, dass Hochmoore von einem gestörten Zustand, in welchem das Ökosystem keinen Torf mehr bildet, wieder in einen ungestörten Zustand zurückkehren. Die Geschwindigkeit, mit der diese Rückkehr geschieht, kann mit technischen Massnahmen beeinflusst werden. Diese Beeinflussung wird etwas übertrieben als «Regeneration» bezeichnet. Die Planung und Ausführung einer Regeneration lässt sich in grundlegende Schritte gliedern, und es können Regeln für die einzelnen Massnahmen aufgestellt werden.

Die Berücksichtigung der natürlich ablaufenden Prozesse ist besonders deshalb wichtig, weil nur so eine ökologisch sinnvolle Regeneration möglich ist. Dies ist zugleich auch die ökonomisch günstige Lösung.

6.1. ZUSAMMENFASSUNG DER GRUNDLEGENDEN ERKENNTNISSE

6.1.1. Zeitdauer der Prozesse

In einem Hochmoor können drei wesentliche Prozesse auseinander gehalten werden. Diese Prozesse sind die Vegetationsentwicklung, die Bodenentwicklung und die Gesteinsbildung (Torfbildung). Für jeden dieser Prozesse kann eine Halbwertszeit bestimmt werden. Die Halbwertszeit ist ein Mass für die Dauer der Störung auf das System. Das sich am schnellsten anpassende System ist die Vegetation mit einer Halbwertszeit von einigen Jahren, danach die Bodenentwicklung mit einer Halbwertszeit von einigen Jahrzehnten und zuletzt die Gesteinsbildung, welche eine Halbwertszeit von einigen hundert bis einigen tausend Jahren besitzt. Wegen dieser um Grössenordnungen verschiedenen Halbwertszeiten gibt es nicht eine Regeneration, sondern drei.

6.1.2. Stabilität eines torfbildenden Ökosystems

Sobald organische Substanz an die Luft kommt, der Boden aerober wird, wird die Struktur des Torfes feinkörniger und damit undurchlässiger. Der Wasserspiegel steigt danach relativ zur Bodenoberfläche wieder an und führt

im Endeffekt wieder zur Torfbildung. Dieser Prozess, welcher in Kapitel 5.1.3 simuliert wird, ist entscheidend für die Stabilität des torfbildenden Ökosystems. Er ist die Ursache für die lange Lebensdauer von Mooren und ebenso für ihr erneutes Wachstum nach einer Störung, welche natürlichen oder anthropogenen Ursprungs sein kann. Eine endgültige Störung des torfbildenden Systems erfolgt, wenn sich die hydrologischen Randbedingungen grundlegend ändern, was der Fall sein kann, wenn der Grundwasserspiegel im Mineralboden stark abgesenkt wird.

6.1.3. Wechselwirkung zwischen Vegetation und Wasserhaushalt

Vegetation, Boden- und Gesteinsbildung hängen in einem torfbildenden Ökosystem untrennbar zusammen. Gerade deshalb ist es äusserst wichtig, die einzelnen Prozesse bei einer Regeneration auseinanderzuhalten und die Reaktionen der Prozesse aufeinander zu betrachten.

Einer der häufig missverstandenen Effekte ist das intensive Wachstum von Bäumen in gestörten, entwässerten Mooren. Wie aus der Simulation in Kapitel 5.1.3 hervorgeht, bewegt sich der Wasserspiegel nicht mehr ganz an die ursprüngliche Oberfläche, obwohl sich die hydraulische Leitfähigkeit um zwei Grössenordnungen verringert. Die Differenz zwischen Wasserspiegel und Oberfläche muss verschwinden, damit das Moor wieder wachsen kann und eine typische Hochmoorvegetation entsteht.

Die Differenz kann auf drei Arten zum Verschwinden gebracht werden. Natürlicherweise wird die aerobe Schicht im Laufe der Zeit zersetzt und dünner. Je nachdem, wie stark die Schicht belüftet wird, geschieht die Zersetzung schneller oder langsamer. Die effizienteste Belüftung geschieht durch Bäume. Eine waldartige Vegetation führt also natürlicherweise am schnellsten zum Abbau dieser belüfteten Schicht und zur Wiederherstellung des torfbildenden Systems. Künstlich kann die Schicht verringert werden, indem die Randbedingung verändert wird, das heisst der Wasserspiegel wird in den Gräben angehoben, oder das Moor wird soweit abgetorft, dass der Wasserspiegel wieder an der Oberfläche liegt. Ein Vorteil der Bäume ist, dass ihr Wurzelteller beim Umstürzen schlenkenartige Vertiefungen schafft, welche wassergefüllt das Torfmooswachstum anregen. Der Verlauf des Wasserspiegels bei einer solchen natürlichen Regeneration ist in Schneebeli (1989) dargestellt.

Die in einem entwässerten Moor entstehende waldartige Vegetation ist daher für die Regeneration sehr wesentlich und nicht eine zusätzliche Störung.

6.2. PLANUNG EINER REGENERATION

6.2.1. Grundlagen

Bei den verschiedenen Regenerationsprojekten hat es sich gezeigt, dass ein Plan mit 10, besser 5 m Höhenkurven, eine genaue Aufnahme der hydrologischen Verhältnisse (Bäche, Entwässerungsgräben, Schlucklöcher), eine Torfmächtigkeits-Karte und, je nach Objekt, eine Vegetationskarte notwendig ist. Je nach Komplexität des Objektes muss auch die Entwicklungsgeschichte untersucht werden. Aufgrund von Klimadaten ist die Wasser-Nachlieferung (Niederschlag – Verdunstung) über einen längeren Zeitraum abzuschätzen.

6.2.2. Zielsetzung

Bei einer Regeneration muss der Prozess der Torfbildung im Vordergrund stehen. Werden die Voraussetzungen für die Torfbildung verbessert, so stellen sich die schnelleren Prozesse der Vegetation und des Bodens selbständig ein.

6.2.3. Planung

Vor der Planung muss die für das Objekt spezifische Ursache der Torfbildung bekannt sein. Die geplanten Massnahmen rekonstruieren die ursprüngliche Situation. Die ältesten Moorteile sind deshalb am leichtesten wieder zum Wachstum zu bringen, während es bei jüngeren hydrologisch zunehmend schwieriger wird.

Müssen zum Beispiel Gräben mit Torf aufgefüllt werden, so kann es sinnvoll sein, das Moor zu rekonstruieren. In den jungen Gebieten kann abgetorft werden, um im alten, früher abgetorften Gebiet wieder die Torfbildung in Gang zu bringen.

Am Rand des nicht entwässerten Gebietes ist auch die Wirkung des sich selbst abdichtenden Torfes zu berücksichtigen.

6.2.4. Ausführung

Die Technik der Regeneration lässt sich in grundlegende Schritte gliedern. Die folgenden Regeln erweisen sich bei der Ausführung als nützlich:

- Beim Auffüllen der Gräben die Geschichte des Moores berücksichtigen. Drainagegräben im Mineralboden, welche entwässern, sind deshalb als erste aufzufüllen.

- Staudämme in Gräben sind nur in Gebieten mit weniger als 1% Neigung effizient, in steileren Gebieten ist es viel wirksamer, die Gräben aufzufüllen.
- Wald stehen lassen, da er eine raschere Wiederherstellung der torfbildenden Vegetation bewirkt oder etwa 0.1 bis 0.3 m unter den aktuellen Wasserspiegel abtorfen.

6.3. BEISPIEL

Die vorstehend dargelegten Prinzipien werden am Beispiel des Turbenriet illustriert, welches in Kapitel 2 beschrieben ist.

Die zahlreich vorhanden Gräben im südlichen und südwestlichen Teil, der grosse Torfstichgraben im Süden und die kleineren Torfstiche im südwestlichen Teil durchschneiden das genetisch älteste Gebiet. Der grosse Torfstichgraben liegt östlich in einem relativ spät vermoorten, mächtigen Torfkörper (Abb. 2.1, 2.6 und 2.7, 4.11). Der mittlere, östliche Teil und das nördliche, am höchsten gelegene Gebiet sind intakt. Die Sohle der Gräben liegt im Torf oder nur wenig im Mineralboden, das Gefälle der Gräben ist grösser als 1%. Sie müssen deshalb mit Torf rückgefüllt werden.

Als Torfabbaustelle kommt nur das südöstliche Gebiet in Frage. Da dieses Gebiet um etwa ein bis zwei Meter abgetorft werden kann, können damit alle Gräben, die kleineren Torfstiche und der grosse Abbaugraben wieder aufgefüllt werden.

Die im abgetorften Gebiet gewachsenen Fichten- und Föhrenwälder sind stehenzulassen.

Die durch den Abbau im südöstlichen Teil entstehenden Tümpel ergänzen die noch vorhandenen Schlenken im mittleren, intakten Teil.

- Arbeitskreis für Bodensystematik der DBG (1985) Systematik der Böden der Bundesrepublik Deutschland. Kurzfassung. Mitteilungen Deutsche Bodenkundliche Gesellschaft, 44, 1–90.
- Baden, W. und R. Eggelsmann (1963) Zur Durchlässigkeit der Moorböden. Z. f. Kulturtechnik und Flurbereinigung 4: 226–254.
- Bantle, H. (1988) Niederschlags-Datenbank am RZ-ETH unter dem Betriebssystem NOS/VE: Programmdokumentation und Benutzeranleitung. Schweiz. Meteorologische Anstalt, Abt. F., Zürich.
- Barber, K.E. (1981) Peat Stratigraphy and Climatic Change. A palaeoecological test of the theory of cyclic bog regeneration. Elsevier, Amsterdam.
- Biot, M.A. (1955) Theory of elasticity and consolidation for a porous anisotropic solid. J. Appl. Phys. 26(2): 182–185.
- Birks, H.J.B. (1986a) Late-Quaternary biotic changes in terrestrial and lacustrine environments, with particular reference to north-west Europe. pp. 3–65 In: Handbook of Holocene Palaeoecology and Palaeohydrology. Ed. B.E. Berglund. Wiley, Chichester.
- Birks, H.J.B. (1986b) Numerical zonation, comparison and correlation of Quaternary pollen-stratigraphical data. pp. 743–774 In: Handbook of Holocene Palaeoecology and Palaeohydrology. Ed. B.E. Berglund. Wiley, Chichester.
- Boggie, R. (1977) Water-table depth and oxygen content of deep peat in relation to growth of *Pinus contorta*. Plant and Soil 48: 447–454.
- Bonani, G. H.-J. Hofmann, E. Morenzoni, M. Nessi, M. Suter and W. Wölfli (1986) The ETH/SIN dating facility: a status report. Radiocarbon 28 (2A): 246–255.
- Brandt, S. (1976) Statistical and computational methods in data analysis. 2nd ed., North-Holland, Amsterdam.
- Brutsaert, W. and A. I. El-Kady (1984) The relative importance of compressibility and partial saturation in unconfined groundwater flow. Water Res. Res. 20 (3): 400–408.
- Carslaw, H.S. and J.C. Jaeger (1959) Conduction of heat in solids. 2nd. ed., Clarendon Press, Oxford.
- Chason, D.B. and D.I. Siegel (1986) Hydraulic conductivity and related physical properties of peat, Lost River Peatland, Northern Minnesota. Soil Science 142 (2): 91–99.
- Chatfield, C. (1984) The analysis of time series. 3rd. ed., Chapman and Hall, London.
- Childs, E.C. (1969) An introduction to the physical basis of soil water phenomena. Wiley Interscience, New York.
- Clymo, R.S. (1983) Peat. pp. 159–224 In: A.J.P. Gore: Ecosystems of the World 4A, Mires: Swamp, Bog, Fen and Moor, General Studies. Elsevier, Amsterdam.

- Clymo, R.S. (1984) The limits to peat bog growth. *Phil. Trans. R. Soc. Lond., Ser. B*, 303: 605–654.
- Crank, J. (1984) *Free and moving boundary problems*. Clarendon, Oxford.
- Dracos, T. (1980) *Hydrologie, eine Einführung für Ingenieure*. Springer, Wien.
- Du Rietz, G.E. (1954) Die Mineralbodenwasserzeigergrenze als Grundlage einer natürlichen Zweigliederung der nord- und mitteleuropäischen Moore. *Vegetatio* 5 - 6: 571–585.
- Eggelsmann, R. (1967) Oberflächengefälle und Abflussregime der Hochmoore. *Wasser und Boden* 19: 247–252.
- Eggelsmann, R. und M. Schuch (1980) Moorhydrologie. pp. 210–224 In: Göttlich, K.: *Moor- und Torfkunde*, 2. Aufl., Schweizerbart, Stuttgart.
- Ellenberg, H. (1978) *Vegetation Mitteleuropas mit den Alpen in ökologischer Sicht.* 2., völlig neu bearb. Aufl. Ulmer, Stuttgart.
- Everett, K.R. (1983) Histosols. In: *Pedogenesis and soil taxonomy. II. The soil orders*. Eds. L.P. Wilding, N.E. Smeck and G.F. Hall. Elsevier, Amsterdam.
- Flühler, H. (1973) Sauerstoffdiffusion im Boden. *Mitt. Schweiz. Anstalt Forstl. Versuchswesen* 49: 123–250.
- Foster, D.R., H.R. Wright, Jr, M. Thelau and G.A. King (1988) Bog development and landform dynamics in central Sweden and south-eastern Labrador, Canada. *J. of Ecology* 76: 1164–1185.
- Freeze, R.A. and J.A. Cherry (1979) *Groundwater*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, N.J.
- Frenzel, B. (1983) Mires – repositories of climatic information or self-perpetuating ecosystems? pp. 35–65 In: A.J.P. Gore: *Ecosystems of the World 4A, Mires: Swamp, Bog, Fen and Moor, General Studies*. Elsevier, Amsterdam.
- Friedman, R. M., C. B. DeWit, T. K. Kratz (1979) *Simulating postglacial wetland formation: a quantitative reconstruction of Waubesa Marsh*. IES Rep. 106. Center for Biotic Systems. Institute for Environmental Studies. Univ. Wisconsin, Madison.
- Fuchsman, C.H. (1980) *Peat, industrial chemistry and technology*. Academic Press, New York.
- Gambolati, G. and R.A. Freeze (1973) *Mathematical Simulation of the Subsidence of Venice. 1. Theory*. *Water. Res. Res.* 9: 721–733.
- Granlund, E. (1932) *De svenska högmossarnas geologi*. *Sver. Geol. Unders. Ser. C*, 373: 1–193.
- Hantke, R. (1967) Die würmeiszeitliche Vergletscherung im oberem Toggenburg (Kt. St. Gallen). *Vierteljahresschrift Naturforsch. Ges. Zürich*. 112: 223–242.
- Hayward, P. M. and R. S. Clymo (1982) Profiles of water content and pore size in Sphagnum and peat, and their relation to peat bog ecology. *Proc. R. Soc. Lond., Ser. B*, 215: 299–325.
- Heinselman, M.L. (1970) *Landscape evolution, peatland types, and the environment in the Lake Agassiz Peatlands Natural Area, Minnesota*. *Ecological Monographs* 40 (2): 235–261.
- Hemond, H. F. and J. C. Goldman (1985) On non - Darcian waterflow in peat. *J. of Ecology*. 73: 579–584.

- Hemond, H. F., W. K. Nuttle, R. W. Burke and K. D. Stolzenbach (1984) Surface infiltration in salt marshes: theory, measurement, and biogeochemical implications. *Water Res. Res.* 20: 591-600.
- Henley, S. (1981) *Nonparametric geostatistics*. Applied Science Publishers, Essex, England.
- Henrion, I. (1982) *Untersuchungen zur Entwicklung von Sattelmooeren im Oberharz*. Diss. Univ. Göttingen.
- Ingram, H.A.P (1978) Soil layers in mires: function and terminology. *J. Soil Science*, 29: 224-227.
- Ingram, H. A. P. (1982) Size and shape in raised mire ecosystems: a geophysical model. *Nature*, 297: 300-303.
- Ingram, H. A. P. (1983) Hydrology. pp. 67-158 In: A.J.P. Gore: *Ecosystems of the World 4A, Mires: Swamp, Bog, Fen and Moor, General Studies*. Elsevier, Amsterdam.
- Ivanov, K.E. (1953) *Gidrologiya bolot (Hydrology of mires)*. Gidrometeoizdat, Leningrad.
- Ivanov, K.E. (1981) *Water movement in mirelands*. Academic Press, London.
- Jenny, H. (1941) *Factors of soil formation: A system of quantitative pedology*. McGraw-Hill, New York.
- Kratz, T.K. and C.B. DeWitt (1986) Internal factors controlling peatland-lake ecosystem development. *Ecology*, 67 (1):100-107.
- Kulczynski, S. (1949) Peat bogs of Polesie. *Mém. Acad. Polon. Sci. Lett., Cl. Sci. Math. Nat., Ser. B. Sci. Nat.*, 15: 1-356.
- Kusel - Fetzmann, E. (1982) Hochmoorpflanzen. pp. 411-470 In: *Pflanzenökologie und Mineralstoffwechsel*. H. Kinzel (ed.). Ulmer, Stuttgart.
- Linder, A. und W. Berchtold (1979) *Elementare statistische Methoden*. Birkhäuser, Basel.
- Malmer, N. (1986) Vegetational gradients in relation to environmental conditions in north-western European mires. *Can. J. Bot.* 64: 375-383.
- Middeldorp, A. A. (1984) *Functional palaeoecology of raised bogs - an analysis by means of pollen density dating in connection with the regional forest history*. Diss. Univ. Amsterdam.
- Moore, P.D. (1986) Hydrological changes in mires. pp. 273-312 In: *Handbook of Holocene Palaeoecology and Palaeohydrology*. Ed. B.E. Berglund. Wiley, Chichester.
- Moore, P.D., Merryfield, D.L. and M.D.R. Price (1984) The vegetation and development of blanket mires. pp. 203-235 In: *European mires* (ed. P.D. Moore), Academic Press, London.
- Mosimann, J. E. (1965) Statistical methods for the pollen analyst: multinomial and negative multinomial techniques. In: B. Kummel and D. Raup (ed.) *Handbook of paleontological techniques*. Freeman, San Francisco.
- Murray, W.A. and P.L. Monkmeier (1973) Validity of Dupuit-Forchheimer equation. *J. Hydraulics Division (Amer. Soc. Civil Engineers)* 97(HY9): 1573-1583.
- Oberdorfer, E. (1977) *Süddeutsche Pflanzengesellschaften. Teil I. Fels- und Mauergesellschaften, alpine Fluren, Wasser-, Verlandungs- und Moorgesellschaften*. Gustav Fischer, Stuttgart.

- Olsson, I.U. (1986) Radiometric dating. pp. 273–312 In: Handbook of Holocene Palaeoecology and Palaeohydrology. Ed. B.E. Berglund. Wiley, Chichester.
- Ortsgemeinde Grabs (1879) Übersichtsplan des Wald- und Weidgebietes der Gemeinde Grabs, aufgenommen Sommer 1879, A. Sulser, Ing. Massstab 1: 5000. Archiv Ortsgemeinde Grabs (ohne Nr.).
- Press, W.H., B.P. Flannery, S.A. Teukolsky, W.T. Vetterling (1986) Numerical Recipes. The art of scientific computing. Cambridge University Press, Cambridge.
- Richard, F., P. Lüscher, T. Strobel (1978) Physikalische Eigenschaften von Böden der Schweiz. Band 1. Eidg. Anstalt. forstl. Versuchswesen, Birmensdorf.
- Ringler, A. (1978) Die Hochmoore und Übergangsmoore der Allgäuer Alpen. Lage, Geologie, Morphologie. Telma. 8: 17–74.
- Rycroft, D. W., D. J. A. Williams and H. A. P. Ingram (1975 a) The transmission of water through peat. I. Review. J. of Ecology. 63: 535–556.
- Rycroft, D. W., D. J. A. Williams and H. A. P. Ingram (1975 b) The transmission of water through peat. II. Field experiments. J. of Ecology. 63: 557–568.
- Scheffer, F., P. Schachtschabel (1982) Lehrbuch der Bodenkunde. 11., neu bearbeitete Auflage von P. Schachtschabel, H.-P. Blume, K.-H. Hartge und U. Schwertmann. Enke, Stuttgart.
- Schmeidl, H. M. Schuch, R. Wanke (1970) Wasserhaushalt und Klima einer kultivierten und unberührten Hochmoorfläche am Alpenrand.. Schriftenreihe des Kuratoriums für Kulturbauwesen, 19. München.
- Schneebeli, M. (1988) Die Regeneration des Hochmoores Turbenriet – Gamperfin, Gemeinde Grabs SG. Berichte der Botanisch-Zoologischen Gesellschaft Liechtenstein - Sargans - Werdenberg, 17: 101–223.
- Schneebeli, M. (1989) Zusammenhänge zwischen Moorbewuchs und hydraulischer Durchlässigkeit und ihre Anwendung auf den Regenerationsprozess. TELMA, 19, Beiheft 2: 257–264.
- Schneebeli, M., M. Küttel, J. Fäh (1989) Die dreidimensionale Entwicklung eines Hanghochmoores im Toggenburg, Schweiz. Vierteljahresschrift Naturforsch. Gesellschaft Zürich 134 (1): 1–32.
- Schneider, S. (1980) Verteilung der Moore auf der Erde. p. 52–76 In: Göttlich, K.: Moor- und Torfkunde, 2. Aufl., Schweizerbart, Stuttgart.
- Schuch, M. (1977) Hydrologie der südlichen Chiemseemoore. pp. 265–269 in: Ganss, O., Geol. Karte von Bayern, 1:25 000, Erläuterungen zu Blatt Nr. 8410, Prien am Chiemsee u. Blatt 8141, Traunstein, Bayer. Geol. Landesamt, München.
- Schuch, M. (1980) Physik des Torfes und der Moorböden. pp. 205–210 In: Göttlich, K.: Moor- und Torfkunde, 2. Aufl., Schweizerbart, Stuttgart.
- Smith, G.D. (1985) Numerical solution of partial differential equations: finite difference methods. 3rd ed., Clarendon Press, Oxford.
- Soil Survey Staff (1975) Soil Taxonomy. Agriculture Handbook 436, Washington.
- Solem, T. (1986) Age, origin and development of blanket mires in Sør-Trøndelag, Central Norway. Boreas, 15 (2): 101–115.

- Stuiver, M. and G.W. Pearson (1986) High-precision calibration of the radiocarbon time scale, AD 1950–500 BC. *Radiocarbon* 28 (2B): 805–838.
- Stuiver, M. and P.J. Reimer (1986) A computer program for radiocarbon age calibration. *Radiocarbon* 28 (2B): 1022–1030.
- Swift, M.J., O.W. Heal and J.M. Anderson (1979) Decomposition in terrestrial ecosystems. Blackwell Scientific Publications Oxford.
- Tallis, J.H. (1983) Changes in wetland communities. pp. 311–347 In: A.J.P. Gore: *Ecosystems of the World 4A, Mires: Swamp, Bog, Fen and Moor, General Studies*. Elsevier, Amsterdam.
- Tarantola, A. (1987) *Inverse Problem Theory. Methods for Data Fitting and Model Parameter Estimation*. Elsevier, Amsterdam.
- Taylor, J.A. (1983) The peatlands of Great Britain and Ireland. pp. 1–46 In: A.J.P. Gore: *Ecosystems of the World 4B, Mires: Swamp, Bog, Fen and Moor, Regional Studies*. Elsevier, Amsterdam.
- Tolonen, K., Huttunen, P. and H. Jungner (1985) Regeneration of two coastal raised bogs in eastern North America. Stratigraphy, radiocarbon dates and rhizopod analysis from sea cliffs. *Ann. Acad. Sci. Fenn. Ser. A, III Geologia-Geographica*, 139.
- Troels-Smith, J. (1955) Characterization of unconsolidated sediments. *Dan. Geol. Unders.*, IV Raekke, 3 (10).
- Urfer, Ch., G. Gensler, F. Ambrosetti, E. Zenone (1979) *Klimatologie der Schweiz Band II: Regionale Klimabeschreibungen. 2. Teil: Alpennordhang, Graubünden und Alpensüdseite. Beiheft Annalen Schweiz. Meteorol. Zentralanstalt (Jahrgang 1977)*.
- Vorob'ev, P.K. (1963) Investigations of water yield of low-lying swamps of western Siberia. *Soviet Hydrology* (1963): 226–252.
- Wang, F.H. and M.P. Anderson (1982) *Introduction to groundwater modeling*. Freeman, San Francisco.
- Wickman, F. E. (1951) The maximum height of raised bogs and a note on the motion of water in soligenous mires. *Geol. Fören. Förhandl.*, 73.
- Wildi, O. (1977) Beschreibung exzentrischer Hochmoore mit Hilfe quantitativer Methoden. *Veröff. Geobot. Inst. Eidg. Tech. Hochschule*. 60: 1–128.
- Wildi, O. (1978) Simulating the development of peat bogs. *Vegetatio* 37 (1): 1–17.
- Wildi, O. (1986) Numerische Analyse vegetationskundlicher Daten. *Veröff. Geobot. Inst. Eidg. Tech. Hochschule*. 90: 1–226.
- Withers, B., S. Vipond, K. Lecher (Bearb.) (1978) *Bewässerung*. Parey, Berlin und Hamburg.
- Yeh, W. W-G. (1986) Review of parameter identification procedures in groundwater hydrology: the inverse problem. *Water Res. Res.* 22: 95–108.

1. KOORDINATEN DER MESSPUNKTE IM TURBENRIET

Die Koordinaten der Messpunkte wurden photogrammetrisch bestimmt. Die Koordinaten der auf den Luftbildern nicht sichtbaren Punkte wurden aufgrund der bekannten Distanz (50 m) und Richtung (x -Achse magnetisch Nord-Süd) berechnet, die Höhe aus den 1 m - Höhenkurven des Planes 1:1000 interpoliert. Diese Punkte sind in der vierten Kolonne mit einem * gekennzeichnet. Die Punktnummern 22, 37, 65 wurden markiert, aber nicht weiter verwendet, und sind nicht aufgelistet.

Nr	y	x	z	
1	747153.80	226222.34	1302.43	
2	747152.	226272.0	1306.5	*
3	747151.40	226323.55	1309.60	
4	747147.	226376.	1312.2	*
5	747146.	226425.	1314.5	*
6	747144.	226477.	1317.1	*
7	747145.20	226523.95	1319.60	
8	747143.70	226532.05	1322.95	Punkt nur auf Luftbild
9	747206.15	226274.05	1312.2	
10	747203.1	226325.8	1314.15	
11	747201.6	226376.95	1316.3	
12	747200.05	226428.85	1316.35	
13	747197.9	226481.15	1320.0	
14	747196.8	226533.0	1321.7	
15	747194.8	226585.15	1325.2	
16	747194.00	226637.05	1327.8	
17	747191.4	226689.25	1331.31	
18	747185.	226742.	1336.	*
19	747186.	226792.	1345.	*
20	747185.6	226844.5	1352.	*
21	747185.20	226897.00	1354.25	
23	747258.9	226223.2	1310.5	
24	747257.05	226275.45	1314.7	
25	747254.95	226327.7	1314.9	
26	747253.05	226377.8	1317.45	

A-2

27747251.5	226428.8	1319.15	
28747249.6	226480.8	1321.4	
29747248.3	226533.5	1323.65	
30747246.6	226585.15	1325.8	
31747244.95	226637.55	1330.65	
32747244.05	226690.95	1333.75	
33747241.8	226742.1	1338.65	
34 747238.	226796.	1344.5	*
35747238.35	226845.7	1355.7	
36747237.85	226898.55	1355.3	
38 747309.	226224.	1311.5	*
39747308.2	226276.9	1315.5	
40747306.5	226328.75	1317.	
41747305.3	226379.25	1317.55	
42747303.5	226430.45	1319.35	
43747302.1	226483.05	1322.6	
44747300.45	226535.3	1323.8	
45747298.75	226587.85	1325.2	
46747297.15	226639.75	1328.75	
47747295.5	226692.0	1332.9	
48747293.9	226744.15	1336.4	
49747291.2	226794.	1341.5	*
50747290.8	226847.3	ca 1346.	*
51747287.9	226898.5	ca 1351.	*
52747359.65	226278.51	1313.95	
53747358.05	226329.75	1317.	
54747357.65	226380.7	1317.65	
55747356.15	226430.30	1318.5	
56747354.4	226483.4	1320.5	*
57747352.55	226536.5	1323.3	
58747351.65	226589.05	1322.65	
59747350.4	226641.05	1325.2	
60747348.15	226693.4	1329.4	
61747345.55	226746.65	1334.	
62747340.4	226794.1	1338.9	
63747343.2	226848.85	1343.1	
64747338.0	226898.35	1342.65	
66747409.1	226331.05	1315.2	
67747409.85	226382.38	1318.05	
68747407.45	226434.4	1315.1	
69747406.1	226483.1	1318.5	*
70747405.20	226583.95	1321.1	
71747401.0	226696.0	1329.8	*
72 747462.	226332.	1315.5	*
73 747461.	226385.	1319.1	*
74 747459.	226438.	1318.	*
75 747489.	226458.	1315.5	*

NIEDERSCHLAGSMESSUNGEN IM TURBENRIET

Die Niederschlagsmessungen wurden vom 1. Juli (Tag 183) bis zum 29. August 1984 (Tag 242) mit einem automatischen Niederschlagsmesser mit Wippe in bodeneben aufgestellter Lage durchgeführt (Koordinaten 747250.5 / 226349.5).

Tag	N [mm/Tag]	Tag	N [mm/Tag]	Tag	N [mm/Tag]
183	0	204	1.7	225	1.5
184	29.3	205	0.	226	7.4
185	27.4	206	0.	227	0.1
186	2.8	207	14.8	228	0.
187	1.6	208	39.9	229	1.5
188	0.	209	4.3	230	0.
189	0.	210	5.2	231	0.
190	0.	211	0.1	232	0.
191	0.	212	0.	233	0.
192	0.	213	0.	234	0.1
193	0	214	4.8	235	0.1
194	4.5	215	0.1	236	0.1
195	0.1	216	0.	237	3.5
196	0.	217	0.	238	7.1
197	31.2	218	18.4	239	3.1
198	14.7	219	0.1	240	0.0
199	4.6	220	0.	241	0.
200	0.4	221	4.5	242	0.
201	0.	222	0.2		
202	0.	223	22.3		
203	0.	224	25.1		

C.1 STRATIGRAPHISCHE TABELLEN

Die nachfolgenden Tabellen entsprechen der Datei, welche für die stratigraphischen Darstellungen benutzt wurde.

ABKÜRZUNGEN

In der nachfolgenden Tabellen werden die folgenden Abkürzungen für die Haupt- und Nebenkomponten sowie die Makroreste gebraucht:

ALH	Ainus-Holzreste	NST	Nadel-Streu
BRM	Braunmoose	ORG	Organisches Material
CAL	Carex limosa		(torfig)
ERR	Ericaceen-Reiser	PHR	Phragmites-Reste
EVA	Eriophorum vaginatum	PIN	Picea-Nadeln
HOL	Holzreste (indet.)	PSN	Pinus-Nadeln
HUM	Humus (Mull)	RIN	Rinden (indet.)
MEN	Menyanthes-Samen	SCH	Scheuchzeria palustris
MOD	Moder	TON	Ton
MST	Molinia-Streu	UEB	Übergang Torf-Ton

Die Probennummern entsprechen den Messpunktnummern, der Zersetzungsgrad ist nach vonPost.

Treten Haupt- und Nebenkomponten auf, ist ihr anteilmässiges, von Auge geschätztes Verhältnis nach der Abkürzung in Quartilen angegeben.

Für die zeichnerische Darstellung wurden folgende Bestandteile als organisches Material zusammengefasst: ALH, HOL, MOD, MST, NST, ORG, PSN.

STRATIGRAPHISCHE TABELLEN

Probe Nr.	Tiefe ab	Zers. Grad	Haupt-komp.	Neb.-komp.	Makroreste	Bemerkungen, Farbe	
3	0		NST		PIN		
	3		MOD3	HUM1			
	7		EVA2	HUM2	EVA	MITTEL ZERS.	
	24		EVA2	TON2		UEB	
	26		TON			BRAUNGRAU	
	40						
4	0		SPH3	BRM1	PIN, BL	BLÄTTER v. VACC.	
	3	3	SPH3	ERR1	EVA		
	12	3-4	SPH2	EVA2	ERR		
	19	4	EVA3	ERR1	SPH		
	42	5	EVA3	ERR1	MEN, CAL, ALH		
	50	6-7	EVA3	SPH1	MEN, CAL	BREIIG	
	73	7	EVA3	SPH1	ALH	BREIIG, FEUCHT	
	91	8	EVA2	SPH2	ALH		
	100		ORG2	TON2	ALH		
			FASERIG; DUNKELBRAUN				
	110		ORG2	TON2		UEB; SCHWARZ	
	115		TON3	ORG1			
			FASERIG; DUNKELBRAUN				
	150						
5	0	1	SPH		SPH	SPH-ACUTIF-GR	
	9	1-2	SPH		EVA		
	15	3	SPH2	EVA2	SPH, EVA	RELAT. TROCKEN	
	30	3	EVA2	SPH2	ERR, MEN, RIN, CAL	VEREINZ. HOL 1CM	
	40	3	EVA2	SPH2	HOL, CAL, MEN		
	50	4	EVA3	SPH1	HOL, CAL, MEN, 1CM	PIN	
	67	4	EVA3	SPH1	CAL, ALH		
	75	5	EVA3	SPH1	ALH, PHR		
	80	5	EVA3	SPH1	HOL		
	90	4	EVA		SPH, PHR, HOL		
	105	4	EVA		SPH, CAL, ERR, ALH, PHR		
	115	4	EVA		SPH, HOL, SCH		
	125	4	EVA		SCH, ERR, HOL	2CM, VIEL SCH	
	135	3-4	EVA		SCH, HOL		
	144		HOL			HOLZHORIZONT	
	147	4	EVA		HOL, SCH		
	151	3-4	EVA		SCH, MEN		
	160	3	EVA		SCH, CAL		
	170	3	EVA		SCH, ERR		
	190	3-4	EVA		SCH		
	202	3-4	EVA		SCH, MEN, HOL		
	220	4	EVA		HOL, ALH, MEN		
	236	4	EVA		HOL, MEN		
	240	4	EVA				
	250	5	EVA		HOL		
	260	6	EVA				
	271		EVA2	TON2		UEB	

C-3

273		TON		SCH		
275						
Probe Nr.	Tiefe ab	Zers. Grad	Haupt-komp.	Neb.-komp.	Makroreste	Bemerkungen, Farbe
6	0		NST		PIN	
	3		MOD			FEIN ZERS. MOD
	12		MOD			FEIN ZERS. MOD
	20		MOD			FEIN ZERS. MOD
	22		MOD			SCHMIERIGER MOD
	27		MOD3	TON1		
	29		MOD2	TON2	SPH	GUT ERH. SPH
	39		MOD		EVA, SCH	
	45	3	EVA3	SCH1	CAL, SCH, HOL	WENIG HOL
	50	3-4	EVA		SCH, CAL	
	60	3-4	EVA		ERR, SCH	
	70	4	EVA		SCH, CAL, PHR, SPH	
	80	4	EVA3	SPH1	ERR, SCH	
	90	3	EVA3	SPH1	ERR, SCH	GROSSE EVA
	100	3-4	EVA3	SPH1	ERR, SCH	
	105	4	EVA		ERR, SCH	
	115	4	EVA		SCH, ALH	
	125	4	EVA		SCH, HOL	
	135	4	EVA3	SCH1	SCH	
	145	4	EVA		SCH, HOL	1CM
	150	5	EVA		ERR	SCHLAMM
	155	6	EVA		HOL	
	165	7	EVA		EVA	
	175	5-4	EVA		EVA	SCHLAMM TROCKEN
	185	4	EVA		EVA	SCHLAMM NASS
	195	4	EVA		EVA	SCHLAMM TROCKEN
	200	4	EVA			
	225	4	EVA			
	236		EVA2	TON2		UEB
	240		TON			D.-GRAU
	250					
Probe Nr.	Tiefe ab	Zers. Grad	Haupt-komp.	Neb.-komp.	Makroreste	Bemerkungen, Farbe
9	0		SPH		ERR, EVA, MOD	KR MELIGER MOD
	5	2	SPH		ERR, EVA, SCH	
	10	3	SPH		ERR, REZ. WURZELN	
	15	4	SPH		EVA, ERR, PIN	
	25	5	SPH3	EVA1		
	28	5	EVA		HOL	ALNUS-ZAPFEN
	29	5-4	EVA		HOL	1CM
	35	4	EVA		HOL, SCH	
	50	4	EVA		SCH	LANGE SCH
	90	3	EVA		MEN	102: SAMEN
	112	4	EVA		HOL, RIN, EVA	
	124	3	EVA		SCH, MEN, CAL	
	127	4	EVA		HOL	
	152	5	EVA		PIN	
	154	5	EVA		HOL, SCH	
	168	5	EVA			
	185	6-7	EVA		HOL	
	190	7	EVA			
	200	7	EVA		EVA	SCHMIERIG
	230		EVA2	TON2	HOL	
	237		TON3	ORG1	SAN	
	247		TON			BRAUNGRAU
	260					

C-4

Probe Nr.	Tiefe ab	Zers. Grad	Haupt-komp.	Neb.-komp.	Makroreste	Bemerkungen, Farbe
10	0		SPH		ERR	REZENT
	5	1	BRM2	SPH2	ERR	
	20	6	SPH3	BRM1	ERR	
	25	7	SPH3	EVA1		
	33	4	SPH2	EVA2	EVA, ERR, SCH	
	43	5	EVA		EVA, ERR, SPH	
	50	7	SPH3	EVA1	EVA	
	60	5	SPH2	EVA2		
	65	4	EVA3	SPH1		
	70	4-5	EVA3	SPH1	ALH, EVA	1CM
	80	5	EVA3	SPH1	EVA, HOL	
	95	6	EVA2	SPH2	EVA, ALH	1CM
	100	4	EVA3	SPH1	EVA, SCH	VIEL SCH
	120	4	-3	EVA		SCH, ERR
	130	3-4	EVA		EVA, ALH, SCH	
	152		HOL			
	153	4	EVA		SCH	
	160	4-3	EVA		SCH, ERR	179:PIN
	190	3-4	EVA3	SPH1	ERR, ALH, SCH	
	200	4	EVA3	SPH1	EVA, ERR	213:SAMENSCHALE X
	225	5	EVA		ERR, SCH	
	255	4	BRM2	EVA2	ALH	
	260	4	EVA3	SPH1	ALH, CAL	
	265	5	BRM3	EVA1	CAL, EVA, ERR	
	275	5-4	EVA3	BRM1	ERR, MEN, SCH	
	285	4	EVA		BRM, SCH, CAL	
	300	4	EVA3	SPH1		
	310	5	BRM2	EVA2		
	317	5-4	EVA		ALH, RIN, SCH	
	319	4	EVA		ALH	3CM
	330	5	EVA		EVA	
	340	6	EVA			KOMPAKT
	350	7	EVA		ALH	BREIARTIG
	360	5	EVA		EVA, PHR	KOMPAKT
	370	5-4	EVA		ALH, PHR, SCH	
	400	5	EVA		PHR, SCH, EVA	
	410	6	EVA		ALH, PHR, SCH	FEUCHTER
	420	6	EVA		PHR, SCH, HOL	1CM; HORIZONTAL
	455	5	EVA			HORIZ. GESCH.
	481		EVA2	TON2		UEB
	482		TON			BRAUNGRAU
	490					

Probe Nr.	Tiefe ab	Zers. Grad	Haupt-komp.	Neb.-komp.	Makroreste	Bemerkungen, Farbe
11	0		BRM			PLEUR. SCHREBERI
	1		NST		ERR	
	2	1	MOD		ERR	
	12	3	EVA		EVA, SCH, ERR	
	20	3	SPH3	EVA1	SCH, ERR, EVA	
	27	3-4	SPH3	EVA1	SCH, ERR, CAL	
	45	4	SPH2	EVA2	SCH, ERR, EVA	
	50	5	EVA		CAL, MEN, SCH, EVA, ERR	FEUCHTER
	55	5	EVA		CAL, SCH, BRM	
	65	6	SPH2	EVA2	CAL, SCH, ERR	
	75	5	SPH2	EVA2	CAL, SCH, ERR	
	92		ALH			
	95	5	EVA		CAL, EVA	
	100	4	EVA		HOL	
	110		HOL			4, 5CM
	114	5-6	EVA			SCHWARZ

C-5

	118		EVA2	TON2		
	121		TON			BRAUNGRAU
	147		TON			BLAUGRAU
	150					
Probe Nr.	Tiefe ab	Zers. Grad	Haupt-komp.	Neb.-komp.	Makroreste	Bemerkungen, Farbe
12	0		SPH			REZENT
	5	6			ALH, SCH	
	60	6-5			MEN, HOL, ERR	REZ. POLYTRICHUM
	63	5			EVA, ERR	
	72	5-4			SPH, ERR, EVA	PICEA-KNOSPEN
	75	4	EVA		EVA, SCH, ERR	WIRR VERFL.
	90	4	EVA3	SPH1	EVA, SCH	
	100		EVA3	TON1	ORG	
	103		TON3	EVA1	ORG	
	114		TON			BRAUNGRAU
	135		TON			HELLGRAU
	150					
Probe Nr.	Tiefe ab	Zers. Grad	Haupt-komp.	Neb.-komp.	Makroreste	Bemerkungen, Farbe
13	0		SPH			REZENT
	5	1-2	SPH		SPH, ERR	
	25	3	SPH2	EVA2	EVA, ERR	
	40	4	EVA2	SPH2	ERR, EVA	TROCKEN
	60	4	EVA		EVA, ERR, SCH	TROCKEN
	100	4-5	EVA		EVA, SCH	KOMPAKT
	110	5	EVA		EVA, SCH, ALH	FEUCHTER
	150	5-6	EVA		SCH, ALH	2CM
	200	7	EVA		EVA, ALH	225: MEN/235: SCH
	237	5	BRM		BRM	
	239	6-7	EVA		EVA	
	274	7	EVA		PHR, ALH	
	287	7	EVA		PHR, SCH, ALH	3CM
	300	6	EVA		PHR, EVA, SPH	
	318	6	EVA		EVA	TROCKEN
	338	6-7	EVA		EVA, HOL	BREIARTIG
	360	7	EVA		EVA	, ALH
	375	7	EVA		EVA, ERR, ALH	2CM
	400	7	EVA		EVA, SCH, MEN	
	405	7	EVA		EVA, ALH	1CM
	422	7-6	EVA			KOMPAKT
	474	6	TON			D.-GRAU
	478		TON2	EVA2		UEB, SCHWARZ
	482		TON			KIESEL
	490					
Probe Nr.	Tiefe ab	Zers. Grad	Haupt-komp.	Neb.-komp.	Makroreste	Bemerkungen, Farbe
14	0		NST			
	5		MOD		ERR, WUR	
	20	6	EVA2	SPH2	EVA, SPH	
	30	5	EVA		EVS, SCH	KL. KIESEL
	65	6	EVA			
	73		EVA2	TON2		UEB
	74		TON			GRAUBRAUN
	100					
Probe Nr.	Tiefe ab	Zers. Grad	Haupt-komp.	Neb.-komp.	Makroreste	Bemerkungen, Farbe
15	0		SPH2	BRM2	SPH, BRM, PIN	POLYTRICHUM
	3	3	SPH2	EVA2	SPH, EVA	EVA 10CM LANG

C-6

	20	4	SPH2	EVA2	ERR, EVA, SPH	
	25	5	EVA3	SPH1	ERR, HOL	1CM
	35		NST3	EVA1	PIN	
	36	6	EVA		ERR, ALH	1,5CM
	65	5	EVA			
	75		EVA2	TON2		UEB
	76		TON			GRAUBRAUN
	85					
Probe Nr.	Tiefe ab	Zers. Grad	Haupt-komp.	Neb.-komp.	Makroreste	Bemerkungen, Farbe
16	0		BRM		BRM	REZENTE BRM
	2	4	SPH2	EVA2	EVA	
	10	5-6	EVA3	SPH1	EVA, ERR, HOL	TROCKEN
	35	5-4	EVA		EVA	47:PHR
	50	3	EVA		PHR	
	68	4	EVA			BRAUN
	75		EVA2	TON2		GRAUBRAUN
	89		TON		PHR	GRAU
	100					
Probe Nr.	Tiefe ab	Zers. Grad	Haupt-komp.	Neb.-komp.	Makroreste	Bemerkungen, Farbe
20	0		SPH			REZENT
	10	4	EVA3	SPH1	WUR	
	25	5	EVA			
	40		TON2	EVA2		
	42		TON			GRAUBRAUN
	50					
Probe Nr.	Tiefe ab	Zers. Grad	Haupt-komp.	Neb.-komp.	Makroreste	Bemerkungen, Farbe
21	0		SPH		PIN	REZENTE SPH
	5	2	SPH		ERR	
	12	2-3	SPH		ERR	
	20	7	SPH		ERR	
	25	2	SPH		ERR	REZENTE SPH
	28	4-5	SPH2	EVA2		
	32	5	EVA		EVA, ERR	HORIZONTAL
	40	5-6	EVA		SCH, ERR	HORIZONTAL
	50	6	EVA		SCH, EVA, ERR, SCH	KOMPAKT
	85	6	EVA		EVA	GROSSE EVA
	95	6	EVA		SCH, ERR	KOMPAKT
	117		EVA		HOL	1CM
	122		EVA2	TON2	HOL	
	123		TON		ORG	GRAUBRAUN
	150					
Probe Nr.	Tiefe ab	Zers. Grad	Haupt-komp.	Neb.-komp.	Makroreste	Bemerkungen, Farbe
23	0		SPH3	BRM1	BRM	POLYTRICHUM
	15	3	SPH			HELLBRAUN
	37	5	SPH2	EVA2		DUNKELBRAUN
	42		EVA2	TON2		
	43		TON			GRAUBRAUN
	50					
Probe Nr.	Tiefe ab	Zers. Grad	Haupt-komp.	Neb.-komp.	Makroreste	Bemerkungen, Farbe
24	0		SPH		ERR	REZENT
	9	1	SPH		SPH	
	19	2-3	SPH		SPH, EVA, ERR	SEHR NASS
	35	3	SPH3	EVA1	SPH, WUR, ERR	NASS

C-7

40	5-6	SPH2	EVA2	ERR, EVA, HOL	1CM; ANDROMEDA-
50	6	EVA3	SPH1	EVA, HOL, SCH	BRAUN
70	5	EVA3	SPH1	EVA, HOL	DUNKELBR, TROCKEN
80	5	EVA		EVA, ERR	
100	3	EVA3	SCH1	ERR, EVA, SCH	
110	3	EVA		ERR, SCH	
115	4	EVA		SCH	
120	6	EVA			
124		TON3	EVA1		
126		TON		ORG	BRAUNGRAU
150					

Probe Nr.	Tiefe ab	Zers. Grad	Haupt-komp.	Neb.-komp.	Makroreste	Bemerkungen, Farbe
25a	0		EVA3	SPH1	EVA	
	15	3	SPH3	EVA1	EVA	
	18	3-4	SPH3	EVA1	EVA	
	33	4	EVA3	SPH1	ERR, WUR	
	53	4-3	EVA3	SPH1	SCH, ERR	
	58	3	EVA3	SPH1	ERR, WUR, HOL	
	88	3	EVA3	SPH1	SCH	
	97	3-4	EVA3	SPH1	SCH, ERR	
	108	4	EVA		HOL	
	117	4	EVA3	SCH1	SPH, ERR	
	120	5	EVA2	SPH2		
	123	7	EVA3	SPH1	ERR	
	126	5	EVA3	SPH1		
	132	4	EVA3	SPH1	CAL	
	157	4-3	EVA		EVA	
	162	3	EVA		EVA	DICHT
	168	3	EVA3	BRM1	CAL, SCH	
	176	3	BRM3	EVA1	SCH, CAL, ERR	
	183	3	EVA3	BRM1	ERR, SCH, CAL	
	192	3	BRM3	EVA1	ERR, CAL	
	197	3	EVA3	BRM1	SCH, CAL	
	202	3	BRM3	EVA1	EVA	
	208	3	EVA3	BRM1	SCH, HOL, CAL	
	217	3-2	EVA3	BRM1	SCH, CAL, EVA	
	241	2-3	EVA3	BRM1	EVA, CAL, SCH	
	248	2-3	EVA3	BRM1	CAL, CAR	
	255	2-3	BRM3	EVA1	CAL, BRM	
	263	2-3	EVA3	BRM1	CAL, BRM, EVA	
	267	3	EVA3	BRM1	CAL, EVA, PIN	2VERSCH. BRM
	272	3	EVA		EVA, CAL, SCH	
	279	3	EVA		EVA, MEN	
	288	3	EVA		MEN, PHR	3CM LANG
	290	3	EVA		EVA, MEN, HOL	
	295	3	EVA		EVA, MEN	
	306	3	EVA		EVA	
	317	4	EVA		ALH	1CM
	321	4-5	EVA		EVA	
	327	5-4	EVA			
	332	4	EVA		EVA	FASERIG
	337	4	EVA2	HOL2	HOL	3CM
	342	3	EVA2	HOL2		
	347	4	EVA3	HOL2		FASERIG
	353	5	EVA		EVA, HOL	
	355	5	EVA3	HOL1		
	362	6	EVA		EVA, HOL	
	371	5	EVA		EVA	
	377	4	EVA		HOL	3CM LANG
	382	4	EVA		HOL	KOMPAKT
	398	4	EVA3	PHR1	PHR, EVA	2X2CM

C-8

402	5	EVA3	HOL1	HOL	1CM; HORIZONTAL
413	4	PHR2	EVA2	PHR, EVA, HOL	2X2CM; HORIZ.
420	4	EVA2	HOL2	EVA, HOL	
438	4	EVA3	HOL1		
448	5-6	ORG3	TON1	EVA	
457	7-8	ORG2	TON2	EVA, HOL	UEB
465		TON3	ORG1	EVA	DUNKELBRAUN
483		TON		ORG	BRAUNGRAU
492		TON			GRAU MIT WEISSEN
510		TON			KIESELN 1,5CM

Probe Nr.	Tiefe ab	Zers. Grad	Haupt- komp.	Neb.- komp.	Makroreste	Bemerkungen, Farbe
26	0		NST3	ERR1	BRM, SPH, BL	VACC. ULIG.
	3	1	SPH		SPH, ERR	LOCKER
	16	2	SPH3	EVA1	SPH, ERR	
	21	3	SPH2	EVA2	SPH, EVA	WIRR
	33	5	EVA3	SPH1	EVA, ERR, HOL	TROCKEN
	50	6	EVA		EVA, SCH	FEUCHT
	100	5-4	EVA		EVA, ERR, SCH	
	125	4	EVA		EVA, ERR, SCH, BRM	
	130	4	EVA2	BRM2	EVA, BRM, CAL	
	138	4	EVA		EVA, ERR, SCH	
	182	4	EVA		EVA, ERR, HOL, SCH	
	200	4	EVA		EVA, ERR, CAL, SCH	FEUCHT
	241	5	EVA		EVA, SCH	BREIIG
	257		HOL			
	258		EVA		EVA, SCH	BREIARTIG
	275		EVA		HOL, RIN, EVA	BRÜCHIG
	276	7-8	EVA		EVA, TON	
	301		EVA2	TON2		UEB
	303		TON3	ORG1		BRAUN
	319		TON			BRAUNGRAU
	328		TON			GRAU
	350					

Probe Nr.	Tiefe ab	Zers. Grad	Haupt- komp.	Neb.- komp.	Makroreste	Bemerkungen, Farbe
27	0		SPH3	BL	1	BL ANDROMEDA
	7	1-2	SPH		ERR, SPH	LOCKER
	33	5-6	SPH3	EVA1	SPH, EVA, ERR, CAL	
	50	5	EVA3	SPH1	EVA, ERR	
	63	6	EVA		EVA, MEN	
	80	7	EVA		EVA, SCH	
	100	7	EVA		EVA, HOL	
	144		EVA2	TON2		UEB
	146		TON			BRAUNGRAU
	150					

Probe Nr.	Tiefe ab	Zers. Grad	Haupt- komp.	Neb.- komp.	Makroreste	Bemerkungen, Farbe
28	0		SPH		SPH, BRM, BL	POLYTR. /VACC.
	10	1	SPH		SPH, BRM	POLYTR. ; LOCKER
	29	7	SPH		HOL	BREIARTIG
	39	1	SPH		SPH, SCH	SUBREZ. SPH
	40	4	SPH3	EVA1	EVA, SPH, ERR, HOL	
	48	4	SPH3	EVA1	EVA, SPH	
	57	4-3	SPH2	EVA2	EVA	
	68	6	EVA		EVA, ERR, SCH, HOL	
	100	7	EVA		EVA, SCH	
	108		HOL3	EVA1	EVA	
	112	6	EVA		EVA, SCH	
	164		HOL3	EVA1	EVA	

C-9

	167	6	EVA		EVA, SCH	
	200	7	EVA		EVA, ERR, SCH, MEN, HOL	
	250	7	EVA3	SPH1	EVA	
	278	7	EVA3	BRM1	EVA, BRM	
	280	6	EVA		EVA	
	341	7	EVA		EVA, HOL, SCH, ALH	328:ALH; BREIIG-
NASS	350	7	EVA		EVA, HOL	
	380	7	ORG3	TON1		
	390	7	TON3	ORG1		UEB
	415		TON			418: SANDBAND; GRAU
	425					M. HELLEN KIESELN

Probe Nr.	Tiefe ab	Zers. Grad	Haupt-komp.	Neb.-komp.	Makroreste	Bemerkungen, Farbe
29	0		SPH3	ERR1		REZENT LOCKER
	3	1	SPH		SPH, ERR, EVA	
	9	2-3	SPH3	EVA1	EVA, SPH, HOL	
	28	3	SPH		SPH, ERR, EVA	SPH: SUBREZENT
	31	3-4	EVA2	SPH2	EVA	
	35	6	EVA2	SPH2	EVA, SPH, ERR	
	58	4	EVA2	SPH2	EVA, SCH, ERR, MEN, BRM	
	100	3	EVA		EVA, SCH	114: HOL 2CM
	135	4	EVA		EVA, SCH	
	140	4-5	EVA3	SPH1	EVA, SCH	
	180	4-5	EVA		EVA, SCH, ERR	
	200	4-5	EVA3	SPH1	EVA, SCH	
	216	4	EVA2	SPH2	BRM, EVA, SPH	
	218	4	EVA		EVA, ERR, SCH	
	238	4	ALH3	MEN1	SCH, MEN, ALH	
	239	4-5	EVA		ALH, SCH, MEN, CAL	
	250	6-7	EVA		SCH, CAL, ALH	WÄSSERIG
	290	8	EVA3	ERR1	ERR, HOL	WÄSSERIG
	294		HOL			
	300	6	EVA3	ERR1	EVA, HOL	
	326	8	EVA3	ERR1	EVA, HOL, TON	
	366		EVA2	TON2		UEB; TROCKEN
	379		ORG3	TON1		SCHWARZ
	380		TON			GRAUBRAUN; SANDIG
	400					

Probe Nr.	Tiefe ab	Zers. Grad	Haupt-komp.	Neb.-komp.	Makroreste	Bemerkungen, Farbe
30	0		MOD3	ERR1		
	5	1-2	SPH		HOL, ERR	
	9	5	SPH		ERR, EVA	
	29	5-6	SPH		EVA, ERR, HOL	
	38	6	EVA		EVA, HOL	44: SPH SUBREZENT
	50	7	EVA			DUNKELBRAUN
	94		EVA2	TON2		UEB
	96		TON3	ORG1		DUNKELBRAUN
	100					

Probe Nr.	Tiefe ab	Zers. Grad	Haupt-komp.	Neb.-komp.	Makroreste	Bemerkungen, Farbe
31	0		BRM		BL	VACC. BL
	2		MOD3	ERR1		
	6	2	SPH		SPH, ERR	
	9	3	SPH2	EVA2	SPH, EVA, ERR	
	17	5-6	EVA		SPH, EVA, ERR	
	50	6	EVA		EVA, SCH, ALH	TROCKEN
	100	6	EVA		EVA, SCH	FEUCHT
	141	7	EVA		EVA, ALH	142/179: PHR

C-10

185			EVA2	HOL2	ALH	
192	7		EVA		EVA, PHR	BREIIG
200	7-6		EVA		EVA, PHR	HORIZONTAL
239	6		EVA		HOL	
243	7-8		EVA		HOL	
250			EVA2	TON2		UEB
253			TON3	ORG1		GRAUBRAUN
259			TON2	HOL2		
264			TON3	ORG1		GRAUBRAUN
269			TON			GRAU
300						

Probe Nr.	Tiefe ab	Zers. Grad	Haupt- komp.	Neb.- komp.	Makroreste	Bemerkungen, Farbe
32	0		SPH2	MOD2	ERR	REZENT
	4	3-4	SPH		SPH, ERR	LOCKER
	13	4-5	TON3	ORG1	ERR	
	26	6-7	EVA		ERR, EVA, CAL	
	37	6	EVA3	SPH1	EVA, HOL, SCH, ERR	
	65	6	EVA		EVA, SCH, HOL	
	100	6-7	EVA		EVA	
	118	7	EVA		ERR, EVA, SCH	NASS, BREIIG
	150	7-8	EVA		EVA, ERR, ALH	FEUCHT
	173	7	SPH		ERR, SPH	
	176	7-8	EVA		EVA, SCH, ALH	
	200		EVA		EVA, ALH	WÄSSERIG
	229		ALH3	EVA1		2CM
	235	8	EVA3	ALH1	ALH, TON	BREIIG
	242		EVA		EVA, TON	
	248	5-6	EVA3	ALH1	SCH	
	266	7	ORG3	TON1	HOL, SCH, PHR	278: PHF
	280		ORG2	TON2	PHR	UEB
	286		TON			BRAUNGRAU
	296		TON			DUNKELGRAU
	300					

Probe Nr.	Tiefe ab	Zers. Grad	Haupt- komp.	Neb.- komp.	Makroreste	Bemerkungen, Farbe
35	0		BRM2	SPH2		REZENT
	2		MOD		ERR, SPH	
	15		MOD2	TON2		
	16	7	SPH2	EVA2	SPH	
	28		SPH			SPH: SUBREZENT
	29	4	SPH2	EVA2	EVA, SCH	
	61	7	EVA		EVA	
	72		TON2	ORG2		UEB; BRAUNGRAU
	74		TON			GRAU
	82					

Probe Nr.	Tiefe ab	Zers. Grad	Haupt- komp.	Neb.- komp.	Makroreste	Bemerkungen, Farbe
36	0		SPH3	ERR1		REZENT
	5	2	SPH		SPH, ERR	LOCKER
	9		SPH		SPH	SUBREZENT
	12	3	SPH		SPH, ERR	
	16	7	SPH3	TON1	ERR	
	21	4	SPH2	EVA2	EVA, ERR	
	28	5	SPH		SPH	
	29	5-6	EVA		EVA, SCH	
	50	6	EVA		EVA	
	88	6	EVA		EVA, SCH	
	114		TON2	ORG2		UEB

C-11

		115	TON		ORG	GRAUBRAUN		
		135						
Probe Nr.	Tiefe ab	Zers. Grad	Haupt-komp.	Neb.-komp.	Makroreste	Bemerkungen, Farbe		
39	0		SPH2	BRM2	BL	VACC.; POLYTRICH.		
	4	3	SPH		SPH, ERR, HOL	LOCKER		
	17	3	SPH		ERR, SPH			
	21	7	SPH3	EVA1	SPH, ERR, TON	BREIIG		
	34	7-8	EVA		EVA, SCH, ERR			
	67		ALH3	EVA1		2CM		
	68	8	EVA3	TON1				
	71		ORG2	TON2		UEB		
	73		TON			BRAUN		
	75		TON			GRAU		
	80							
Probe Nr.	Tiefe ab	Zers. Grad	Haupt-komp.	Neb.-komp.	Makroreste	Bemerkungen, Farbe		
40	0		SPH3	ERR1		REZENT		
	4	2	SPH		SPH, ERR	LOCKER; D. BRAUN		
	16	3	SPH		SPH, ERR, EVA	LOCKER; HELLBRAUN		
	24	3	SPH3	EVA1	SPH, EVA	HELLBRAUN		
	33	4	EVA3	SPH1	EVA	DUNKELBRAUN		
	57	5	EVA3	SPH1	EVA, SCH, ALH			
	112	6-7	EVA		EVA	BREIIG		
	150	5	EVA3	ERR1	EVA, SCH			
	162	6	EVA		SCH, ERR, HOL			
	170	5	EVA		ERR			
	175		EVA2	TON2		UEB		
	177		TON		ORG	BRAUN		
	195		TON			BRAUNGRAU		
	200							
Probe Nr.	Tiefe ab	Zers. Grad	Haupt-komp.	Neb.-komp.	Makroreste	Bemerkungen, Farbe		
41	0		MOD2	MST2				
	7	5	SPH		SPH, ERR	LOCKER		
	14	5	SPH3	EVA1	EVA, ERR, SPH, CAL			
	37	4	EVA3	SPH1	EVA, SCH			
	64	4	EVA		EVA, SCH, ERR	FEUCHTER		
	100	6-7	EVA		EVA, ERR	NASS		
	150	8	EVA		EVA, ERR	NASS		
	199	8	EVA3	SPH1	EVA, ERR	BREIIG		
	200	7	EVA3	SPH1	ERR, EVA	SCH		
	219	6	EVA		EVA, ERR, SCH			
	234	4	EVA2	BRM2	EVA, BRM, PHR, SCH, CAL			
	241	4	EVA		SCH, CAL, ERR, BRM	270:BRM		
	302	5-6	EVA		EVA, SCH, CAL, PHR	BREIIG		
	335	5	EVA		PIN, PHR, MEN	VIELE PIN; BREIIG		
	345	6	EVA		EVA, PHR			
	393	7-8	EVA3	TON1	EVA	DUNKELBRAUN		
	413		EVA2	TON2		UEB		
	416		TON			GRAUBRAUN		
	439		TON			GRAU		
	450							
Probe Nr.	Tiefe ab	Zers. Grad	Haupt-komp.	Neb.-komp.	Makroreste	Bemerkungen, Farbe		
42	0		SPH3	BRM1	SPH, BRM	POLYTR. REZENT		
	2	2	SPH		SPH, ERR	LOCKER		
	12	3	SPH2	EVA2	EVA			
	14	4	EVA3	SPH1	EVA			

C-12

18	6	EVA3	TON1	EVA, ALH	
50	7	EVA2	TON2		
57	5	EVA3	TON1		
71		TON2	EVA2		UEB
72		TON			BRAUNGRAU
100					

Probe Nr.	Tiefe ab	Zers. Grad	Haupt- komp.	Neb.- komp.	Makroreste	Bemerkungen, Farbe
43	0		SPH		BL	VACC.
	7	1	SPH		SPH, ERR	LOCKER
	12	2	SPH		SPH, ERR	LOCKER
	22	3	SPH2	EVA2	ERR, EVA, SPH	
	31	5	SPH		SPH	SPH: SUBREZ; BREIIG
	34	6	EVA		EVA, ERR	
	53	7	EVA		EVA, HOL	BREIIG
	79	7	EVA		EVA, ALH, ERR	BREIIG
	123		ORG2	TON2		UEB
	124		TON			BRAUNGRAU
	133		TON			GRAU
	150					

Probe Nr.	Tiefe ab	Zers. Grad	Haupt- komp.	Neb.- komp.	Makroreste	Bemerkungen, Farbe
44	0		SPH			REZENT
	3		SPH		SPH, ERR	LOCKER
	11	2	SPH3	ERR1	SPH, ERR	LOCKER
	17	3	EVA		EVA	
	29	4-5	SPH2	EVA2	SPH, EVA, ERR	50: HOL
	53	6	SPH2	EVA2	EVA	
	73	4	SPH2	EVA2	EVA, ERR, SCH	
	100	4	EVA3	SPH1	EVA, ERR, SCH	
	148	6-7	EVA3	SPH1	EVA, ERR, SCH	
	177	6-5	EVA3	SPH1	EVA, ERR, SCH	
	258	5	EVA3	SPH1	EVA, BRM	
	260	5-6	EVA3	SPH1	EVA, SCH, ERR, PHR, CAL	
	298		EVA2	HOL2	HOL	BREIIG
	300	7	EVA3	SPH1	EVA	BREIIG
	307	7	EVA2	BRM2	EVA, BRM, SPH	BREIIG
	309	7-8	EVA		EVA, PHR, ERR, ALH	BREIIG
	349	8	EVA		PHR, ERR, ALH	BREIIG
	360	7-6	EVA2	TON2	ORG	UEB
	399		TON			GRAU
	400					

Probe Nr.	Tiefe ab	Zers. Grad	Haupt- komp.	Neb.- komp.	Makroreste	Bemerkungen, Farbe
45	0		SPH3	ERR1	SPH, ERR	REZENT
	37	1	SPH		SPH, ERR, EVA	LOCKER
	53	3	SPH3	EVA1	SPH, EVA, ERR	
	61	3-4	EVA2	SPH2	BRM, SPH, EVA	
	73	4-5	EVA3	SPH1	EVA, ERR, SCH, CAL	
	135	5	EVA3	SPH1	SCH, EVA	
	153	6-7	EVA		EVA, SCH, PHR, ALH	
	206		TON2	ORG2	EVA	UEB; FEUCHT
	218		TON			BRAUNGRAU
	232					

Probe Nr.	Tiefe ab	Zers. Grad	Haupt- komp.	Neb.- komp.	Makroreste	Bemerkungen, Farbe
46	0		SPH		SPH	REZENT
	5	2	SPH		SPH, ERR	LOCKER
	11	4-5	SPH2	EVA2	EVA, ERR, MEN	

C-13

27			HOL				
28	5		EVA		EVA, ERR, ALH	BREIIG	
55	6		EVA		ERR, SCH, ALH	BREIIG	
74	6-7		EVA		EVA, SCH		
125			TON2	ORG2		UEB	
127			TON		ORG	GRAUBRAUN	
138			TON		ORG, HOL	GRAU; Z. T. ORANGE	
150							
Probe Nr.	Tiefe ab	Zers. Grad	Haupt-komp.	Neb.-komp.	Makroreste	Bemerkungen, Farbe	
47	0					SED. FEHLT	
	12	4	SPH3	ERR1	SPH, ERR, EVA	KR MELIG	
	18	5-6	EVA		EVA, MEN		
	45	6-7	EVA		ERR, ALH, SCH	BREIIG	
	102	7	EVA		EVA, ALH	BREIIG	
	130	8	EVA		EVA, ALH	BREIIG	
	192	8	EVA		HOL, RIN, EVA		
	212		TON2	ORG2		UEB	
	216		TON			GRAU	
	230						
Probe Nr.	Tiefe ab	Zers. Grad	Haupt-komp.	Neb.-komp.	Makroreste	Bemerkungen, Farbe	
48	0		MOD2	ERR2		REZENT	
	7	5	MOD2	EVA2		TROCKEN	
	42		TON2	ORG2		UEB	
	45		TON			BRAUN	
	50						
Probe Nr.	Tiefe ab	Zers. Grad	Haupt-komp.	Neb.-komp.	Makroreste	Bemerkungen, Farbe	
52	0		SPH		ERR	REZENT	
	15	2-3	SPH3	EVA1		LOCKER	
	33	4-5	EVA3	SPH1			
	41		TON2	ORG2		UEB	
	42		TON		ORG	BRAUNGRAU	
	50						
Probe Nr.	Tiefe ab	Zers. Grad	Haupt-komp.	Neb.-komp.	Makroreste	Bemerkungen, Farbe	
53	0		SPH		SPH, BL	ANDROMEDA, REZENT	
	3	2	SPH3	EVA1	SPH, ERR	LOCKER	
	23	3	SPH3	EVA1	SPH, EVA, ERR	DICHTER	
	31	4	SPH3	EVA1	SPH, EVA, ERR		
	41	4	SPH		SPH, ERR		
	42	5-6	SPH2	EVA2	EVA, ERR	48: PINUS-AST	
	52	7	EVA		EVA, ERR	BREIIG	
	62	6-7	EVA		EVA, HOL, SCH, ERR	HOL: 113/119/122	
	124		TON2	ORG2		UEB	
	129		TON		ORG	GRAUBRAUN	
	145		TON			BRAUNGRAU	
	150						
Probe Nr.	Tiefe ab	Zers. Grad	Haupt-komp.	Neb.-komp.	Makroreste	Bemerkungen, Farbe	
54	0		MST				
	2		MOD		WUR	FEIN	
	4	2	SPH		SPH, WUR	LOCKER	
	8	4	SPH			DICHTER	
	12	4	SPH3	EVA1	SPH, EVA, HOL	KOMPAKT	
	28	4	EVA		HOL, ERR, MEN, PSH	38: MEN; 48: PSH	
	62	4	SPH3	EVA1	EVA, SPH, ERR, SCH		

C-14

70	4	SPH2	EVA2	EVA, HOL, SCH	
88	3	SPH			
90	3	SPH3	EVA1	EVA, HOL	
102	4	SPH3	EVA1	EVA, ERR	
131	4	SPH3	ERR1	SPH, ERR, EVA	
155	3	EVA3	SPH1	SPH, EVA, SCH, ERR	
188	5-6	SPH2	EVA2	SPH, EVA, HOL	BREIIG
200	6-7	EVA3	SPH1	EVA, ERR, SCH	BREIIG; HORIZONTAL
221	7	SPH2	EVA2	EVA, ERR, SCH	BREIIG; HORIZONTAL
272	5	SPH3	ERR1	ERR, EVA, SCH	HORIZONTAL
				CAL, PIN	ALNUS-BLÄTTER
286	6	EVA3	SPH1	SCH, EVA, PIN	HORIZONTAL;
				MEN, BRM	296: MEN
308		HOL		EVA	
317		ORG2	TON2	PHR	UEB
321		TON		ORG	GRAUBRAUN
329		TON			BRAUNGRAU
350					

Probe Nr.	Tiefe ab	Zers. Grad	Haupt-komp.	Neb.-komp.	Makroreste	Bemerkungen, Farbe
55	0		BRM3	MST1	WUR	REZENT
	5	7-8	EVA		EVA	SCHMIERIG
	44	8	EVA		EVA, ALH, BL, PIN, ERR	BREIIG
	76	7	EVA2	SPH2	EVA, SPH, ERR	
	93	8	EVA3	SPH1	EVA, SCH, ERR, ALH	BREIIG
	105	6	EVA		EVA, SCH, CAL	
	134	8	EVA		EVA, ERR, ALH	BREIIG
	163	8	EVA3	SPH1	EVA, ERR	BREIIG
	198	8	EVA3	SPH1	EVA, ERR, ALH	BREIIG; HORIZONTAL
	218	8	EVA		EVA, BRM, SCH	235: PIN
	268	7	EVA		PHR, ALH, MEN, ERR	1CM; 319: MEN
	350		HOL			NASS
	362	6	EVA		EVA	KOMPAKT
	377	7	EVA2	HOL2		NASS; ZERFALLEN
	381	8	EVA			NASS; ZERFALLEN
	389	8	EVA			FEUCHT
	413		TON2	ORG2		UEB
	420		TON		ORG	BRAUNGRAU
	432		TON3	ORG1		GRAUBRAUN
	437		TON		ORG	DUNKELGRAU
	450					

Probe Nr.	Tiefe ab	Zers. Grad	Haupt-komp.	Neb.-komp.	Makroreste	Bemerkungen, Farbe
57	0					SED. FEHLT
	23	3	MOD3	EVA1		TROCKEN
	39		TON2	ORG2	ORG	UEB
	41		TON			GRAUBRAUN
	50					

Probe Nr.	Tiefe ab	Zers. Grad	Haupt-komp.	Neb.-komp.	Makroreste	Bemerkungen, Farbe
58	0		SPH		SPH, ERR	REZENT
	3	3	SPH3	ERR1	SPH, ERR, WUR	LOCKER
	14	3	SPH		SPH, ERR, EVA	
	31	6	EVA3	SPH1	EVA, ERR	
	48	6	EVA		EVA, ERR	
	71	:	EVA3	SPH1	EVA, SCH, PHR, CAL, ALH	90: PHR
	130		ALH			
	132	7-8	EVA		EVA, ERR, SCH, ALH	
	196	7-6	EVA		HOL, SCH	
	210	6	EVA		SCH, ERR, MEN	215: HOL 2CM; HORIZ

C-15

	224	7	EVA		PIN, HOL, PHR	
	239	8	EVA3	TON1	HOL	
	241		ORG2	TON2		UEB
	243		TON		ORG	BRAUNGRAU
	280					
Probe Nr.	Tiefe ab	Zers. Grad	Haupt-komp.	Neb.-komp.	Makroreste	Bemerkungen, Farbe
60	0		SPH		ERR	REZENT
	3	2	SPH		SPH, ERR, WUR	DICHT
	8	6	SPH2	EVA2	EVA, ERR	
	31	7	EVA		EVA, ALH	
	62		ORG2	TON2	ORG	UEB
	64		TON			HELLBRAUN/GRAU
	100					
Probe Nr.	Tiefe ab	Zers. Grad	Haupt-komp.	Neb.-komp.	Makroreste	Bemerkungen, Farbe
66	0					SED. FEHLT
	6	5-6	SPH		SPH, ERR	NASS; LOCKER
	19	8	ORG3	TON1		NASS; BREIIG
	28	7	EVA		SCH, EVA, TON	
	59	8	EVA		SCH, HOL, EVA	
	66		ORG2	TON2	SCH, ORG	UEB
	69		TON		SCH, ORG	GRAUBRAUN
	80		TON		HOL	GRAU
	95					
Probe Nr.	Tiefe ab	Zers. Grad	Haupt-komp.	Neb.-komp.	Makroreste	Bemerkungen, Farbe
67	0	1	SPH		SPH, ERR	LOCKER; REZENT
	8	3	SPH		SPH, ERR	NASS
	18	3	SPH		SPH, ERR	
	21	4	SPH		SPH, ERR, WUR, EVA	
	35	3	SPH		SPH	LOCKER
	38	6	EVA3	SPH1	EVA, ERR	BREIIG
	57	7	EVA3	SPH1	EVA, ALH, SCH	
	78	5-4	EVA2	SPH2	BRM	83: BRM
	102	7-8	EVA3	SPH1	EVA, SCH	BREIIG
	150	8-9	EVA3	SPH1	EVA, SCH, ERR	BREIIG
	231	8-7	EVA		EVA, CAL, SCH, ERR	BREIIG; TROCKENER
	255	6	EVA		EVA, SCH, ERR	
	264		HOL			
	275		ORG3	TON1	ORG, ERR	
	277		TON2	ORG2		UEB
	278		TON		ORG	DUNKELGRAU
	300					
Probe Nr.	Tiefe ab	Zers. Grad	Haupt-komp.	Neb.-komp.	Makroreste	Bemerkungen, Farbe
68	0		SPH3	MST1		REZENT
	3	3	MOD		ERR	KOMPAKT
	10	4-5	EVA		ERR, WUR	
	24	4	SPH3	EVA1	SPH, EVA	
	31	4	SPH		SPH, ERR, CAL, EVA	LOCKER
	40	4-5	SPH2	EVA2	SPH, EVA, TON	
	53	6	EVA			FEUCHT
	80		HOL			
	83		TON2	ORG2		UEB
	85		TON			GRAUBRAUN
	100					

C-16

Probe Nr.	Tiefe ab	Zers. Grad	Haupt- komp.	Neb.- komp.	Makroreste	Bemerkungen, Farbe
74	0		SPH			REZEN'T LOCKER
	4	2	SPH		SPH, ERR	LOCKER
	9	5	SPH3	ERR1	SPH, ERR	KR MELIG
	15	6	SPH		SPH, ERR, TON	
	25	4-5	SPH		SPH, ERR, EVA	SUBREZ. ; LOCKER
	27	5	SPH2	EVA2	EVA, ERR, SPH	
	44	4	SPH2	EVA2	EVA, ERR	
	57	5-6	SPH2	EVA2	EVA, SCH, ERR	
	88	6	EVA		EVA, SCH, ALH	
	108	7	EVA		EVA, HOL, SCH	TROCKEN
	124		EVA3	TON1	EVA, MEN	
	128		TON2	ORG2	EVA, ORG	UEB
	131		TON		ORG	GRAUBRAUN
	144		TON			DUNKELGRAU
	150					
	150					

C. 2 STRATIGRAPHISCHE ABBILDUNGEN

Die Darstellung der Stratigraphie und des Zersetzungsgrades (Humifikation) basiert auf den Daten des Kapitels C.1. Bei den Punkten 12 und 68 wurde Torf abgebaut. Dies ist bei der Interpretation der Quertranssekte 6–69, beziehungsweise 5–74 und der Längstranssekte 9–17 bzw. 66–69 zu berücksichtigen.

In den folgenden Darstellungen ist immer oben die Stratigraphie und vertikal versetzt die Humifizierung dargestellt. Die horizontale Achse ist in den Quertranssekten die y-Koordinate, in den Längstranssekten die x-Koordinate. Die z-Koordinate ist die Höhe über Meer (Koordinaten der Bohrpunkte siehe Anhang A).

Stratigraphische Signaturen



Humifizierung nach von Post



Abbildung C.1 Legende für die Darstellungen der Stratigraphie und der Humifikation. Die Signaturen lehnen sich an Troels-Smith (1955) an.

C.2.1 Quertranssekte: Stratigraphie und Humifikation

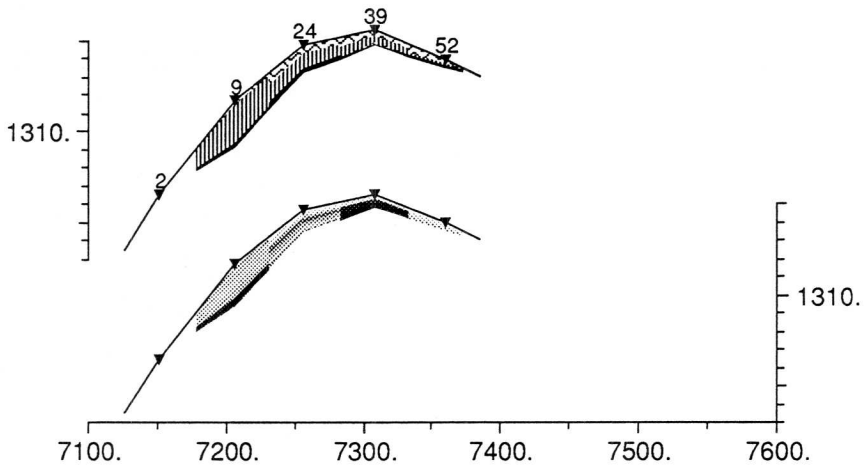


Abbildung C.2 Quertranssekt 9–52. oben: Stratigraphie, unten: Humifikation. Die horizontale Achse ist die y-Koordinate, die vertikale Achse die Höhe [m ü.M.]. Mit Dreiecken ist die Lage der Bohrpunkte eingezeichnet.

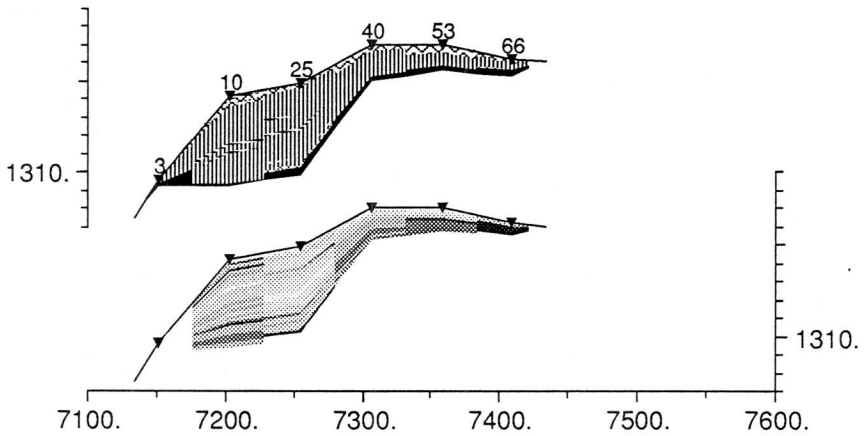


Abbildung C.3 Quertranssekt 3–66

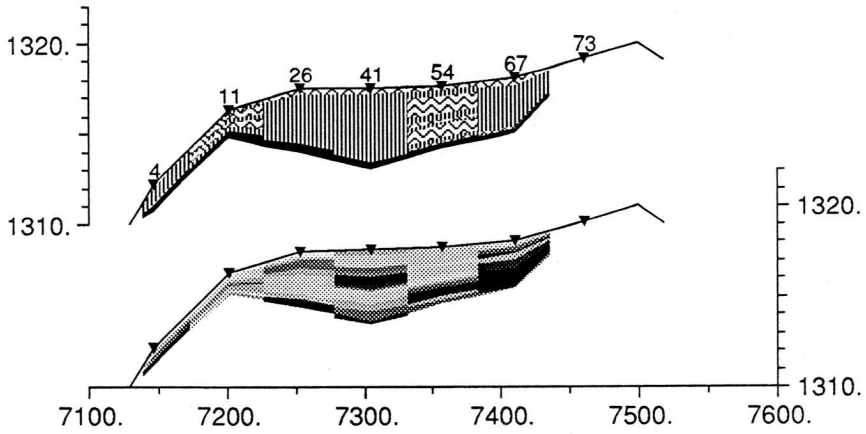


Abbildung C.4 Quertranssekt 4-73

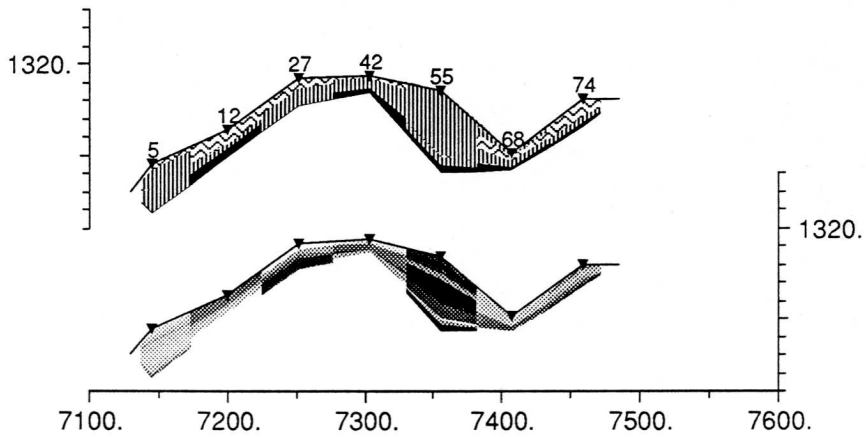


Abbildung C.5 Quertranssekt 5-74. Punkt 12 und 68 liegen in abgetorften Gebieten und zeigen ein gekapptes Profil.

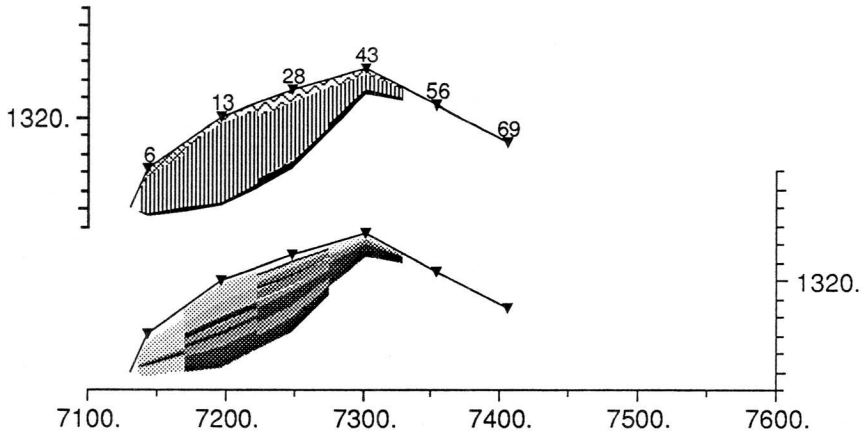


Abbildung C.7 Quertranssekt 6-69

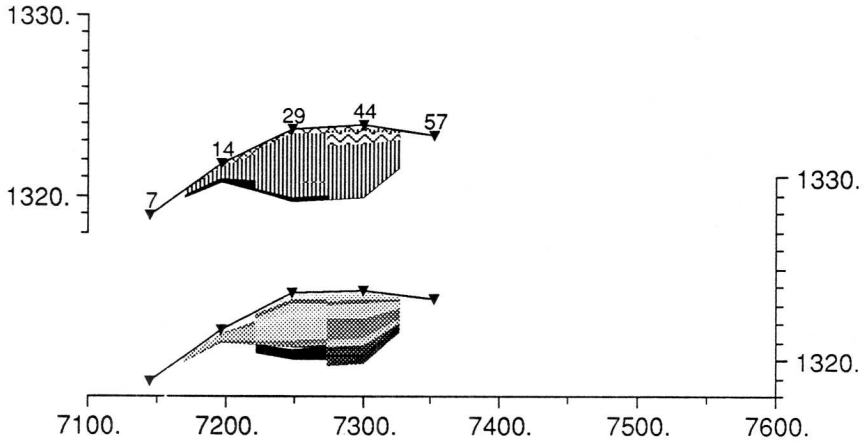


Abbildung C.8 Quertranssekt 7-57

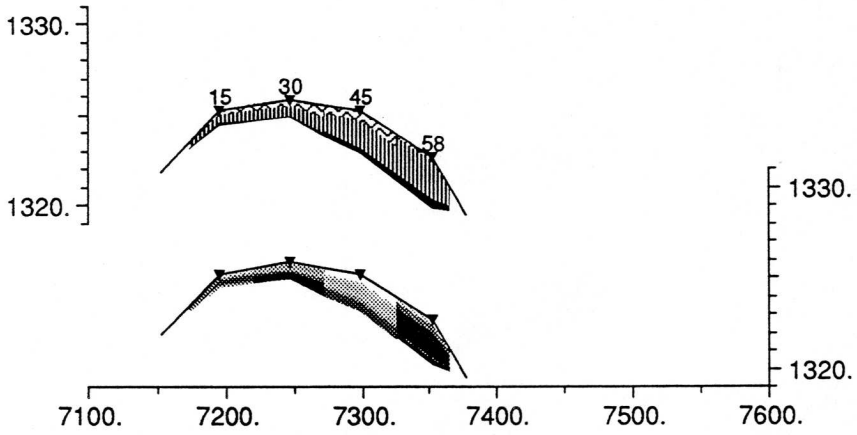


Abbildung C.9 Quertranssekt 15-58

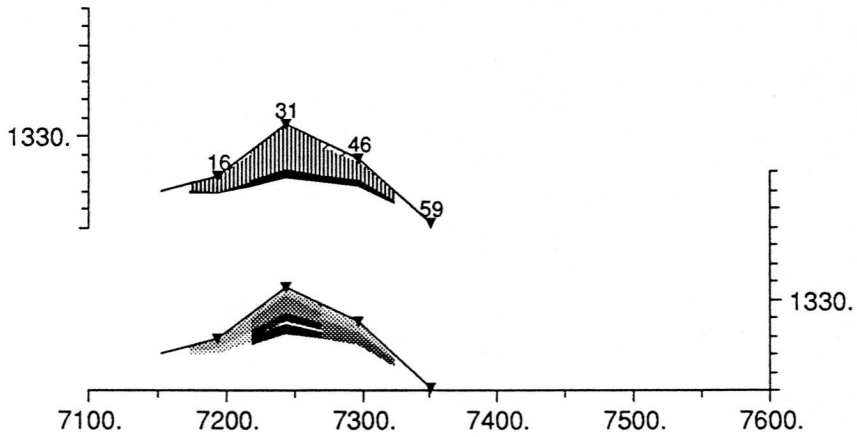


Abbildung C.10 Quertranssekt 16-59

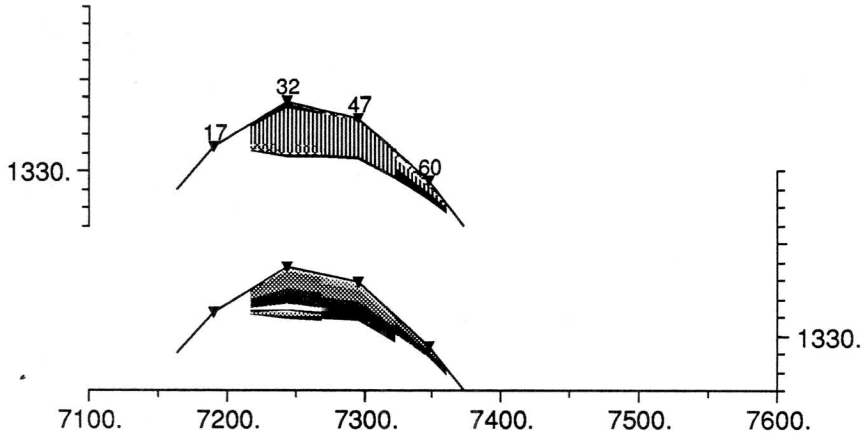


Abbildung C.11 Quertranssekt 17-60

C.2.2 Längstranssekte: Stratigraphie und Humifikation

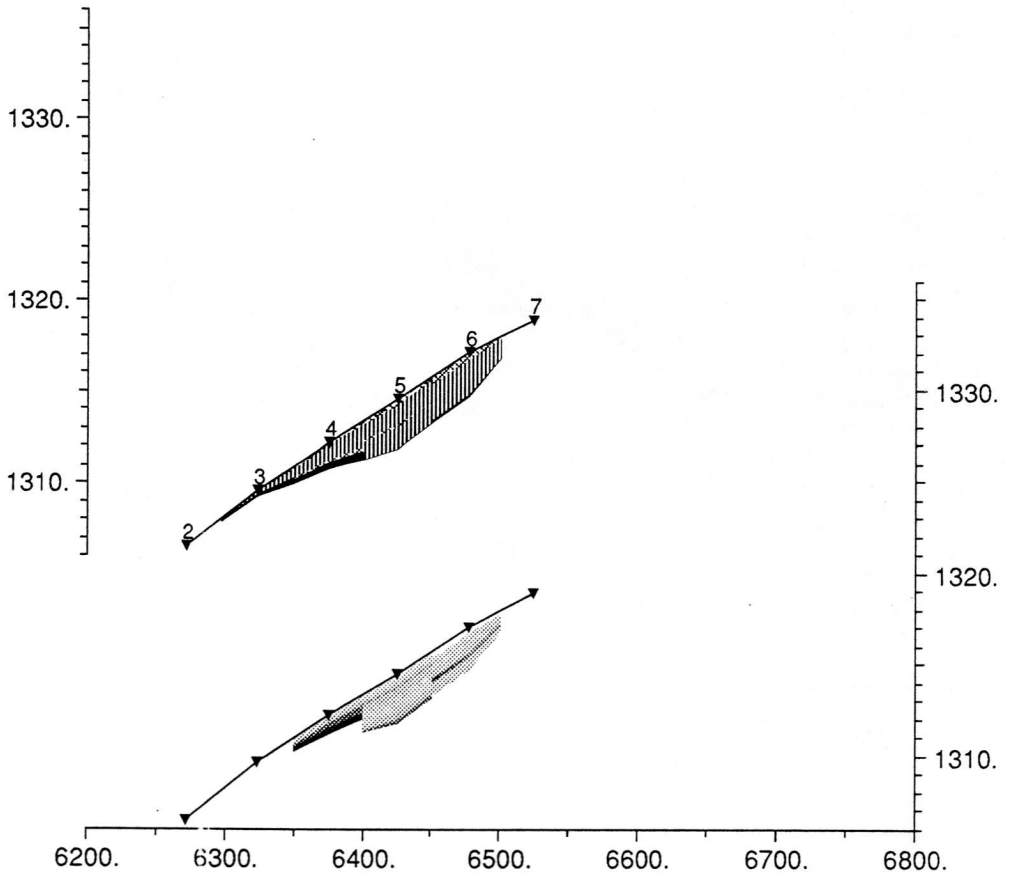


Abbildung C.12 Längstranssekt 2–7. oben: Stratigraphie, unten: Humifikation. Die horizontale Achse ist die y-Koordinate, die vertikale Achse die Höhe [m ü.M.]. Mit Dreiecken ist die Lage der Bohrpunkte eingezeichnet.

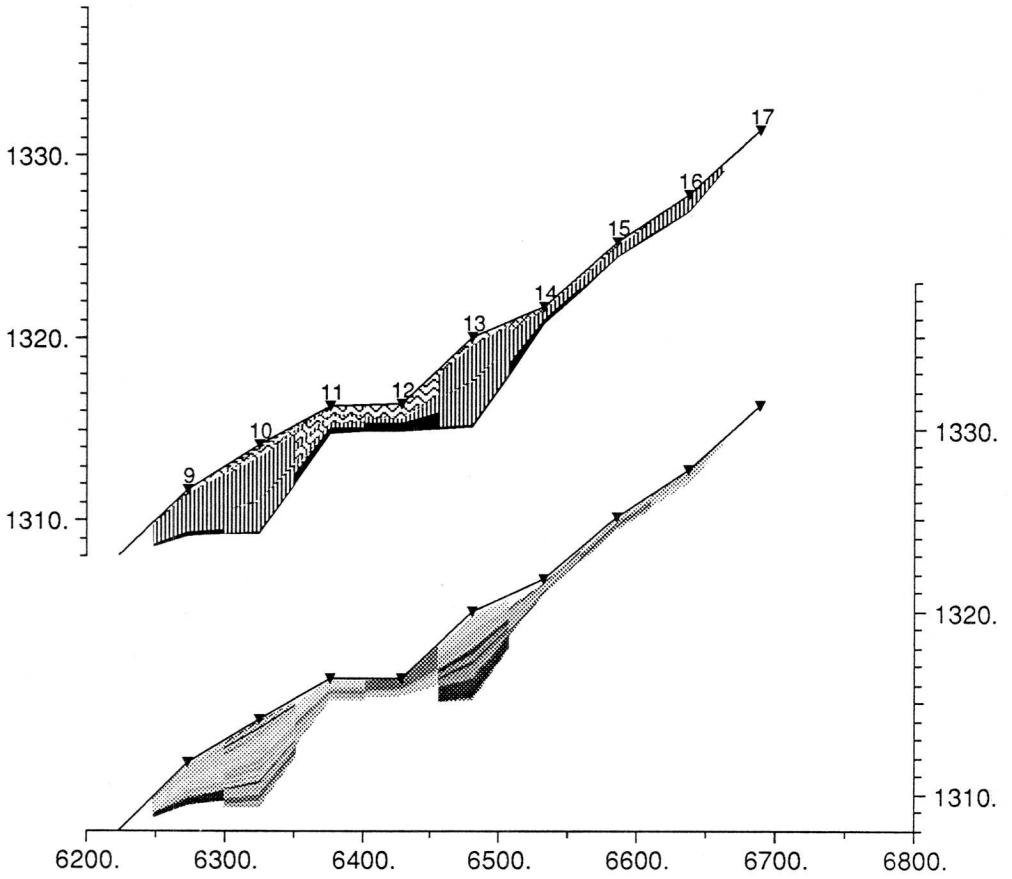


Abbildung C.13 Längstranssekt 9-17

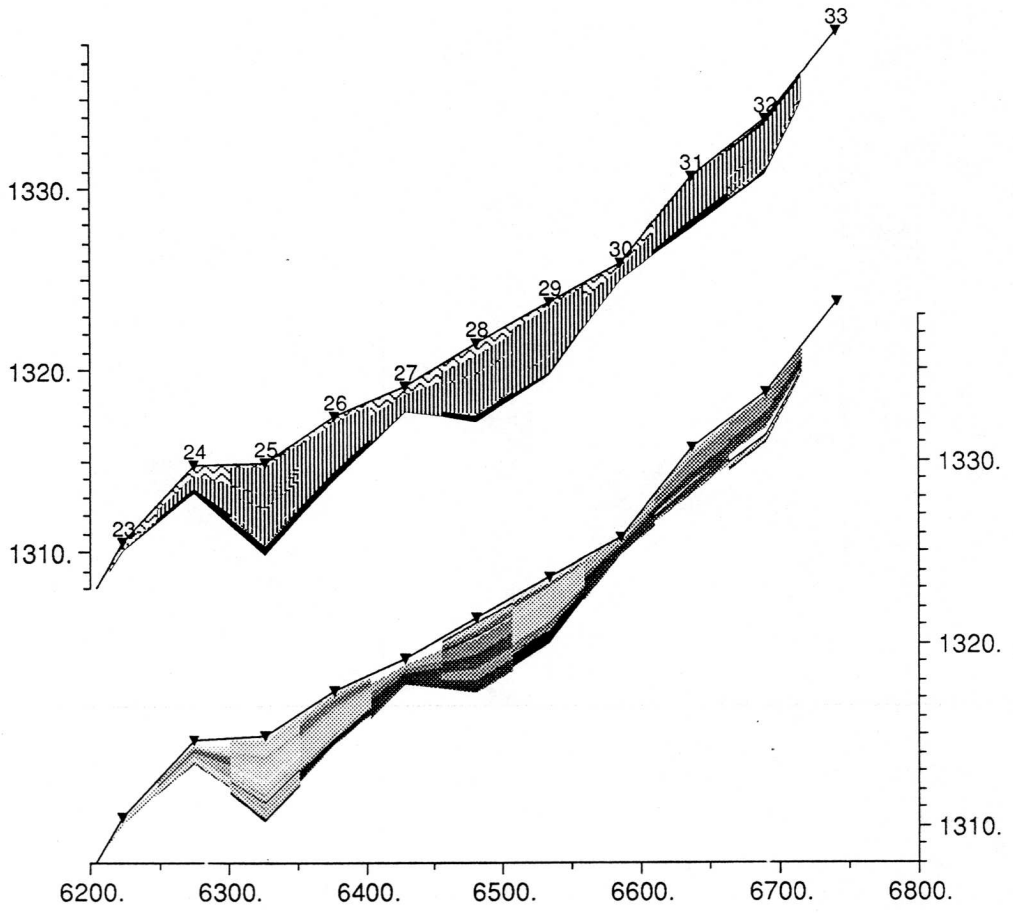


Abbildung C.14 Längstranssekt 23-33

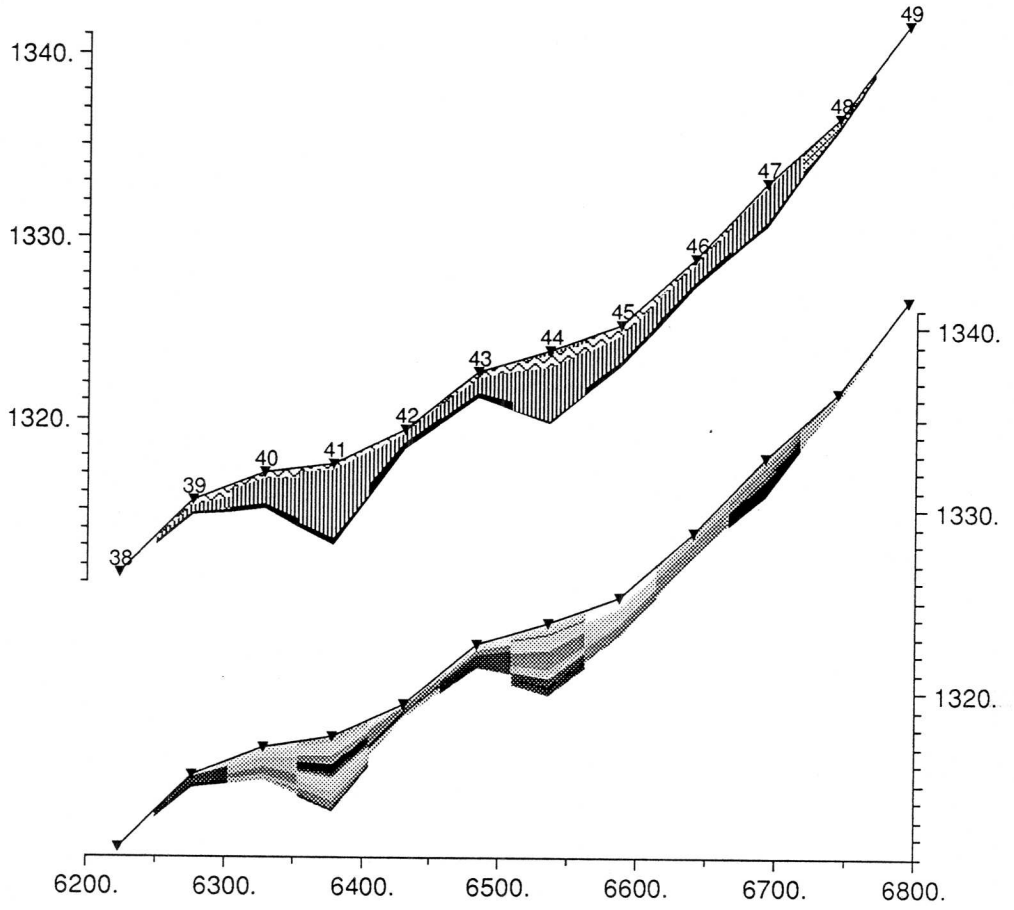


Abbildung C.15 Längstranssekt 38-49

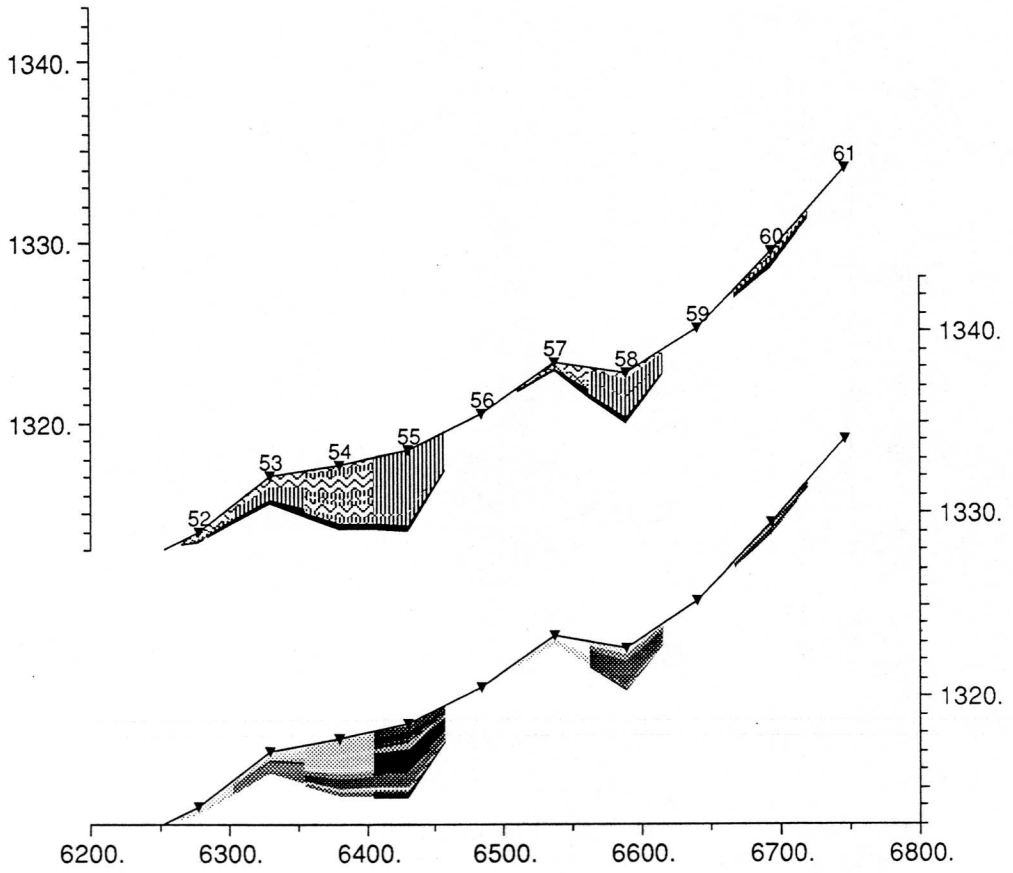


Abbildung C.16 Längstranssekt 52-61

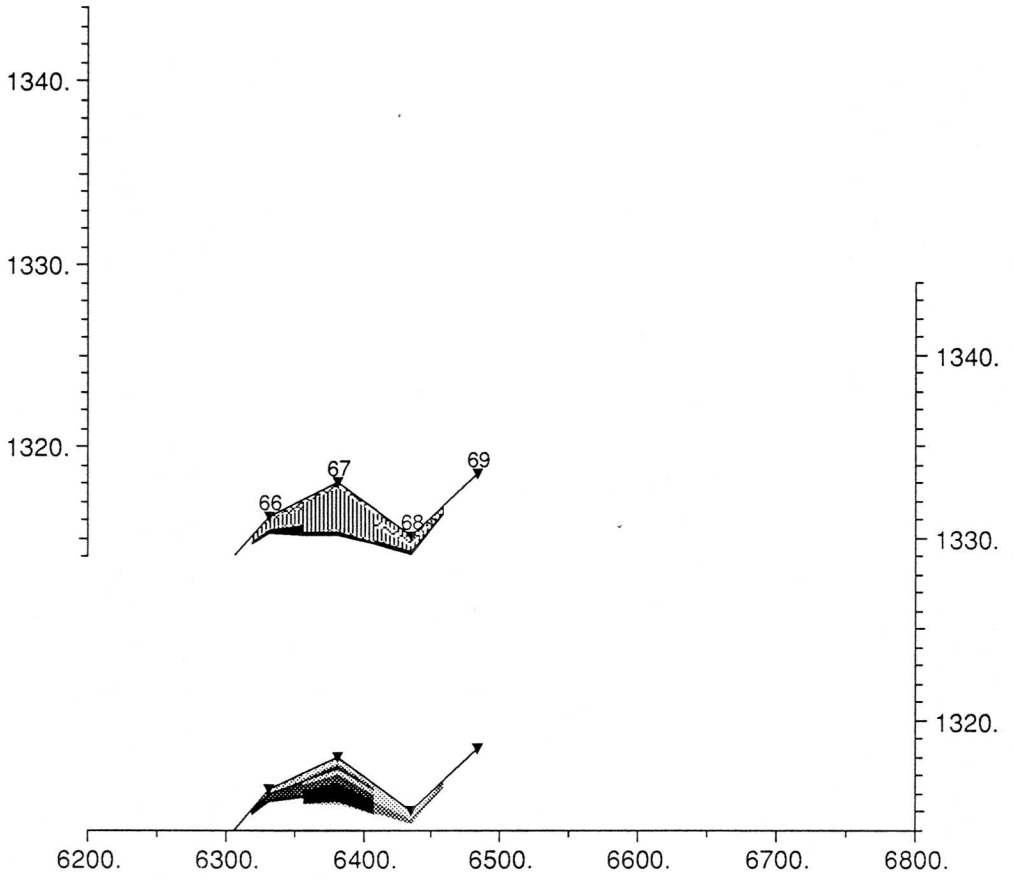


Abbildung C.17 Längstranssekt 66–69

Die nachfolgende Tabellen enthalten den für die Datierung mittels Pollenfrequenzen verwendeten Datensatz und die Prozentzahlen.

“sum2” und “sum” ist die Summe der gezählten Pollen der verwendeten Arten bzw. die Summe der gezählten Pollen nach der logarithmischen Transformierung. Die Tabellen sind dem Protokoll des Programms entnommen.

--- GETDAT 13.09. 89

Number of used pollen species is 15

names of pollen species are:

ABIES	APIACEAE	ARTEMISIA	BETULA IND.
CARPINUS	CICHOIACEAE	CORYLUS	FAGUS
POACEAE	PICEA	PINUS IND.	PLANTAGO LANCEOLATA
SELAGINELLA SEL.	ULMUS	CEREALIA & JUGLANS	

the names are shorted to the 4 first characters in the following tables

Number of used samples is 231

Number of samples instratigraphic sequence is 66

numbers of samples are: (top: array number, bottom: sample number)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
4	9	14	24	34	44	54	64	74	84	89	94	99	104	109
16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
114	119	124	129	134	139	154	164	174	184	194	204	214	224	234
31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45
244	255	264	274	284	294	299	304	309	314	319	324	329	334	344
46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60
354	359	364	374	384	394	404	414	424	435	444	449	454	459	464
61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75
469	474	479	482	486	490	501	502	503	504	505	506	507	508	509
76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90
510	511	512	513	514	515	516	517	518	519	520	521	522	523	524
91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103	104	105
525	526	527	528	529	530	531	532	533	534	535	536	537	538	539
106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118	119	120
540	541	542	543	550	551	552	553	554	555	556	557	558	559	566
121	122	123	124	125	126	127	128	129	130	131	132	133	134	135
561	562	563	564	565	566	567	568	569	570	571	572	573	574	575
136	137	138	139	140	141	142	143	144	145	146	147	148	149	150
576	577	578	579	580	581	582	583	584	585	586	587	588	589	590
151	152	153	154	155	156	157	158	159	160	161	162	163	164	165
591	592	593	594	595	596	597	598	610	611	612	613	614	615	616
166	167	168	169	170	171	172	173	174	175	176	177	178	179	180
617	618	619	620	621	622	623	624	625	626	627	628	629	630	631
181	182	183	184	185	186	187	188	189	190	191	192	193	194	195
632	633	634	635	636	637	638	639	640	641	642	643	644	645	646
196	197	198	199	200	201	202	203	204	205	206	207	208	209	210

D-2

647 648 649 650 651 652 653 654 655 656 657 658 659 660 661
 211 212 213 214 215 216 217 218 219 220 221 222 223 224 225
 662 663 664 665 666 667 668 669 670 671 672 673 674 675 676
 226 227 228 229 230 231 232 233 234 235 236 237 238 239 240
 677 678 679 680 681 682

--- outliers of moving 5 point median
 cutoff is 10 times median

species	samp	old%	new%	oldC	newC
ABIES	454	1.33	.00	2	0
APIACE	99	10.73	.71	30	2
APIACE	224	.28	.00	1	0
APIACE	264	.23	.00	1	0
APIACE	274	.24	.00	1	0
APIACE	314	.77	.00	3	0
APIACE	319	.95	.00	2	0
ARTEMI	94	.82	.00	2	0
ARTEMI	154	.22	.00	1	0
ARTEMI	284	.24	.00	1	0
ARTEMI	294	.28	.00	1	0
ARTEMI	314	.26	.00	1	0
ARTEMI	364	.16	.00	1	0
ARTEMI	404	.22	.00	1	0
ARTEMI	424	.83	.00	1	0
ARTEMI	444	1.47	.00	1	0
CARPIN	329	1.26	.00	2	0
CICHOR	9	.50	.00	1	0
CICHOR	14	1.44	.00	4	0
CICHOR	109	.65	.00	2	0
CICHOR	134	.18	.00	1	0
CICHOR	154	.43	.00	2	0
CICHOR	234	.27	.00	1	0
CICHOR	255	.22	.00	1	0
CICHOR	264	1.14	.00	5	0
CICHOR	284	.24	.00	1	0
CICHOR	294	.28	.00	1	0
CICHOR	314	.26	.00	1	0
CICHOR	319	5.71	.00	12	0
FAGUS	329	.63	.00	1	0
FAGUS	454	.66	.00	1	0
SELAGI	404	.15	.00	2	0
SELAGI	449	1.39	.00	2	0

--- pollen counts 2

samp	ABIE	APIA	ARTI	BETU	CARP	CICH	CORY	FAGU	POAC	PICE	PINU	PLAN	SELA	ULMU	CERE	sum2	sum
4	34	2	4	9	1	2	1	1	3	1	3	2	3	1	2	574	338
9	16	2	3	17	13	0	6	39	70	64	272	18	0	1	11	532	199
14	12	2	2	27	12	0	14	69	136	80	57	26	0	3	18	458	273
24	73	3	5	10	9	0	30	140	62	176	42	1	0	5	5	561	464
34	65	1	0	9	16	0	30	203	27	175	31	3	0	1	4	565	513
44	49	1	1	7	4	0	14	173	31	104	55	5	0	1	0	445	366
54	28	3	3	17	16	0	27	180	85	134	67	11	0	4	0	575	431
64	33	0	0	23	22	0	50	204	49	154	23	4	0	7	0	569	504
74	73	2	4	6	4	0	20	122	81	115	49	8	0	3	0	487	365
84	62	1	0	24	9	0	27	101	41	88	34	2	0	7	0	396	328
89	100	3	4	25	2	1	53	105	68	116	147	1	0	3	0	628	422
94	54	2	0	10	4	1	22	77	32	62	79	1	1	0	0	345	240
99	59	2	0	22	0	1	20	59	50	80	43	0	0	1	0	337	251
104	52	0	0	9	5	0	28	87	49	107	22	2	1	3	0	365	299
109	79	1	3	21	0	0	24	53	19	108	79	2	0	6	0	395	304
114	70	0	0	15	3	0	21	153	24	125	24	0	0	14	0	452	410
119	67	1	0	6	0	0	22	54	31	109	25	4	0	5	0	326	276
124	86	1	0	14	1	0	75	254	38	141	13	1	0	2	0	627	582
129	127	1	0	9	2	0	30	103	18	165	18	2	0	7	0	483	452
134	121	2	0	20	3	0	21	112	18	278	19	1	0	4	0	599	567
139	68	1	0	11	5	0	31	76	16	104	3	0	0	8	0	324	308
154	115	2	0	21	0	0	47	88	16	171	16	0	0	9	0	485	458
164	93	0	0	37	0	0	38	115	13	217	22	0	0	10	0	545	515
174	131	0	0	19	0	0	45	96	18	203	20	0	0	12	0	544	511
184	90	1	0	5	0	0	15	15	6	159	21	0	0	15	0	328	305
194	111	1	0	13	0	0	21	35	10	279	26	0	0	7	0	506	475

D-3

204	117	1	1	10	0	0	14	27	19	267	38	0	0	14	0	508	457
214	93	0	0	11	0	0	13	10	4	165	22	0	0	8	0	326	304
224	122	0	0	7	0	0	17	4	6	188	37	0	0	13	0	394	356
234	124	0	0	4	0	0	25	9	9	171	23	0	0	31	0	396	369
244	130	0	0	7	0	0	29	15	9	226	19	0	0	23	0	458	435
255	114	0	0	8	0	0	31	14	3	241	28	0	0	44	0	483	456
264	122	0	0	13	0	0	23	5	7	195	22	0	0	70	0	457	433
274	81	0	0	7	0	0	46	4	14	198	30	0	0	81	0	461	423
284	76	0	0	8	0	0	90	5	8	162	17	0	0	68	0	434	413
294	92	0	0	5	0	0	26	3	4	167	26	0	0	54	0	377	351
299	53	0	0	2	0	0	38	1	6	85	22	0	0	54	0	261	237
304	209	0	0	7	0	0	38	5	5	172	29	0	0	65	0	530	500
309	50	0	0	3	0	0	26	2	5	75	30	0	0	58	0	249	219
314	93	0	0	21	0	0	59	1	8	77	40	0	0	129	0	428	385
319	22	0	0	11	0	0	27	0	7	44	28	0	0	87	0	226	196
324	3	0	0	35	0	0	91	1	7	53	32	0	1	144	0	367	332
329	3	2	0	16	0	0	38	0	3	15	16	0	0	78	0	171	155
334	0	1	0	5	0	0	43	0	3	8	29	0	0	51	0	140	112
344	0	4	0	6	0	0	45	0	1	3	15	0	0	51	0	125	111
354	0	1	0	15	0	8	140	0	4	2	32	0	0	129	0	331	299
359	0	0	0	16	0	2	121	0	3	1	35	0	0	73	0	251	217
364	0	1	0	20	0	2	403	0	8	1	74	0	1	190	0	700	623
374	0	5	0	27	0	7	217	0	11	0	90	0	0	145	0	502	407
384	0	2	0	25	0	9	309	0	19	0	83	0	0	229	0	676	581
394	0	3	0	37	0	11	369	0	7	0	120	0	0	230	0	777	656
404	0	1	0	93	0	12	182	0	18	0	219	0	0	160	0	685	456
414	0	2	0	90	0	4	105	0	12	0	292	0	0	61	0	566	270
424	0	8	0	79	0	2	8	0	29	0	430	0	0	13	0	569	119
435	0	6	0	60	0	4	6	0	31	0	383	0	0	13	0	503	98
444	0	10	0	22	0	16	4	0	12	0	682	0	1	6	0	753	67
449	0	3	1	28	0	5	1	0	10	1	380	0	0	3	0	431	49
454	0	0	0	29	0	68	22	0	32	4	518	0	1	11	0	689	147
459	0	0	0	17	0	5	4	0	111	2	588	0	0	0	0	729	41
464	0	0	0	10	0	32	0	0	78	0	481	0	31	0	0	635	58
469	0	0	0	7	0	103	2	0	30	0	337	0	33	0	0	513	125
474	0	0	0	3	0	69	1	0	16	0	380	0	59	0	0	528	85
479	0	0	0	3	0	76	1	0	30	0	377	0	57	0	0	545	94
482	0	0	0	1	0	72	2	0	16	0	404	0	193	0	0	689	90
486	0	0	0	3	0	37	4	0	5	0	308	0	98	0	0	456	56
490	0	0	0	5	0	55	5	0	15	0	306	0	111	0	0	497	78
501	39	1	0	7	0	0	26	14	22	105	17	0	0	5	0	236	202
502	48	1	0	7	0	2	80	2	3	54	44	0	1	47	0	289	245
503	9	5	2	15	4	2	23	44	70	56	134	16	0	0	7	387	192
504	19	0	2	20	0	1	14	44	37	53	70	5	0	0	0	265	165
505	17	0	1	22	1	0	28	48	18	67	77	0	0	4	1	284	196
506	33	0	0	1	0	0	19	0	1	81	18	0	0	28	0	181	164
507	65	1	0	0	0	2	36	4	12	93	28	0	0	35	0	276	241
508	44	4	0	1	0	0	50	1	7	75	16	0	0	52	0	250	231
509	1	1	0	0	0	1	38	3	5	2	23	0	0	49	0	123	99
510	0	1	1	3	0	2	78	0	0	2	66	0	0	91	0	244	182
511	0	1	0	11	0	1	43	0	2	2	25	0	0	56	0	141	117
512	0	1	0	7	0	5	145	0	4	2	34	0	0	159	0	357	323
513	1	0	0	5	0	2	199	0	0	2	23	0	0	93	0	325	305
514	0	1	0	8	0	2	141	0	1	0	18	0	0	50	0	221	204
515	0	4	0	8	0	2	10	0	1	0	145	0	10	12	0	192	43
516	0	1	0	10	0	4	3	0	6	0	183	0	9	8	0	224	35
517	0	0	0	11	0	3	2	0	4	0	119	0	30	0	0	170	26
518	0	1	0	1	0	0	5	0	6	0	179	0	26	0	0	218	17
519	0	0	0	2	0	5	2	0	1	0	211	0	57	0	0	278	18
520	1	0	0	7	0	20	2	0	5	1	48	0	204	0	0	288	41
521	31	1	0	18	1	0	13	62	60	95	28	6	0	1	0	318	237
522	37	3	0	12	4	0	21	118	46	94	50	8	0	3	0	397	308
523	68	1	0	6	1	0	11	53	15	74	18	1	0	1	0	249	221
524	85	3	0	50	0	1	41	49	59	128	16	0	0	8	0	440	371
525	137	0	0	7	0	0	20	65	103	192	31	0	0	6	0	561	435
526	137	1	0	14	0	1	34	31	20	181	27	0	0	19	0	465	424
527	4	0	0	0	0	0	31	0	5	10	13	0	0	41	0	104	90
528	5	0	0	1	0	1	26	0	2	25	15	0	0	46	0	121	107
529	2	0	0	0	0	2	35	0	2	22	21	0	1	50	0	135	114
530	1	1	0	0	0	4	23	0	0	1	12	0	4	45	0	91	78
531	0	0	0	11	0	0	20	0	43	0	500	0	78	0	0	652	45
532	0	0	0	21	0	8	24	0	67	0	83	0	64	0	0	267	65
533	1	0	0	6	0	2	21	0	25	3	163	0	139	1	0	361	47
534	0	0	0	16	0	3	20	0	25	0	34	0	51	1	0	150	50
535	46	0	0	15	0	0	59	21	8	88	18	0	0	8	0	263	241
536	41	3	0	7	0	0	58	15	12	105	14	0	0	14	0	269	248

D-4

537	51	1	0	23	0	0	76	19	2	108	18	0	0	4	0	302	285
538	77	7	0	0	0	2	42	20	114	76	20	0	0	19	0	377	250
539	77	1	0	9	0	5	30	15	11	128	20	0	0	27	0	323	297
540	126	2	0	3	0	5	51	2	8	203	21	0	0	49	0	470	446
541	40	1	0	5	0	9	35	0	6	71	18	0	0	54	0	239	219
542	14	1	0	1	0	1	14	1	1	89	13	0	0	26	0	161	149
543	26	3	0	9	0	20	127	0	3	33	28	0	0	130	0	379	352
550	30	3	0	20	0	0	12	38	70	86	172	8	0	11	1	451	218
551	74	1	2	46	1	3	36	67	47	122	99	3	0	2	0	503	365
552	79	1	0	12	0	0	38	28	4	167	16	1	1	6	0	353	336
553	5	0	1	4	1	0	6	8	72	24	44	11	0	1	0	177	69
554	22	1	0	12	6	0	15	85	45	112	41	4	0	7	0	350	271
555	67	0	1	22	0	0	40	98	11	85	20	0	0	10	0	354	328
556	121	1	0	4	0	0	11	52	5	169	9	0	0	0	0	372	361
557	61	10	0	11	0	1	32	15	36	103	9	0	0	17	0	295	255
558	66	4	0	3	0	2	24	23	49	119	14	0	0	6	0	310	253
559	32	0	4	17	0	0	13	104	29	51	28	3	0	3	0	284	233
560	61	1	1	13	0	0	10	49	16	85	21	0	0	3	0	260	228
561	54	2	0	17	0	0	24	50	29	78	33	0	0	9	0	296	240
562	31	0	0	4	0	1	9	6	4	30	7	0	0	5	0	97	89
563	54	3	0	16	0	3	36	4	1	96	16	0	0	14	0	240	225
564	60	2	0	6	0	10	33	4	30	86	29	0	0	30	0	290	237
565	46	1	0	3	0	4	39	12	13	130	18	0	1	33	0	300	273
566	15	4	0	3	5	3	7	29	95	84	71	16	0	5	3	340	182
567	29	0	0	9	0	0	18	69	58	65	76	0	0	5	0	330	204
568	76	0	0	7	1	0	28	48	35	99	29	0	0	2	0	325	267
569	41	1	0	0	0	4	14	2	6	114	16	0	0	15	0	213	195
570	59	0	0	0	0	8	8	6	5	159	21	0	0	41	0	307	285
571	39	1	0	1	0	2	14	2	4	89	9	0	0	36	0	197	187
572	67	1	2	24	0	1	28	84	29	97	12	1	0	3	1	350	314
573	47	1	1	23	0	0	23	18	29	83	16	0	0	13	0	254	215
574	37	4	0	2	0	4	32	0	8	38	17	0	0	20	0	162	141
575	0	1	0	20	0	10	47	0	5	1	262	0	0	20	0	366	106
576	0	1	1	4	0	7	12	0	12	0	299	0	26	0	0	362	36
577	20	1	3	4	0	0	17	94	24	57	13	2	0	4	0	239	207
578	85	0	0	7	0	0	27	57	30	123	24	0	0	6	0	359	311
579	50	8	1	7	0	4	32	5	29	97	27	0	0	23	0	283	233
580	17	0	0	5	0	5	86	7	5	48	30	0	4	111	0	318	285
581	4	0	0	0	0	3	66	0	4	9	24	0	9	56	0	175	144
582	0	0	0	27	0	5	89	0	7	2	61	0	11	36	0	238	167
583	32	1	4	10	0	0	25	44	61	75	200	7	0	5	2	466	214
584	52	1	3	9	3	0	33	103	97	92	92	6	0	0	1	492	312
585	67	1	0	9	0	0	29	5	19	235	21	0	0	28	0	414	379
586	107	0	0	3	0	15	25	3	17	192	16	0	0	32	0	410	382
587	62	2	0	0	0	5	18	3	5	134	16	0	0	46	0	291	274
588	62	1	0	11	1	0	10	81	23	62	19	3	0	2	0	275	239
589	49	1	0	13	0	0	12	69	29	93	17	0	0	7	0	290	250
590	60	2	0	47	0	0	62	13	78	71	35	0	0	15	0	383	277
591	66	0	0	0	0	8	35	0	4	78	22	0	0	63	0	276	254
592	42	2	0	0	0	10	37	0	5	71	33	0	0	83	0	283	250
593	20	2	0	15	3	0	13	99	58	101	28	3	0	0	0	345	266
594	46	0	0	32	0	0	16	56	30	83	13	3	0	3	0	283	245
595	44	1	0	117	0	0	38	23	39	49	23	0	0	2	0	336	280
596	94	4	0	18	0	17	52	16	30	208	20	0	0	12	0	471	427
597	95	0	0	3	0	5	60	10	10	207	46	0	0	38	0	474	424
598	53	1	0	2	0	6	51	0	5	134	34	0	0	63	0	349	315
610	58	1	1	35	0	0	22	61	18	55	8	0	0	1	0	260	238
611	93	2	0	22	0	1	36	52	41	132	14	1	0	0	0	394	345
612	92	2	1	21	0	0	22	61	23	123	14	2	0	6	0	367	335
613	98	0	0	0	0	6	13	11	6	138	24	0	0	6	0	302	276
614	22	0	0	0	0	0	3	1	0	41	5	0	0	0	0	72	68
615	91	1	0	3	0	3	40	11	4	149	24	0	0	8	0	334	310
616	37	1	2	14	0	0	24	122	97	86	45	2	0	4	1	435	301
617	71	0	1	32	0	0	28	43	17	100	20	0	0	0	0	312	280
618	35	0	0	4	0	0	8	2	1	105	20	0	0	6	0	181	162
619	36	0	0	0	0	2	16	0	0	106	22	0	0	39	0	221	202
620	46	2	0	0	0	0	19	0	0	125	14	0	1	41	0	248	235
621	34	0	0	2	0	1	31	0	1	48	18	0	0	42	0	177	160
622	43	0	0	41	0	1	42	37	32	65	218	1	0	8	0	489	247
623	15	0	0	41	0	0	20	68	17	26	343	0	0	2	0	532	180
624	69	0	0	60	0	1	41	33	72	89	218	0	0	8	0	591	310
625	40	2	0	7	0	0	66	38	3	101	10	0	0	4	0	271	261
626	63	7	0	8	0	1	56	23	1	97	13	0	0	7	0	276	264
627	54	2	0	8	0	1	36	26	2	133	15	1	0	8	0	286	272
628	27	2	0	4	0	1	27	0	5	38	29	0	3	36	0	172	141
629	27	1	0	1	0	5	30	0	6	36	25	0	10	4	0	188	154

D-5

630	90	1	0	17	0	4	48	11	12	196	33	0	0	25	0	437	397
631	109	8	2	4	0	17	47	20	12	231	18	0	1	33	1	503	477
632	62	1	0	3	0	3	45	4	4	139	20	0	0	23	0	304	284
633	74	3	0	3	0	2	25	9	20	112	18	0	0	22	1	289	256
634	64	2	0	6	0	12	47	3	16	218	25	0	0	29	0	422	386
635	79	1	0	0	0	7	19	0	0	195	33	0	0	30	0	364	334
636	3	0	0	12	0	4	138	1	4	18	41	0	0	138	0	359	319
637	0	1	0	4	0	3	18	1	20	1	397	0	32	16	0	493	56
638	19	1	0	5	0	4	27	22	11	84	86	3	0	2	4	268	177
639	27	1	0	26	0	6	25	20	40	105	59	1	0	8	0	318	226
640	43	11	0	63	1	0	116	94	34	65	137	9	1	0	4	579	415
641	65	3	0	56	0	0	67	106	25	101	45	1	0	1	0	470	407
642	66	0	0	10	0	1	66	83	6	128	17	2	0	3	0	383	364
643	89	0	0	0	0	1	24	22	2	160	19	0	0	8	0	325	307
644	57	0	0	0	0	2	19	22	2	109	19	0	0	5	0	235	217
645	63	2	0	4	0	4	44	10	9	148	50	0	0	14	0	348	295
646	52	3	3	10	3	1	21	156	45	148	57	4	0	8	3	514	419
647	43	0	0	11	0	0	20	37	6	26	5	0	0	6	0	155	147
648	96	0	0	10	0	0	17	64	12	114	12	0	0	9	1	336	316
649	56	4	1	1	0	1	52	7	4	181	22	0	0	35	0	364	342
650	49	8	2	4	0	4	76	5	6	193	18	0	1	48	0	413	392
651	22	0	0	0	0	0	12	1	2	61	22	0	0	16	0	136	115
652	21	0	0	1	0	1	13	0	2	150	38	0	0	22	0	248	212
653	42	1	0	1	0	2	8	0	3	197	35	0	0	31	0	320	286
654	30	0	0	0	0	0	6	0	0	178	42	0	0	12	0	268	229
655	22	1	0	37	4	0	46	81	14	52	13	2	0	5	0	277	255
656	96	0	0	8	0	0	58	45	1	140	10	0	0	1	0	359	350
657	77	0	0	7	0	0	30	17	16	126	9	0	1	4	0	287	265
658	69	1	0	10	0	0	25	33	12	78	11	0	0	5	0	244	225
659	59	3	0	3	0	4	29	13	6	134	37	0	0	23	0	311	273
660	88	0	0	13	0	4	34	3	10	194	50	0	0	9	0	405	351
661	69	1	0	9	0	4	38	2	1	194	32	0	0	13	0	363	333
662	66	1	0	9	0	4	34	4	9	168	19	0	0	13	0	327	304
663	58	2	3	22	0	1	23	82	9	54	7	4	0	1	0	266	254
664	112	6	5	61	0	1	76	165	35	137	19	1	0	10	0	628	580
665	64	1	0	22	0	0	27	62	3	96	18	0	0	4	0	297	279
666	39	0	0	15	1	0	25	79	15	60	19	1	0	5	0	259	230
667	55	1	0	6	0	0	5	44	6	77	8	0	0	3	0	205	194
668	63	1	0	2	0	1	11	38	18	79	19	0	0	6	0	238	206
669	98	0	0	2	0	2	14	12	7	211	14	0	0	10	0	370	353
670	84	1	0	2	0	1	20	11	6	249	14	0	0	15	0	403	387
671	62	1	0	1	0	1	20	7	5	157	23	0	0	16	0	293	269
672	46	7	0	5	0	1	45	8	23	134	23	0	0	46	0	338	298
673	23	2	0	10	0	2	11	35	53	96	53	6	0	7	1	299	200
674	46	4	0	7	0	2	6	5	18	101	12	0	0	18	0	219	194
675	68	2	0	2	0	4	14	1	3	120	17	0	0	26	0	257	240
676	78	0	0	6	0	0	19	23	10	118	28	0	0	8	0	290	257
677	97	0	0	24	0	5	37	17	5	158	25	0	0	12	0	380	354
678	55	3	0	14	0	5	39	17	16	114	22	0	0	8	0	293	260
679	0	2	7	3	0	2	5	0	33	2	221	0	2	3	0	280	33
680	0	0	3	2	0	4	1	0	42	4	150	0	2	0	0	208	23
681	0	2	0	2	0	15	0	0	43	0	142	0	16	0	0	220	30
682	0	0	0	4	0	59	2	0	16	0	154	0	9	0	0	244	75

--- %calculation 2

samp	ABIE	APIA	ARTE	BETU	CARP	CICH	CORY	FAGU	POAC	PICE	PINU	PLAN	SELA	ULMU	CERE
4	10.0	.6	1.2	2.7	.3	.0	7.1	16.5	1.4	49.6	1.4	6.2	.0	2.1	.9
9	8.0	1.0	1.5	8.5	6.5	.0	3.0	19.5	2.1	32.0	2.8	9.0	.0	.5	5.5
14	4.4	.7	.7	9.9	4.4	.0	5.1	25.2	1.8	29.2	1.5	9.5	.0	1.1	6.6
24	15.7	.6	1.1	2.2	1.9	.0	6.5	30.1	.9	37.9	.8	.2	.0	1.1	1.1
34	12.7	.2	.6	1.8	3.1	.0	5.8	39.5	.6	34.1	.7	.6	.0	.2	.8
44	13.4	.3	.3	1.9	1.1	.0	3.8	47.2	.9	28.4	1.1	1.4	.0	.3	.0
54	6.5	.7	.7	3.9	3.7	.0	6.3	41.7	1.0	31.0	1.0	2.5	.0	.9	.0
64	6.5	.0	.0	4.6	4.4	.0	9.9	40.5	.8	30.6	.6	.8	.0	1.4	.0
74	20.0	.5	1.1	1.6	1.1	.0	5.5	33.4	1.2	31.5	1.1	2.2	.0	.8	.0
84	18.9	.3	.6	7.3	2.7	.0	8.2	30.8	1.1	26.8	1.1	.6	.0	2.1	.0
89	23.7	.7	.9	5.9	.5	.2	12.6	24.9	1.0	27.5	1.2	.2	.0	.7	.0
94	22.4	.8	.0	4.2	1.7	.4	9.1	32.0	1.4	25.7	1.8	.4	.0	.0	.0
99	23.4	.8	.0	8.7	.0	.4	7.9	23.4	1.6	31.8	1.5	.0	.0	.4	.0
104	17.3	.0	.0	3.0	1.7	.0	9.3	29.0	1.3	35.7	1.0	.7	.0	1.0	.0
109	26.0	.3	1.0	6.9	.0	.0	7.9	17.4	1.0	35.5	1.4	.7	.0	2.0	.0
114	17.1	.0	.7	3.7	.7	.0	5.1	37.3	.8	30.5	.8	.0	.0	3.4	.0
119	24.2	.4	.7	2.2	.0	.0	8.0	19.5	1.2	39.4	1.2	1.4	.0	1.8	.0
124	14.8	.2	.2	2.4	.2	.0	12.9	43.6	.6	24.2	.4	.2	.0	.3	.0
129	28.0	.2	.2	2.0	.4	.0	6.6	22.7	.6	36.4	.6	.4	.0	1.5	.0

D-6

134	21.3	.4	.0	3.5	.5	.0	3.7	19.7	.5	49.0	.5	.2	.0	.7	.0
139	22.0	.3	.0	3.6	1.6	.0	10.0	24.6	.9	33.7	.4	.0	.0	2.6	.0
154	25.1	.4	.0	4.6	.0	.0	10.2	19.2	.6	37.3	.6	.0	.0	2.0	.0
164	18.0	.0	.0	7.2	.0	.0	7.4	22.3	.5	42.1	.6	.0	.0	1.9	.0
174	25.6	.0	.0	3.7	.0	.0	8.8	18.8	.6	39.7	.6	.0	.0	2.3	.0
184	29.4	.3	.0	1.6	.0	.0	4.9	4.9	.6	52.0	1.0	.0	.0	4.9	.0
194	23.3	.2	.0	2.7	.0	.0	4.4	7.4	.5	58.7	.7	.0	.0	1.5	.0
204	25.6	.2	.0	2.2	.0	.0	3.1	5.9	.6	58.4	.8	.0	.0	3.1	.0
214	30.5	.0	.0	3.6	.0	.0	4.3	3.3	.5	54.2	1.0	.0	.0	2.6	.0
224	34.2	.0	.0	2.0	.0	.0	4.8	1.1	.5	52.7	1.0	.0	.0	3.6	.0
234	33.6	.0	.0	1.1	.0	.0	6.8	2.4	.6	46.3	.8	.0	.0	8.4	.0
244	29.9	.0	.0	1.6	.0	.0	6.7	3.4	.5	51.9	.7	.0	.0	5.3	.0
255	25.0	.0	.0	1.8	.0	.0	6.8	3.1	.2	52.8	.7	.0	.0	9.6	.0
264	28.2	.0	.0	3.0	.0	.0	5.3	1.2	.4	45.0	.7	.0	.0	16.2	.0
274	19.1	.0	.0	1.7	.0	.0	10.9	.9	.6	46.8	.8	.0	.0	19.1	.0
284	18.4	.0	.0	1.9	.0	.0	21.7	1.2	.5	39.1	.7	.0	.0	16.4	.0
294	26.2	.0	.0	1.4	.0	.0	7.4	.9	.4	47.5	.9	.0	.0	15.4	.0
299	22.3	.0	.0	.8	.0	.0	16.0	.4	.8	35.7	1.3	.0	.0	22.7	.0
304	41.7	.0	.0	1.4	.0	.0	7.6	1.0	.3	34.3	.7	.0	.0	13.0	.0
309	22.8	.0	.0	1.4	.0	.0	11.9	.9	.7	34.2	1.6	.0	.0	26.5	.0
314	24.1	.0	.0	5.4	.0	.0	15.3	.3	.5	20.0	1.0	.0	.0	33.4	.0
319	11.2	.0	.0	5.6	.0	.0	13.8	.0	1.0	22.4	1.7	.0	.0	44.3	.0
324	.9	.0	.0	10.5	.0	.0	27.4	.3	.6	15.9	1.0	.0	.0	43.3	.0
329	1.9	1.3	.0	10.3	.0	.0	24.4	.0	.7	9.6	1.8	.0	.0	50.0	.0
334	.0	.9	.0	4.4	.0	.0	38.2	.0	1.0	7.1	3.0	.0	.0	45.3	.0
344	.0	3.6	.0	5.4	.0	.0	40.3	.0	.0	2.7	2.4	.0	.0	45.7	.0
354	.0	.3	.0	5.0	.0	2.7	46.7	.0	.5	.7	1.2	.0	.0	43.0	.0
359	.0	.0	.0	7.4	.0	.9	55.6	.0	.5	.5	1.6	.0	.0	33.5	.0
364	.0	.2	.0	3.2	.0	.3	64.6	.0	.3	.2	.7	.0	.0	30.5	.0
374	.0	1.2	.0	6.6	.0	1.7	53.2	.0	.6	.0	1.1	.0	.0	35.5	.0
384	.0	.3	.0	4.3	.0	1.5	53.2	.0	.5	.0	.8	.0	.0	39.4	.0
394	.0	.5	.0	5.6	.0	1.7	56.2	.0	.3	.0	.7	.0	.0	35.0	.0
404	.0	.2	.0	20.4	.0	2.6	39.9	.0	.6	.0	1.2	.0	.0	35.1	.0
414	.0	.7	.0	33.3	.0	1.5	38.9	.0	.9	.0	2.1	.0	.0	22.6	.0
424	.0	6.7	.0	66.1	.0	1.7	6.7	.0	2.8	.0	5.1	.0	.0	10.9	.0
435	.0	6.1	.0	61.0	.0	4.1	6.1	.0	3.5	.0	6.0	.0	.0	13.2	.0
444	.0	14.9	.0	32.8	.0	23.9	6.0	.0	3.7	.0	9.7	.0	.0	9.0	.0
449	.0	6.1	.0	56.9	.0	10.2	2.0	.0	4.7	2.0	12.1	.0	.0	6.1	.0
454	.0	.0	2.7	19.6	.0	46.0	14.9	.0	2.3	2.7	4.2	.0	.0	7.4	.0
459	.0	.0	4.9	41.4	.0	12.2	9.7	.0	11.5	4.9	15.5	.0	.0	.0	.0
464	.0	.0	5.1	17.0	.0	54.3	.0	.0	7.4	.0	10.5	.0	5.8	.0	.0
469	.0	.0	.8	5.6	.0	81.9	1.6	.0	2.7	.0	4.6	.0	2.8	.0	.0
474	.0	.0	.0	3.5	.0	80.4	1.2	.0	3.2	.0	6.9	.0	4.8	.0	.0
479	.0	.0	1.1	3.2	.0	80.5	1.1	.0	3.6	.0	6.3	.0	4.3	.0	.0
482	.0	.0	1.1	1.1	.0	80.0	2.2	.0	3.1	.0	6.7	.0	5.8	.0	.0
486	.0	.0	1.8	5.3	.0	65.0	7.0	.0	2.8	.0	10.1	.0	8.1	.0	.0
490	.0	.0	.0	6.4	.0	70.4	6.4	.0	3.5	.0	7.3	.0	6.0	.0	.0
501	19.2	.5	.0	3.4	.0	.0	12.8	6.9	1.5	51.7	1.4	.0	.0	2.5	.0
502	19.5	.4	.0	2.8	.0	.8	32.5	.8	.4	22.0	1.5	.0	.0	19.1	.0
503	4.7	2.6	1.0	7.8	2.1	1.0	12.0	22.9	2.2	29.1	2.5	8.3	.0	.0	3.6
504	11.5	.0	1.2	12.1	.0	.6	8.4	26.5	2.2	32.0	2.6	3.0	.0	.0	.0
505	8.7	.0	.0	11.2	.5	.0	14.3	24.5	1.5	34.1	2.2	.0	.0	2.0	.5
506	20.0	.0	.0	.6	.0	.0	11.5	.0	.0	49.1	1.8	.0	.0	17.0	.0
507	26.9	.4	.0	.0	.0	.8	14.9	1.7	1.0	38.5	1.4	.0	.0	14.5	.0
508	19.0	1.7	.0	.4	.0	.0	21.6	.4	.8	32.4	1.2	.0	.0	22.4	.0
509	1.0	1.0	.0	.0	.0	1.0	38.1	3.0	1.6	2.0	3.1	.0	.0	49.1	.0
510	.0	.5	.5	1.6	.0	1.1	42.8	.0	.0	1.1	2.3	.0	.0	49.9	.0
511	.0	.8	.0	9.3	.0	.8	36.5	.0	.6	1.7	2.7	.0	.0	47.5	.0
512	.0	.3	.0	2.2	.0	1.5	44.8	.0	.4	.6	1.1	.0	.0	49.1	.0
513	.3	.0	.0	1.6	.0	.7	65.2	.0	.0	.7	1.0	.0	.0	30.5	.0
514	.0	.5	.0	3.9	.0	1.0	68.8	.0	.0	.0	1.4	.0	.0	24.4	.0
515	.0	9.2	.0	18.5	.0	4.6	23.1	.0	.0	.0	11.5	.0	5.3	27.7	.0
516	.0	2.8	.0	28.4	.0	11.4	8.5	.0	5.1	.0	14.8	.0	6.2	22.7	.0
517	.0	.0	3.8	41.4	.0	11.3	7.5	.0	5.2	.0	18.0	.0	12.8	.0	.0
518	.0	5.8	.0	5.8	.0	.0	29.0	.0	10.4	.0	30.1	.0	18.9	.0	.0
519	.0	.0	.0	10.9	.0	27.2	10.9	.0	.0	.0	29.1	.0	22.0	.0	.0
520	2.4	.0	.0	16.7	.0	47.8	4.8	.0	3.9	2.4	9.3	.0	12.7	.0	.0
521	13.1	.4	.8	7.6	.4	.0	5.5	26.1	1.7	40.0	1.4	2.5	.0	.4	.0
522	12.0	1.0	.3	3.9	1.3	.0	6.8	38.2	1.2	30.4	1.3	2.6	.0	1.0	.0
523	30.7	.5	.0	2.7	.5	.0	5.0	23.9	1.2	33.4	1.3	.5	.0	.5	.0
524	22.9	.8	.0	13.4	.0	.3	11.0	13.2	1.1	34.4	.7	.0	.0	2.2	.0
525	31.5	.0	.0	1.6	.0	.0	4.6	14.9	1.1	44.1	.8	.0	.0	1.4	.0
526	32.3	.2	.0	3.3	.0	.2	8.0	7.3	.7	42.7	.8	.0	.0	4.5	.0
527	4.4	.0	.0	.0	.0	.0	34.4	.0	1.8	11.1	2.8	.0	.0	45.5	.0
528	4.7	.0	.0	.9	.0	.9	24.2	.0	.6	23.3	2.5	.0	.0	42.8	.0
529	1.7	.0	.0	.0	.0	1.7	30.5	.0	.6	19.2	2.7	.0	.0	43.6	.0

D-7

530	1.3	1.3	.0	.0	.0	5.1	29.2	.0	.0	1.3	3.2	.0	1.8	57.1	.0	
531	.0	.0	.0	24.3	.0	.0	44.1	.0	8.3	.0	13.7	.0	9.6	.0	.0	
532	.0	.0	.0	31.9	.0	12.2	36.5	.0	6.4	.0	6.7	.0	6.3	.0	.0	
533	2.1	.0	.0	12.7	.0	4.2	44.4	.0	6.8	6.3	10.8	.0	10.4	2.1	.0	
534	.0	.0	.0	31.6	.0	5.9	39.5	.0	6.4	.0	7.0	.0	7.8	2.0	.0	
535	19.0	.0	.0	6.2	.0	.0	24.4	8.7	.9	36.4	1.2	.0	.0	3.3	.0	
536	16.5	1.2	.0	2.8	.0	.0	23.4	6.0	1.0	42.3	1.1	.0	.0	5.6	.0	
537	17.9	.4	.0	8.1	.0	.0	26.6	6.7	.2	37.8	1.0	.0	.0	1.4	.0	
538	30.7	2.8	.0	.0	.0	.8	16.8	8.0	1.9	30.3	1.2	.0	.0	7.6	.0	
539	25.9	.3	.0	3.0	.0	1.7	10.1	5.0	.8	43.0	1.0	.0	.0	9.1	.0	
540	28.2	.4	.0	.7	.0	1.1	11.4	.4	.5	45.5	.7	.0	.0	11.0	.0	
541	18.2	.5	.0	2.3	.0	4.1	15.9	.0	.8	32.3	1.3	.0	.0	24.6	.0	
542	9.4	.7	.0	.7	.0	.7	9.4	.7	.0	59.5	1.7	.0	.0	17.4	.0	
543	7.4	.9	.0	2.6	.0	5.7	36.0	.0	.3	9.4	.9	.0	.0	36.9	.0	
550	13.7	1.4	.0	9.2	.0	.0	5.5	17.4	1.9	39.4	2.4	3.7	.0	5.0	.5	
551	20.2	.3	.0	12.6	.3	.8	9.9	18.3	1.1	33.4	1.3	.8	.0	.5	.0	
552	23.5	.3	.0	3.6	.0	.0	11.3	8.3	.4	49.7	.8	.3	.0	1.8	.0	
553	7.2	.0	1.1	5.8	1.4	.0	8.7	11.6	6.2	34.8	5.5	15.9	.0	1.4	.0	
554	8.1	.4	.0	4.4	2.2	.0	5.5	31.3	1.4	41.2	1.4	1.5	.0	2.6	.0	
555	20.4	.0	.3	6.7	.0	.0	12.2	29.8	.7	25.9	.9	.0	.0	3.0	.0	
556	33.4	.3	.0	1.1	.0	.0	3.0	14.4	.4	46.7	.6	.0	.0	.0	.0	
557	23.8	3.9	.0	4.3	.0	.4	12.5	5.9	1.4	40.3	.9	.0	.0	6.6	.0	
558	26.0	1.6	.0	1.2	.0	.8	9.5	9.1	1.5	46.9	1.0	.0	.0	2.4	.0	
559	13.7	.0	1.7	7.3	.0	.0	5.6	44.5	1.4	21.8	1.4	1.3	.0	1.5	.0	
560	26.7	.4	.4	5.7	.0	.0	4.4	21.4	1.2	37.1	1.3	.0	.0	1.3	.0	
561	22.4	.8	.0	7.1	.0	.0	10.0	20.8	1.4	32.4	1.5	.0	.0	3.7	.0	
562	34.7	.0	.0	4.5	.0	1.1	10.1	6.7	1.6	33.6	2.2	.0	.0	5.6	.0	
563	23.9	1.3	.0	7.1	.0	1.3	15.9	.4	.0	42.5	1.2	.0	.0	6.2	.0	
564	25.2	.8	.0	2.5	.0	4.2	13.9	1.7	1.4	36.2	1.4	.0	.0	12.6	.0	
565	16.8	.4	.0	1.1	.0	1.5	14.3	4.4	.9	47.5	1.1	.0	.0	12.1	.0	
566	8.2	2.2	.0	1.6	2.7	1.6	3.8	15.9	2.5	45.9	2.3	8.8	.0	2.7	1.6	
567	14.2	.0	.5	4.4	.0	.0	8.8	33.8	2.0	31.8	2.1	.0	.0	2.4	.0	
568	28.4	.0	.0	2.6	.4	.0	10.5	17.9	1.3	37.0	1.3	.0	.0	.7	.0	
569	21.0	.5	.0	.0	.0	.0	2.0	7.2	1.0	.9	58.3	1.4	.0	.0	7.7	.0
570	20.7	.0	.0	.0	.0	2.8	2.8	2.1	.6	55.7	1.1	.0	.0	14.4	.0	
571	20.8	.5	.0	.5	.0	1.1	7.5	1.1	.7	47.4	1.2	.0	.0	19.2	.0	
572	21.3	.3	.6	7.6	.0	.3	8.9	26.7	1.1	30.8	.8	.3	.0	1.0	.3	
573	21.8	.5	.0	10.7	.0	.0	10.7	8.4	1.6	38.6	1.3	.0	.0	6.0	.0	
574	26.1	2.8	.0	1.4	.0	2.8	22.5	.0	1.5	26.8	2.0	.0	.0	14.1	.0	
575	.0	.9	.0	18.8	.0	9.4	44.3	.0	1.5	.9	5.2	.0	.0	18.8	.0	
576	.0	2.7	2.7	11.0	.0	19.2	32.9	.0	6.8	.0	15.6	.0	8.9	.0	.0	
577	9.6	.5	1.4	1.9	.0	.0	8.2	45.2	1.5	27.4	1.2	1.0	.0	1.9	.0	
578	27.3	.0	.0	2.2	.0	.0	8.7	18.3	1.1	39.5	1.0	.0	.0	1.9	.0	
579	21.4	3.4	.4	3.0	.0	1.7	13.7	2.1	1.4	41.5	1.4	.0	.0	9.8	.0	
580	6.0	.0	.0	1.8	.0	1.8	30.1	2.5	.6	16.8	1.2	.0	.5	38.9	.0	
581	2.8	.0	.0	.0	.0	2.1	45.6	.0	1.0	6.2	2.2	.0	1.5	38.7	.0	
582	.0	.0	.0	16.1	.0	3.0	53.1	.0	1.2	1.2	2.5	.0	1.4	21.5	.0	
583	14.9	.5	1.9	4.7	.0	.0	11.7	20.5	1.9	35.0	2.5	3.3	.0	2.3	.9	
584	16.7	.3	1.0	2.9	1.0	.0	10.6	33.0	1.5	29.5	1.4	1.9	.0	.0	.3	
585	17.6	.3	.0	2.4	.0	.0	7.6	1.3	.8	61.8	.8	.0	.0	7.4	.0	
586	28.0	.0	.0	.8	.0	3.9	6.5	.8	.7	50.2	.7	.0	.0	8.4	.0	
587	22.6	.7	.0	.0	.0	1.8	6.6	1.1	.6	48.8	1.0	.0	.0	16.8	.0	
588	25.9	.4	.0	4.6	.4	.0	4.2	33.9	1.3	25.9	1.2	1.3	.0	.8	.0	
589	19.6	.4	.0	5.2	.0	.0	4.8	27.6	1.3	37.2	1.1	.0	.0	2.8	.0	
590	21.6	.7	.0	16.9	.0	.0	22.3	4.7	1.6	25.5	1.3	.0	.0	5.4	.0	
591	25.9	.0	.0	.0	.0	3.1	13.8	.0	.5	30.7	1.2	.0	.0	24.8	.0	
592	16.8	.8	.0	.0	.0	4.0	14.8	.0	.6	28.4	1.4	.0	.0	33.2	.0	
593	7.5	.8	1.1	5.6	1.1	.0	4.9	37.2	1.5	37.9	1.3	1.1	.0	.0	.0	
594	18.7	.0	.4	13.0	.0	.0	6.5	22.8	1.4	33.7	1.0	1.2	.0	1.2	.0	
595	15.7	.4	.0	41.7	.0	.0	13.5	8.2	1.3	17.5	1.1	.0	.0	.7	.0	
596	22.0	.9	.0	4.2	.0	4.0	12.2	3.7	.8	48.7	.7	.0	.0	2.8	.0	
597	22.4	.0	.0	.7	.0	1.2	14.1	2.4	.5	48.8	.9	.0	.0	9.0	.0	
598	16.8	.3	.0	.6	.0	1.9	16.2	.0	.5	42.5	1.1	.0	.0	20.0	.0	
610	24.3	.4	.0	14.6	.0	.0	9.2	25.5	1.2	23.0	.9	.0	.0	.4	.0	
611	26.9	.6	.0	6.4	.0	.3	10.4	15.1	1.1	38.2	.8	.3	.0	.0	.0	
612	27.4	.6	.0	6.3	.0	.0	6.6	18.2	.9	36.6	.8	.6	.0	1.8	.0	
613	35.4	.0	.0	.0	.0	2.2	4.7	4.0	.6	49.8	1.1	.0	.0	2.2	.0	
614	32.1	.0	.0	.0	.0	.0	4.4	1.5	.0	59.8	2.3	.0	.0	.0	.0	
615	29.3	.3	.0	1.0	.0	1.0	12.9	3.5	.4	48.0	1.0	.0	.0	2.6	.0	
616	12.3	.3	.0	4.6	.0	.0	8.0	40.5	1.5	28.5	1.3	.7	.0	1.3	.3	
617	25.3	.0	.0	11.4	.0	.0	10.0	15.3	1.0	35.6	1.1	.0	.0	.0	.0	
618	21.5	.0	.0	2.5	.0	.0	4.9	1.2	.0	64.4	1.8	.0	.0	3.7	.0	
619	17.8	.0	.0	.0	.0	1.0	7.9	.0	.0	52.5	1.5	.0	.0	19.3	.0	
620	19.5	.8	.0	.0	.0	.0	8.1	.0	.0	53.0	1.1	.0	.0	17.4	.0	
621	21.1	.0	.0	1.2	.0	.6	19.3	.0	.0	29.8	1.8	.0	.0	26.1	.0	
622	17.3	.0	.4	16.5	.0	.4	16.9	14.9	1.4	26.2	2.2	.4	.0	3.2	.0	

D-8

623	8.3	.0	.0	22.7	.0	.0	11.1	37.6	1.6	14.4	3.2	.0	.0	1.1	.0
624	22.2	.0	.0	19.3	.0	.3	13.2	10.6	1.4	28.6	1.7	.0	.0	2.6	.0
625	15.3	.8	.0	2.7	.0	.0	25.2	14.5	.4	38.6	.9	.0	.0	1.5	.0
626	23.8	2.6	.0	3.0	.0	.4	21.2	8.7	.0	36.7	1.0	.0	.0	2.6	.0
627	19.8	.7	.0	2.9	.0	.4	13.2	9.5	.3	48.8	1.0	.4	.0	2.9	.0
628	19.1	1.4	.0	2.8	.0	.7	19.1	.0	1.1	26.9	2.4	.0	.8	25.5	.0
629	17.5	.6	.0	.6	.0	3.2	19.4	.0	1.2	23.3	2.1	.0	1.5	30.5	.0
630	22.6	.3	.0	4.3	.0	1.0	12.1	2.8	.6	49.2	.9	.0	.0	6.3	.0
631	22.8	1.7	.4	.8	.0	3.6	9.8	4.2	.5	48.4	.6	.0	.0	6.9	.2
632	21.8	.4	.0	1.1	.0	1.1	15.8	1.4	.5	48.9	1.1	.0	.0	8.1	.0
633	28.8	1.2	.0	1.2	.0	.8	9.7	3.5	1.2	43.6	1.1	.0	.0	8.6	.4
634	16.5	.5	.0	1.6	.0	3.1	12.1	.8	.7	56.3	.8	.0	.0	7.5	.0
635	23.6	.3	.0	.0	.0	2.1	5.7	.0	.0	58.3	1.0	.0	.0	9.0	.0
636	.9	.0	.0	3.8	.0	1.3	43.2	.3	.4	5.6	1.2	.0	.0	43.2	.0
637	.0	1.8	.0	7.1	.0	5.3	31.9	1.8	5.3	1.8	10.6	.0	6.1	28.3	.0
638	10.7	.6	.0	2.8	.0	2.2	15.2	12.4	1.3	47.2	2.5	1.7	.0	1.1	2.2
639	11.9	.4	.0	11.5	.0	2.6	11.0	8.8	1.6	46.3	1.8	.4	.0	3.5	.0
640	10.4	2.6	.2	15.2	.2	.0	27.9	22.6	.8	15.6	1.2	2.2	.0	.0	1.0
641	16.0	.7	.0	13.8	.0	.0	16.5	26.0	.8	24.8	.9	.2	.0	.2	.0
642	18.1	.0	.3	2.7	.0	.3	18.1	22.8	.5	35.1	.8	.5	.0	.8	.0
643	28.9	.0	.0	.0	.0	.3	7.8	7.2	.2	52.0	1.0	.0	.0	2.6	.0
644	26.2	.0	.0	.0	.0	.9	8.7	10.1	.3	50.1	1.4	.0	.0	2.3	.0
645	21.3	.7	.0	1.4	.0	1.4	14.9	3.4	.7	50.2	1.3	.0	.0	4.7	.0
646	12.4	.7	.7	2.4	.7	.2	5.0	37.2	.9	35.3	1.0	1.0	.0	1.9	.7
647	29.2	.0	.7	7.5	.0	.0	13.6	25.1	1.2	17.6	1.1	.0	.0	4.1	.0
648	30.3	.0	.3	3.2	.0	.0	5.4	20.2	.8	36.0	.8	.0	.0	2.8	.3
649	16.4	1.2	.3	.3	.0	.3	15.2	2.0	.4	52.9	.9	.0	.0	10.2	.0
650	12.5	2.0	.0	1.0	.0	1.0	19.4	1.3	.5	49.1	.7	.0	.0	12.2	.0
651	19.0	.0	.0	.0	.0	.0	10.4	.9	.6	52.7	2.7	.0	.0	13.8	.0
652	9.9	.0	.0	.5	.0	.5	6.1	.0	.3	70.6	1.7	.0	.0	10.4	.0
653	14.7	.3	.0	.3	.0	.7	2.8	.0	.4	68.7	1.2	.0	.0	10.8	.0
654	13.1	.0	.0	.0	.0	.0	2.6	.0	.0	77.5	1.6	.0	.0	5.2	.0
655	.8	.4	.0	14.5	1.6	.0	18.0	31.7	1.0	20.4	1.0	.8	.0	2.0	.0
656	27.4	.0	.0	2.3	.0	.0	16.6	12.8	.0	40.0	.7	.0	.0	.3	.0
657	29.0	.0	.0	2.6	.0	.0	11.3	6.4	1.0	47.4	.8	.0	.0	1.5	.0
658	30.5	.4	.0	4.4	.0	.0	11.1	14.6	1.1	34.5	1.1	.0	.0	2.2	.0
659	21.6	1.1	.0	1.1	.0	1.5	10.6	4.8	.7	49.0	1.3	.0	.0	8.4	.0
660	25.1	.0	.0	3.7	.0	1.1	9.7	.9	.7	55.2	1.1	.0	.0	2.6	.0
661	20.7	.3	.0	2.7	.0	1.2	11.4	.6	.0	58.2	1.0	.0	.0	3.9	.0
662	21.7	.3	.0	3.0	.0	1.3	11.2	1.3	.7	55.2	1.0	.0	.0	4.3	.0
663	22.8	.8	1.2	8.7	.0	.4	9.1	32.3	.9	21.2	.8	1.6	.0	.4	.0
664	19.3	1.0	.9	10.5	.0	.2	13.1	28.4	.6	23.6	.5	.2	.0	1.7	.0
665	22.9	.4	.0	7.9	.0	.0	9.6	22.1	.4	34.3	1.0	.0	.0	1.4	.0
666	16.9	.0	.0	6.5	.4	.0	10.8	34.3	1.2	26.0	1.3	.4	.0	2.2	.0
667	28.2	.5	.0	3.1	.0	.0	2.6	22.6	.9	39.5	1.1	.0	.0	1.5	.0
668	30.5	.5	.0	1.0	.0	.5	5.3	18.4	1.4	38.2	1.4	.0	.0	2.9	.0
669	27.7	.0	.0	.6	.0	.6	4.0	3.4	.6	59.7	.7	.0	.0	2.8	.0
670	21.7	.3	.0	.5	.0	.3	5.2	2.8	.5	64.3	.7	.0	.0	3.9	.0
671	23.0	.4	.0	.4	.0	.4	7.4	2.6	.6	58.2	1.2	.0	.0	5.9	.0
672	15.4	2.3	.0	1.7	.0	.3	15.1	2.7	1.1	44.9	1.1	.0	.0	15.4	.0
673	11.4	1.0	.0	5.0	.0	1.0	5.5	17.4	2.0	47.8	2.0	3.0	.0	3.5	.5
674	23.7	2.1	.0	3.6	.0	1.0	3.1	2.6	1.5	52.0	1.3	.0	.0	9.3	.0
675	28.2	.8	.0	.8	.0	1.7	5.8	.4	.5	49.8	1.2	.0	.0	10.8	.0
676	30.3	.0	.0	2.3	.0	.0	7.4	8.9	.9	45.8	1.3	.0	.0	3.1	.0
677	27.3	.0	.0	6.8	.0	1.4	10.4	4.8	.5	44.5	.9	.0	.0	3.4	.0
678	21.1	1.2	.0	5.4	.0	1.9	15.0	6.5	1.1	43.7	1.2	.0	.0	3.1	.0
679	.0	6.0	20.4	8.9	.0	6.0	14.9	.0	10.4	6.0	16.1	.0	2.1	8.9	.0
680	.0	.0	12.4	8.5	.0	17.1	4.3	.0	15.9	17.1	21.4	.0	3.0	.0	.0
681	.0	6.6	.0	6.6	.0	49.2	.0	.0	12.3	.0	16.3	.0	9.1	.0	.0
682	.0	.0	.0	5.3	.0	78.7	2.7	.0	3.7	.0	6.7	.0	2.9	.0	.0

--- MA5 of stratigraphic sequence

weights of moving average are: [1,4,6,4,1]

samp	ABIE	APIA	ARTE	BETU	CARP	CICH	CORY	FAGU	POAC	PICE	PINU	PLAN	SELA	ULMU	CERE
4	8.8	.8	1.3	5.4	2.9	.0	5.4	18.4	1.7	41.4	1.9	7.5	.0	1.4	3.1
9	8.1	.8	1.2	6.9	4.0	.0	4.9	20.9	1.8	36.4	2.0	7.8	.0	1.1	4.3
14	9.0	.7	1.0	6.6	4.0	.0	5.1	25.4	1.6	33.7	1.6	6.3	.0	.9	4.2
24	11.5	.6	.7	4.4	3.1	.0	5.6	31.6	1.1	33.8	1.1	3.2	.0	.8	2.6
34	12.7	.4	.4	2.5	2.4	.0	5.5	38.3	.9	33.1	.9	1.4	.0	.5	1.0
44	11.2	.4	.3	2.6	2.5	.0	5.5	42.4	.9	31.2	.9	1.4	.0	.5	.3
54	9.5	.4	.4	3.3	3.0	.0	6.5	42.1	.9	30.5	.9	1.7	.0	.8	0.0
64	11.1	.3	.5	3.7	3.1	.0	7.4	38.8	1.0	30.5	.9	1.6	.0	1.1	.0
74	15.7	.4	.5	4.2	2.4	0.0	7.8	34.5	1.1	29.8	1.0	1.3	.0	1.3	.0
84	19.8	.5	.5	5.2	1.8	.1	8.8	30.6	1.1	28.3	1.1	.9	.0	1.3	.0
89	21.9	.6	.4	5.7	1.3	.2	9.9	28.6	1.2	27.4	1.3	.5	.0	.9	.0

D-9

94	22.5	.7	.0	5.9	1.0	.3	9.6	27.8	1.3	28.4	1.5	.3	.0	.5	.0
99	21.8	.6	.0	5.9	.9	.3	8.9	26.7	1.4	31.2	1.4	.3	.0	.6	.0
104	21.3	.3	.0	5.5	.8	.1	8.3	25.4	1.3	33.7	1.3	.4	.0	1.2	.0
109	21.3	.2	.6	4.9	.6	0.0	7.6	25.8	1.1	34.3	1.2	.5	.0	2.0	.0
114	20.9	.2	.7	4.0	.4	.0	7.3	27.8	1.0	33.9	1.0	.6	.0	2.3	.0
119	20.4	.2	.6	2.9	.3	.0	8.4	30.1	.9	32.9	.9	.7	.0	1.8	.0
124	21.0	.2	.3	2.4	.3	.0	9.0	30.5	.8	33.0	.7	.5	.0	1.2	.0
129	22.4	.3	.2	2.6	.4	.0	7.8	27.1	.7	36.5	.6	.3	.0	1.1	.0
134	23.0	.3	.1	3.1	.7	.0	7.0	23.2	.7	39.7	.5	.2	.0	1.4	.0
139	22.7	.3	.1	3.9	.8	.0	8.1	21.8	.7	39.1	.5	.1	.0	1.9	.0
154	22.3	.3	.1	4.9	.4	.0	9.0	21.3	.6	38.5	.5	0.0	.0	2.1	.0
164	22.6	.1	0.0	5.1	.1	.0	8.5	19.7	.6	40.4	.6	.0	.0	2.3	.0
174	24.5	.1	.1	4.1	.0	.0	7.3	15.5	.6	44.4	.7	.0	.0	2.8	.0
184	26.0	.2	.3	2.8	.0	.0	5.8	10.1	.6	50.4	.8	.0	.0	3.1	.0
194	26.0	.2	.4	2.4	.0	.0	4.5	6.8	.6	55.5	.8	.0	.0	2.9	.0
204	27.0	.2	.3	2.6	.0	.0	3.9	5.3	.5	56.6	.8	.0	.0	2.7	.0
214	30.0	.1	.7	2.6	.0	.0	4.3	3.6	.5	54.7	.9	.0	.0	3.3	.0
224	32.3	0.0	0.0	2.1	.0	.0	5.2	2.4	.5	51.8	.9	.0	.0	4.6	.0
234	32.1	.0	.0	1.6	.0	.0	6.1	2.5	.5	50.2	.8	.0	.0	6.1	.0
244	29.7	.0	.0	1.6	.0	.0	6.5	2.8	.5	50.4	.8	.0	.0	7.7	.0
255	27.2	.0	.0	2.0	.0	.0	6.6	2.5	.4	49.9	.7	.0	.0	10.7	.0
264	24.6	.0	.0	2.2	.0	.0	8.2	1.7	.4	47.5	.7	.0	.0	14.6	.0
274	22.0	.0	.0	2.1	.0	.0	11.7	1.2	.5	44.9	.8	.0	.0	16.9	.0
284	21.4	.0	.0	1.7	.0	.0	14.1	1.0	.5	43.3	.8	.0	.0	17.2	.0
294	23.8	.0	.0	1.4	.0	.0	13.4	.8	.5	41.6	.9	.0	.0	17.5	.0
299	27.9	.0	.0	1.2	.0	.0	11.8	.8	.5	38.4	1.0	.0	.0	18.3	.0
304	30.1	.0	.0	1.5	.0	.0	11.2	.8	.6	34.6	1.1	.0	.0	20.2	.0
309	27.1	.0	.0	2.6	.0	.0	12.0	.7	.6	30.0	1.2	.0	.0	25.7	.0
314	20.2	.0	.0	4.5	.0	.0	14.3	.4	.7	24.8	1.3	.0	.0	33.8	.0
319	12.0	.1	.0	6.8	.0	.0	18.1	.2	.7	20.1	1.3	.0	.0	40.6	.0
324	5.1	.4	.0	8.5	.0	.0	23.1	.1	.7	15.7	1.5	.0	.0	44.8	.0
329	1.6	.9	.0	8.3	.0	.0	28.9	.1	.7	10.9	1.9	.0	.0	46.6	.0
334	.5	1.6	.0	6.5	.0	.2	35.1	0.0	.6	6.8	2.3	.0	.0	46.3	.0
344	.1	1.7	.0	5.5	.0	.7	41.3	.0	.4	3.6	2.2	.0	.0	44.4	.0
354	.0	1.1	.0	5.5	.0	1.3	47.9	.0	.4	1.5	1.7	.0	.0	40.7	.0
359	.0	.4	.0	5.6	.0	1.2	54.5	.0	.4	.5	1.3	.0	.0	36.0	.0
364	.0	.4	.0	5.3	.0	1.0	57.7	.0	.5	.2	1.1	.0	.0	33.9	.0
374	.0	.6	.0	5.2	.0	1.3	56.4	.0	.5	.1	.9	.0	.0	35.1	.0
384	.0	.6	.0	6.2	.0	1.6	53.8	.0	.5	0.0	.9	.0	.0	36.5	.0
394	.0	.4	.0	10.8	.0	1.9	50.1	.0	.5	.0	1.0	.0	.0	35.4	.0
404	.0	.8	.0	21.8	.0	2.0	42.5	.0	.7	.0	1.5	.0	.0	30.7	.0
414	.0	2.4	.0	38.3	.0	2.0	30.1	.0	1.4	.0	2.8	.0	.0	23.0	.0
424	.0	5.2	.0	51.7	.0	3.7	16.6	.0	2.4	.0	4.6	.0	.0	15.8	.0
435	.0	8.1	.0	53.3	.0	8.6	8.0	.0	3.3	.1	6.9	.0	.0	11.7	.0
444	.0	9.1	.0	47.1	.0	15.5	5.6	.0	3.8	.7	8.8	.0	.0	9.3	.0
449	.0	6.4	1.0	40.8	.0	22.3	7.0	.0	4.2	1.7	9.4	.0	.0	7.2	.0
454	.0	2.5	2.5	35.0	.0	27.7	8.9	.0	5.6	2.7	9.7	.0	.4	4.9	.0
459	.0	.4	3.8	28.6	.0	35.4	7.6	.0	7.2	2.6	10.5	.0	1.6	2.2	.0
464	.0	.0	3.5	19.5	.0	51.8	3.8	.0	6.7	1.4	9.7	.0	3.2	.5	.0
469	.0	.0	1.9	10.0	.0	70.2	1.6	.0	4.6	.3	7.4	.0	4.0	.0	.0
474	.0	.0	.9	4.6	.0	79.2	1.2	.0	3.4	.0	6.4	.0	4.3	.0	.0
479	.0	.0	.8	3.0	.0	79.5	1.8	.0	3.3	.0	6.7	.0	4.9	.0	.0
482	.0	.0	1.1	3.1	.0	75.8	3.3	.0	3.2	.0	7.5	.0	6.0	.0	.0
486	.0	.0	1.1	4.3	.0	71.5	5.2	.0	3.1	.0	8.2	.0	6.7	.0	.0
490	.0	.0	.7	5.5	.0	69.3	6.2	.0	3.2	.0	8.3	.0	6.7	.0	.0

ANHANG E ALTER DER POLLENANALYTISCH DATIERTEN PROBEN

E.1 ALTER IN TIEFEN DES STANDARDPROFILS

Das Alter wird in Bezug auf eine Probe des Standardprofiles angegeben. Die Probennummer entspricht dem Abstand von der Oberfläche zur Probe-stelle [cm]. Die Methode der Datierung ist in Kapitel 4 dargestellt.

P = Probe; K = Bohrkern; T = Probtiefe [cm]

Typ = Verwendung der Probe für Datierung:

BAS = Basisprobe; T1 = Transsekt 1; T2 = Transsekt 2; TX = Transsekt 1 & 2;

UNU = nicht gebraucht

Ähnlichkeitsmasse:

MAN = Manhattan; EUC = Euklid; MAN-SQ = wurzeltransformiert, Manhattan;

EUC-SQ = wurzeltransformiert, Euklid

p = Wahrscheinlichkeit; Ψ = 90 % Konfidenzintervall;

P	K	T	Typ	MAN	p	Ψ	EUC	p	Ψ	MAN-SQ	p	Ψ	EUC-SQ	p	Ψ	OPT	p	Ψ	
501	3	22	BAS	184.64	5	184.74	5	184.46	15	184.76	9	184.76	9	184.76	9	184.76	9	184.76	9
502	3	27	UNU	314.83	5	314.67	2	314.64	16	314.75	5	314.83	5	314.83	5	314.83	5	314.83	5
503	4	28	T2	14.54	2	14.72	2	9.61	2	14.50	2	14.72	2	14.72	2	14.72	2	14.72	2
504	4	56	T2	14.23	46	14.50	39	99.37	15	99.48	5	99.48	5	99.48	5	99.48	5	99.48	5
505	4	84	T2	104.41	35	14.64	39	109.39	34	104.64	40	154.22	29	104.64	40	154.22	29	104.64	40
506	4	107	T2	274.52	9	274.56	10	274.42	14	294.55	11	274.56	10	274.56	10	274.56	10	274.56	10
507	4	112	BAS	299.53	5	299.52	2	299.62	2	299.64	2	299.64	2	299.64	2	299.64	2	299.64	2
508	4	117	T2	309.61	14	309.48	14	309.41	14	294.52	12	309.61	14	309.61	14	309.61	14	309.61	14
509	5	258	UNU	344.51	5	344.55	5	344.62	9	344.76	9	344.55	5	344.55	5	344.55	5	344.55	5
510	5	268	BAS	344.79	5	344.89	5	354.88	7	354.84	7	354.88	7	354.88	7	354.88	7	354.88	7
511	5	278	UNU	334.59	5	334.59	5	344.45	25	344.51	25	344.45	25	344.45	25	344.45	25	344.45	25
512	6	233	BAS	344.50	5	344.81	5	354.62	14	354.77	10	344.81	5	344.81	5	344.81	5	344.81	5
513	6	238	UNU	3641.00	5	3641.00	5	364.95	4	364.98	3	3641.00	5	3641.00	5	3641.00	5	3641.00	5
514	6	243	UNU	3641.00	5	3641.00	5	364.64	5	364.95	5	3641.00	5	3641.00	5	3641.00	5	3641.00	5
515	9	230	BAS	404.57	5	414.42	55	414.35	14	414.67	10	414.67	10	414.67	10	414.67	10	414.67	10
516	9	235	UNU	444.29	21	449.46	21	435.48	17	444.30	14	435.48	17	435.48	17	435.48	17	435.48	17
517	9	240	UNU	454.26	12	449.36	11	459.52	20	459.84	3	459.84	3	459.84	3	459.84	3	459.84	3
518	10	476	BAS	414.42	57	404.54	42	490.65	38	424.22	44	490.65	38	490.65	38	490.65	38	490.65	38
519	10	481	UNU	459.54	34	459.73	3	490.97	4	490.83	13	490.97	4	490.97	4	490.97	4	490.97	4
520	10	486	UNU	464.83	5	464.80	3	464.55	14	464.48	14	490.35	12	464.48	14	490.35	12	464.48	14
521	11	28	T2	24.34	60	24.45	55	104.27	52	104.37	19	24.45	55	24.45	55	24.45	55	24.45	55
522	11	56	T2	64.52	18	64.50	19	64.72	10	64.52	10	64.72	10	64.72	10	64.72	10	64.72	10
523	11	84	T2	134.29	31	129.39	37	129.50	30	129.53	15	129.53	15	129.53	15	129.53	15	129.53	15
524	11	107	UNU	154.52	31	164.70	5	164.80	5	164.98	5	164.98	5	164.98	5	164.98	5	164.98	5
525	11	112	BAS	174.91	5	174.87	5	174.88	5	174.57	5	174.91	5	174.91	5	174.91	5	174.91	5
526	11	117	UNU	234.64	32	234.65	31	184.38	28	184.71	29	184.71	29	184.71	29	184.71	29	184.71	29
527	12	118	BAS	334.50	9	334.54	7	329.54	5	334.38	9	329.54	5	329.54	5	329.54	5	329.54	5
528	12	128	UNU	324.71	2	324.63	2	324.69	2	324.49	2	324.71	2	324.71	2	324.71	2	324.71	2

E-2

529 12 138	UNU	329.55	5	324.50	3	329.56	5	324.39	5	329.56	5
530 12 148	UNU	334.60	2	334.76	2	344.69	5	344.80	5	344.80	5
531 13 472	UNU	404.79	5	414.59	5	404.73	5	414.95	5	414.95	5
532 13 477	BAS	414.52	25	414.79	23	414.42	39	459.75	2	414.79	23
533 13 482	UNU	404.46	49	404.87	5	459.20	75	459.39	46	404.87	5
534 13 487	UNU	414.62	5	414.88	5	414.63	5	414.65	25	414.88	5
535 14 64	UNU	154.59	29	164.38	59	164.72	5	164.64	5	164.72	5
536 14 69	BAS	284.90	5	284.97	5	284.58	50	284.61	49	284.90	5
537 14 75	UNU	154.63	5	284.57	56	164.97	5	164.76	5	164.97	5
538 15 67	UNU	304.82	2	304.53	2	244.39	54	299.34	57	244.39	54
539 15 72	BAS	255.35	59	264.37	26	255.48	14	255.52	9	255.52	9
540 15 77	UNU	255.35	29	264.44	24	299.58	21	294.39	17	299.58	21
541 16 60	UNU	309.70	14	309.56	14	309.62	16	309.41	13	309.70	14
542 16 70	BAS	264.50	5	274.61	5	274.66	5	274.61	9	274.66	5
543 16 80	UNU	334.78	5	334.65	5	334.63	9	334.59	5	334.78	5
550 23 35	T1	4.52	76	4.73	72	4.48	76	109.54	75	4.73	72
551 23 40	BAS	104.50	26	154.45	29	104.54	2	104.61	2	104.61	2
552 23 45	T1	184.84	5	184.89	5	184.71	5	184.75	5	184.89	5
553 24 32	T1	4.56	2	4.55	2	4.94	2	41.00	2	41.00	2
554 24 64	T1	24.82	5	24.91	5	64.79	52	64.87	5	64.87	5
555 24 96	T1	89.61	5	89.69	2	164.38	24	119.34	22	89.69	2
556 24 119	BAS	184.50	5	184.61	5	174.50	5	184.78	10	174.50	5
557 24 123	T1	294.25	62	174.44	58	174.34	56	184.70	38	184.70	38
558 24 127	T1	184.81	5	184.76	5	184.87	5	184.94	5	184.94	5
124 25 123	T1	44.87	5	64.50	14	124.99	2	124.97	2	124.99	2
244 25 244	T1	244.37	14	244.32	14	234.45	9	234.46	9	234.46	9
364 25 364	T1	3641.00	5	3641.00	5	3641.00	5	364.99	5	3641.00	5
679 25 460	T1	454.35	23	454.64	65	454.62	14	454.72	2	454.72	2
680 25 470	BAS	459.95	2	459.78	216	464.80	2	459.70	2	459.95	2
681 25 480	T1	464.71	14	464.81	14	469.35	12	469.66	7	464.81	14
682 25 490	T1	474.49	6	474.45	6	474.57	9	474.60	9	474.60	9
559 26 76	TX	44.56	14	54.49	14	64.37	33	74.52	32	44.56	14
560 26 152	TX	164.25	32	134.34	27	164.62	31	164.49	30	134.34	27
561 26 228	TX	154.27	32	104.38	28	164.88	5	164.83	5	164.88	5
562 26 289	TX	304.44	61	304.36	61	234.36	58	174.32	70	234.36	58
563 26 294	BAS	294.40	12	284.41	21	284.52	10	284.39	25	284.52	10
564 26 299	TX	294.39	9	299.51	5	294.35	15	294.36	15	299.51	5
565 26 305	TX	284.59	18	274.52	5	284.61	18	284.48	15	284.61	18
566 27 36	T1	41.00	2	41.00	2	41.00	2	41.00	2	41.00	2
567 27 72	T1	74.49	44	74.56	43	119.54	24	119.60	5	74.56	43
568 27 98	T1	154.60	16	154.38	16	154.48	16	154.28	19	154.60	16
569 27 139	T1	255.35	27	204.64	28	244.37	19	244.64	10	244.64	10
570 27 144	BAS	264.63	4	255.50	4	264.53	4	255.84	4	255.84	4
571 27 149	T1	264.46	10	274.55	5	274.57	10	274.34	20	274.57	10
572 28 96	T1	99.36	12	99.49	10	104.29	12	104.41	7	99.49	10
573 28 192	T1	164.43	86	174.70	5	174.73	10	174.84	5	174.84	5
574 28 288	T1	309.41	10	304.44	5	309.30	10	294.30	11	304.44	5
575 28 380	BAS	404.93	5	404.98	5	404.95	5	404.92	5	404.98	5
576 28 390	T1	459.52	26	459.58	25	490.63	15	459.82	16	459.82	16
577 29 94	T1	54.70	5	54.73	5	54.38	35	54.31	36	54.73	5
578 29 188	T1	164.40	16	174.35	16	174.55	5	174.72	5	174.72	5
579 29 282	T1	284.52	10	284.48	16	284.54	17	274.36	19	284.52	10
580 29 365	T1	324.90	3	324.79	2	324.77	2	324.74	2	324.90	3
581 29 375	BAS	354.57	7	354.55	7	344.56	11	344.82	5	344.82	5
582 29 385	T1	394.51	18	404.47	18	394.46	20	404.62	5	404.62	5
583 30 24	T1	104.29	74	104.38	76	114.34	76	109.30	54	4.24	53
584 30 48	T1	74.55	45	74.59	41	74.41	45	34.36	45	74.59	41
585 30 88	T1	204.52	23	204.81	5	244.37	14	255.76	9	204.81	5
586 30 93	BAS	244.58	5	244.48	5	244.51	10	244.38	10	244.51	10
587 30 98	T1	264.82	5	264.85	5	264.71	5	264.64	20	264.85	5
588 31 64	T1	84.51	10	84.53	9	124.25	34	84.27	39	84.53	9
589 31 128	T1	114.51	14	114.44	15	164.75	27	164.64	23	114.51	14
590 31 192	T1	314.44	101	304.30	72	314.45	70	164.71	55	164.71	55
591 31 254	BAS	309.86	2	309.89	2	309.76	2	304.61	5	309.89	2
592 31 258	T1	314.93	2	314.97	2	314.91	3	314.51	2	314.97	2
593 32 70	T1	34.67	10	34.52	14	64.61	5	54.60	5	34.67	10
594 32 140	T1	104.43	33	104.60	65	109.53	10	109.51	3	104.60	65
595 32 210	T1	424.43	155	424.96	5	164.88	31	99.57	31	164.88	31
596 32 260	BAS	184.62	46	184.78	29	214.41	45	184.42	19	214.41	45

E-3

597 32 270	T1	255.33	18	264.37	9	284.38	25	284.33	23	264.37	9
598 32 280	T1	284.98	5	284.96	5	284.62	5	284.59	5	284.98	5
610 39 60	BAS	94.76	2	89.49	2	94.60	34	94.78	2	94.78	2
611 39 65	UNU	154.50	32	164.52	9	164.45	34	164.60	34	164.60	34
612 39 71	UNU	164.58	18	164.46	16	174.38	31	164.48	31	164.58	18
613 40 173	BAS	224.75	5	224.72	5	224.52	9	224.49	9	224.75	5
614 40 177	UNU	214.53	9	214.42	9	224.53	9	214.63	9	214.63	9
615 40 181	UNU	244.59	21	244.49	5	234.38	15	234.66	14	234.66	14
616 41 104	T2	64.49	14	64.52	14	64.30	39	119.64	38	64.52	14
617 41 208	T2	154.40	34	164.61	9	174.58	5	164.93	5	164.93	5
618 41 312	T2	204.98	5	2041.00	5	224.48	9	214.56	10	2041.00	5
619 41 407	BAS	264.59	5	274.49	5	274.86	5	294.64	16	274.86	5
620 41 412	T2	264.78	5	264.68	5	274.73	5	294.66	16	264.78	5
621 41 417	T2	309.61	2	309.54	2	309.66	3	309.55	9	309.66	3
622 42 65	BAS	89.75	5	94.37	8	109.24	38	104.56	32	89.75	5
623 42 70	UNU	64.57	10	64.50	14	64.34	49	94.50	2	94.50	2
624 42 75	UNU	94.45	5	154.50	31	164.72	5	164.98	5	164.98	5
625 43 117	BAS	154.57	30	154.68	5	174.66	5	164.55	5	154.68	5
626 43 122	UNU	174.42	14	174.45	63	174.49	5	174.74	5	174.74	5
627 43 127	UNU	184.77	5	184.64	5	184.74	5	184.57	5	184.77	5
628 44 352	UNU	314.59	2	314.62	2	314.65	2	314.69	2	314.69	2
629 44 362	BAS	314.88	2	314.89	2	314.77	2	314.78	3	314.88	2
630 45 212	BAS	255.30	29	255.73	10	244.42	24	244.50	5	255.73	10
631 45 217	UNU	244.52	39	255.82	10	244.78	41	244.64	29	255.82	10
632 45 222	UNU	284.46	18	284.38	18	284.66	23	284.59	23	284.66	23
633 46 117	UNU	244.43	52	244.33	52	244.64	10	244.63	10	244.64	10
634 46 121	BAS	244.27	40	194.39	32	274.53	10	274.36	14	274.53	10
635 46 125	UNU	255.59	23	204.50	23	255.57	10	255.58	14	255.59	23
636 47 212	BAS	344.72	5	344.76	5	344.71	9	344.71	5	344.76	5
637 47 217	UNU	344.32	37	404.44	34	354.39	36	344.40	32	404.44	34
638 48 40	BAS	174.35	85	4.84	79	174.34	85	4.32	78	4.84	79
639 48 45	UNU	174.54	5	4.51	81	174.74	5	174.60	5	174.74	5
640 52 36	BAS	89.90	3	891.00	2	94.52	32	89.76	2	891.00	2
641 52 40	UNU	89.77	2	89.94	2	94.66	3	94.77	2	89.94	2
642 52 44	UNU	154.38	27	154.52	30	124.54	24	124.81	17	124.81	17
643 53 121	BAS	184.34	24	184.42	20	244.29	27	234.34	27	184.42	20
644 53 127	UNU	184.79	9	184.82	5	184.78	10	184.84	5	184.84	5
645 53 133	UNU	244.42	45	255.48	44	244.48	33	244.80	35	244.80	35
646 54 80	T2	34.93	5	34.91	5	34.89	5	34.87	5	34.93	5
647 54 160	T2	89.66	2	89.91	3	164.67	30	89.45	31	164.67	3
648 54 240	T2	164.30	19	139.43	21	174.89	5	174.79	5	174.89	5
649 54 319	BAS	284.48	14	274.63	9	284.68	14	284.84	5	284.84	5
650 54 324	T2	284.98	5	284.97	5	2841.00	5	2841.00	5	2841.00	5
651 55 407	UNU	264.38	14	264.49	9	264.35	14	294.36	21	264.49	9
652 55 414	BAS	255.75	10	204.98	5	255.56	9	264.59	9	255.75	10
653 55 420	UNU	255.62	27	2041.00	5	255.79	9	255.55	4	255.79	9
654 55 433	UNU	2041.00	5	2041.00	5	224.40	14	255.39	19	255.39	19
655 57 38	BAS	84.43	7	74.39	11	84.45	14	84.41	14	84.45	14
656 57 43	UNU	174.96	5	174.71	5	174.90	5	174.64	5	174.96	5
657 58 220	UNU	184.54	31	184.61	28	184.33	31	184.72	20	184.72	20
658 58 230	BAS	174.56	14	154.37	16	174.68	5	174.50	5	174.68	5
659 58 242	UNU	255.34	15	255.50	39	244.63	15	255.48	10	244.63	15
660 60 55	UNU	214.37	14	204.55	15	214.48	5	224.85	5	224.85	5
661 60 60	BAS	204.82	5	204.60	5	274.34	38	224.39	15	224.39	15
662 60 65	UNU	204.36	20	194.51	27	224.46	34	244.40	15	244.40	15
663 66 62	BAS	89.73	2	89.70	2	89.52	5	89.58	2	89.73	2
664 66 66	UNU	89.83	2	89.97	2	89.88	15	89.82	2	89.97	2
665 66 70	UNU	154.47	30	154.38	29	164.84	5	164.88	5	164.88	5
666 67 69	T2	74.45	10	84.46	7	119.25	41	84.38	23	84.46	7
667 67 139	T2	134.49	28	134.76	27	164.43	24	134.52	20	134.76	27
668 67 208	T2	174.44	23	174.39	23	174.83	5	174.74	24	174.83	5
669 67 260	T2	204.70	5	204.83	5	214.66	10	214.65	10	204.83	5
670 67 263	BAS	2041.00	5	2041.00	5	214.45	14	204.43	20	2041.00	5
671 67 276	T2	204.64	23	204.65	10	244.52	19	244.71	15	244.71	15
672 67 279	T2	284.81	5	284.84	5	284.80	5	284.79	5	284.84	5
673 68 78	UNU	4.62	82	4.91	3	174.46	81	4.34	77	174.46	81
674 68 84	BAS	255.60	28	255.73	29	255.59	23	255.55	25	255.73	29
675 68 88	UNU	251.66	14	255.67	10	255.68	10	255.52	14	255.68	10
676 74 123	UNU	184.66	28	184.64	27	184.60	28	184.84	19	184.84	19

E-4

677 74 128	BAS	174.44	39	184.45	32	174.36	31	184.38	30	184.45	32
678 74 133	UNU	174.55	60	174.62	5	174.73	10	174.50	5	174.73	10

E.2 ALTER IN ABSOLUTEN ALTERN

Die in Kapitel E.1 im Vergleich zum Standardprofil eingeordneten Proben sind hier mit dem absoluten Alter [ka] tabelliert. Die Transformation des Tiefen- in den Zeitmasstab ist in Kapitel 4 beschrieben.

P	K	T	Typ	MAN	p	Ψ	EUC	p	Ψ	MAN-SQ	p	Ψ	EUC-SQ	p	Ψ	OPT	p	Ψ
501	3	22	BAS	-3.37	.64	.11	-3.37	.74	.10	-3.37	.46	.33	-3.37	.76	.20	-3.37	.76	.20
502	3	27	UNU	-5.38	.83	.11	-5.38	.67	.05	-5.38	.64	.35	-5.38	.75	.11	-5.38	.83	.11
503	4	28	T2	1.35	.54	.05	1.35	.72	.05	1.57	.61	.05	1.35	.50	.05	1.35	.72	.05
504	4	56	T2	1.35	.231	.02	1.35	.50	.86	-.57	.37	.33	-.57	.48	.11	-.57	.48	.11
505	4	84	T2	-.83	.41	.77	1.35	.64	.85	-1.09	.39	.75	-.83	.64	.87	-2.72	.22	.63
506	4	107	T2	-4.94	.52	.20	-4.94	.56	.21	-4.94	.42	.30	-5.19	.55	.25	-4.94	.56	.21
507	4	112	BAS	-5.25	.53	.10	-5.25	.52	.05	-5.25	.62	.05	-5.25	.64	.05	-5.25	.64	.05
508	4	117	T2	-5.34	.61	.30	-5.34	.48	.30	-5.34	.41	.30	-5.19	.52	.26	-5.34	.61	.30
509	5	258	UNU	-5.65	.51	.10	-5.65	.55	.10	-5.65	.62	.20	-5.65	.76	.20	-5.65	.55	.10
510	5	268	BAS	-5.65	.79	.10	-5.65	.89	.10	-5.78	.88	.16	-5.78	.84	.15	-5.78	.88	.16
511	5	278	UNU	-5.51	.59	.11	-5.51	.59	.10	-5.65	.45	.55	-5.65	.51	.55	-5.65	.45	.55
512	6	233	BAS	-5.65	.50	.10	-5.65	.81	.10	-5.78	.62	.30	-5.78	.77	.22	-5.65	.81	.10
513	6	238	UNU	-6.13	.00	.10	-6.13	.00	.10	-6.13	.95	.08	-6.13	.98	.07	-6.13	.00	.10
514	6	243	UNU	-6.13	.00	.10	-6.13	.00	.10	-6.13	.64	.10	-6.13	.95	.10	-6.13	.00	.10
515	9	230	BAS	-8.02	.57	.11	-8.19	.421	.22	-8.19	.35	.31	-8.19	.67	.21	-8.19	.67	.21
516	9	235	UNU	-8.69	.29	.47	-8.78	.46	.46	-8.54	.48	.37	-8.69	.30	.31	-8.54	.48	.37
517	9	240	UNU	-8.86	.26	.25	-8.78	.36	.24	-8.95	.52	.44	-8.95	.84	.05	-8.95	.84	.05
518	10	476	BAS	-8.19	.421	.24	-8.02	.54	.92	-9.57	.65	.84	-8.36	.22	.97	-9.57	.65	.84
519	10	481	UNU	-8.95	.54	.75	-8.95	.73	.05	-9.57	.97	.08	-9.57	.83	.28	-9.57	.97	.08
520	10	486	UNU	-9.04	.83	.11	-9.04	.80	.05	-9.04	.55	.31	-9.04	.48	.31	-9.57	.35	.26
521	11	28	T2	.92	.341	.31	.92	.451	.21	-.83	.271	.15	-.83	.37	.42	.92	.451	.21
522	11	56	T2	.21	.52	.40	.21	.50	.41	.21	.72	.21	.21	.52	.22	.21	.72	.21
523	11	84	T2	-2.28	.29	.68	-2.14	.39	.81	-2.14	.50	.65	-2.14	.53	.33	-2.14	.53	.33
524	11	107	UNU	-2.72	.52	.69	-2.94	.70	.10	-2.94	.80	.10	-2.94	.98	.10	-2.94	.98	.10
525	11	112	BAS	-3.15	.91	.11	-3.15	.87	.10	-3.15	.88	.10	-3.15	.57	.10	-3.15	.91	.11
526	11	117	UNU	-4.39	.64	.70	-4.39	.65	.69	-3.37	.38	.62	-3.37	.71	.64	-3.37	.71	.64
527	12	118	BAS	-5.51	.50	.20	-5.51	.54	.15	-5.48	.54	.10	-5.51	.38	.20	-5.48	.54	.10
528	12	128	UNU	-5.44	.71	.05	-5.44	.63	.05	-5.44	.69	.05	-5.44	.49	.05	-5.44	.71	.05
529	12	138	UNU	-5.48	.55	.10	-5.44	.50	.05	-5.48	.56	.10	-5.44	.39	.10	-5.48	.56	.10
530	12	148	UNU	-5.51	.60	.05	-5.51	.76	.05	-5.65	.69	.11	-5.65	.80	.10	-5.65	.80	.10
531	13	472	UNU	-8.02	.79	.11	-8.19	.59	.10	-8.02	.73	.11	-8.19	.95	.11	-8.19	.95	.11
532	13	477	BAS	-8.19	.52	.55	-8.19	.79	.50	-8.19	.42	.85	-8.95	.75	.05	-8.19	.79	.50
533	13	482	UNU	-8.02	.461	.07	-8.02	.87	.11	-8.95	.201	.64	-8.95	.391	.01	-8.02	.87	.11
534	13	487	UNU	-8.19	.62	.10	-8.19	.88	.10	-8.19	.63	.11	-8.19	.65	.54	-8.19	.88	.10
535	14	64	UNU	-2.72	.59	.64	-2.94	.381	.29	-2.94	.72	.10	-2.94	.64	.10	-2.94	.72	.10
536	14	69	BAS	-5.07	.90	.11	-5.07	.97	.10	-5.07	.581	.11	-5.07	.611	.09	-5.07	.90	.11
537	14	75	UNU	-2.72	.63	.11	-5.07	.571	.22	-2.94	.97	.10	-2.94	.76	.10	-2.94	.97	.10
538	15	67	UNU	-5.31	.82	.05	-5.31	.53	.05	-4.57	.391	.19	-5.25	.341	.24	-4.57	.391	.19
539	15	72	BAS	-4.71	.351	.30	-4.82	.37	.57	-4.71	.48	.31	-4.71	.52	.21	-4.71	.52	.21
540	15	77	UNU	-4.71	.35	.64	-4.82	.44	.53	-5.25	.58	.46	-5.19	.39	.38	-5.25	.58	.46
541	16	60	UNU	-5.34	.70	.30	-5.34	.56	.30	-5.34	.62	.35	-5.34	.41	.28	-5.34	.70	.30
542	16	70	BAS	-4.82	.50	.10	-4.94	.61	.10	-4.94	.66	.11	-4.94	.61	.20	-4.94	.66	.11
543	16	80	UNU	-5.51	.78	.11	-5.51	.65	.11	-5.51	.63	.20	-5.51	.59	.11	-5.51	.78	.11
550	23	35	T1	1.78	.521	.67	1.78	.731	.59	1.78	.481	.68	-1.09	.541	.65	1.78	.731	.59
551	23	40	BAS	-.83	.50	.57	-2.72	.45	.64	-.83	.54	.05	-.83	.61	.05	-.83	.61	.05
552	23	45	T1	-3.37	.84	.11	-3.37	.89	.10	-3.37	.71	.11	-3.37	.75	.10	-3.37	.89	.10
553	24	32	T1	1.78	.56	.05	1.78	.55	.05	1.78	.94	.05	1.78	1.00	.05	1.78	1.00	.05
554	24	64	T1	.92	.82	.11	.92	.91	.11	.21	.791	.15	.21	.87	.11	.21	.87	.11
555	24	96	T1	-.05	.61	.10	-.05	.69	.05	-2.94	.38	.53	-1.62	.34	.48	-.05	.69	.05
556	24	119	BAS	-3.37	.50	.10	-3.37	.61	.10	-3.15	.50	.10	-3.37	.78	.22	-3.15	.50	.10
557	24	123	T1	-5.19	.251	.36	-3.15	.441	.26	-3.15	.341	.23	-3.37	.70	.83	-3.37	.70	.83
558	24	127	T1	-3.37	.81	.10	-3.37	.76	.10	-3.37	.87	.11	-3.37	.94	.11	-3.37	.94	.11
124	25	123	T1	.42	.87	.11	.21	.50	.30	-1.88	.99	.05	-1.88	.97	.05	-1.88	.99	.05
244	25	244	T1	-4.57	.37	.31	-4.57	.32	.31	-4.39	.45	.20	-4.39	.46	.20	-4.39	.46	.20

E-6

364	25	364	T1	-6.131	.00	.10	-6.131	.00	.10	-6.131	.00	.10	-6.13	.99	.10	-6.131	.00	.10
679	25	460	T1	-8.86	.35	.50	-8.86	.641	.43	-8.86	.62	.32	-8.86	.72	.05	-8.86	.72	.05
680	25	470	BAS	-8.95	.95	.05	-8.95	.784	.76	-9.04	.80	.05	-8.95	.70	.05	-8.95	.95	.05
681	25	480	T1	-9.04	.71	.31	-9.04	.81	.30	-9.14	.35	.26	-9.14	.66	.16	-9.04	.81	.30
682	25	490	T1	-9.25	.49	.14	-9.25	.45	.13	-9.25	.57	.21	-9.25	.60	.21	-9.25	.60	.21
559	26	76	TX	.42	.56	.30	.32	.49	.30	.21	.37	.72	.11	.52	.69	.42	.56	.30
560	26	152	TX	-2.94	.25	.71	-2.28	.34	.59	-2.94	.62	.68	-2.94	.49	.66	-2.28	.34	.59
561	26	228	TX	-2.72	.27	.70	-.83	.38	.62	-2.94	.88	.10	-2.94	.83	.10	-2.94	.88	.10
562	26	289	TX	-5.31	.441	.34	-5.31	.361	.35	-4.39	.361	.28	-3.15	.321	.54	-4.39	.361	.28
563	26	294	BAS	-5.19	.40	.26	-5.07	.41	.46	-5.07	.52	.22	-5.07	.39	.54	-5.07	.52	.22
564	26	299	TX	-5.19	.39	.21	-5.25	.51	.11	-5.19	.35	.33	-5.19	.36	.32	-5.25	.51	.11
565	26	305	TX	-5.07	.59	.39	-4.94	.52	.10	-5.07	.61	.40	-5.07	.48	.32	-5.07	.61	.40
566	27	36	T1	1.781	.00	.05	1.781	.00	.05	1.781	.00	.05	1.781	.00	.05	1.781	.00	.05
567	27	72	T1	.11	.49	.97	.11	.56	.94	-1.62	.54	.52	-1.62	.60	.10	.11	.56	.94
568	27	98	T1	-2.72	.60	.36	-2.72	.38	.36	-2.72	.48	.36	-2.72	.28	.42	-2.72	.60	.36
569	27	139	T1	-4.71	.35	.60	-3.78	.64	.61	-4.57	.37	.42	-4.57	.64	.22	-4.57	.64	.22
570	27	144	BAS	-4.82	.63	.09	-4.71	.50	.09	-4.82	.53	.09	-4.71	.84	.09	-4.71	.84	.09
571	27	149	T1	-4.82	.46	.21	-4.94	.55	.11	-4.94	.57	.22	-4.94	.34	.44	-4.94	.57	.22
572	28	96	T1	-.57	.36	.26	-.57	.49	.22	-.83	.29	.27	-.83	.41	.16	-.57	.49	.22
573	28	192	T1	-2.94	.431	.89	-3.15	.70	.11	-3.15	.73	.21	-3.15	.84	.11	-3.15	.84	.11
574	28	288	T1	-5.34	.41	.22	-5.31	.44	.11	-5.34	.30	.21	-5.19	.30	.25	-5.31	.44	.11
575	28	380	BAS	-8.02	.93	.11	-8.02	.98	.10	-8.02	.95	.10	-8.02	.92	.11	-8.02	.98	.10
576	28	390	T1	-8.95	.52	.57	-8.95	.58	.55	-9.57	.63	.34	-8.95	.82	.36	-8.95	.82	.36
577	29	94	T1	-.32	.70	.11	.32	.73	.11	.32	.38	.77	.32	.31	.79	.32	.73	.11
578	29	188	T1	-2.94	.40	.36	-3.15	.35	.36	-3.15	.55	.10	-3.15	.72	.10	-3.15	.72	.10
579	29	282	T1	-5.07	.52	.21	-5.07	.48	.35	-5.07	.54	.37	-4.94	.36	.42	-5.07	.52	.21
580	29	365	T1	-5.44	.90	.05	-5.44	.79	.05	-5.44	.77	.05	-5.44	.74	.05	-5.44	.90	.05
581	29	375	BAS	-5.78	.57	.15	-5.78	.55	.15	-5.65	.56	.25	-5.65	.82	.11	-5.65	.82	.11
582	29	385	T1	-7.57	.51	.40	-8.02	.47	.40	-7.57	.46	.43	-8.02	.62	.11	-8.02	.62	.11
583	30	24	T1	-.83	.291	.63	-.83	.381	.68	-1.35	.341	.68	-1.09	.301	.19	1.78	.241	.17
584	30	48	T1	.11	.55	.99	.11	.59	.89	.11	.41	.99	.53	.36	.99	.11	.59	.89
585	30	88	T1	-3.78	.52	.50	-3.78	.81	.10	-4.57	.37	.32	-4.71	.76	.20	-3.78	.81	.10
586	30	93	BAS	-4.57	.58	.12	-4.57	.48	.12	-4.57	.51	.21	-4.57	.38	.21	-4.57	.51	.21
587	30	98	T1	-4.82	.82	.10	-4.82	.85	.10	-4.82	.71	.11	-4.82	.64	.44	-4.82	.85	.10
588	31	64	T1	0.00	.51	.22	0.00	.53	.20	-1.88	.25	.74	0.00	.27	.85	0.00	.53	.20
589	31	128	T1	-1.35	.51	.32	-1.35	.44	.32	-2.94	.75	.60	-2.94	.64	.51	-1.35	.51	.32
590	31	192	T1	-5.38	.442	.22	-5.31	.301	.58	-5.38	.451	.53	-2.94	.711	.21	-2.94	.711	.21
591	31	254	BAS	-5.34	.86	.05	-5.34	.89	.05	-5.34	.76	.05	-5.31	.61	.10	-5.34	.89	.05
592	31	258	T1	-5.38	.93	.05	-5.38	.97	.05	-5.38	.91	.05	-5.38	.51	.05	-5.38	.97	.05
593	32	70	T1	.53	.67	.21	.53	.52	.30	.21	.61	.10	.32	.60	.11	.53	.67	.21
594	32	140	T1	-.83	.43	.72	-.83	.601	.43	-1.09	.53	.22	-1.09	.51	.05	-.83	.601	.43
595	32	210	T1	-8.36	.433	.42	-8.36	.96	.11	-2.94	.88	.68	-.57	.57	.69	-2.94	.88	.68
596	32	260	BAS	-3.37	.621	.01	-3.37	.78	.63	-3.98	.41	.99	-3.37	.42	.43	-3.98	.41	.99
597	32	270	T1	-4.71	.33	.40	-4.82	.37	.21	-5.07	.38	.56	-5.07	.33	.50	-4.82	.37	.21
598	32	280	T1	-5.07	.98	.10	-5.07	.96	.10	-5.07	.62	.10	-5.07	.59	.10	-5.07	.98	.10
610	39	60	BAS	-.31	.76	.05	-.05	.49	.05	-.31	.60	.74	-.31	.78	.05	-.31	.78	.05
611	39	65	UNU	-2.72	.50	.70	-2.94	.52	.20	-2.94	.45	.74	-2.94	.60	.74	-2.94	.60	.74
612	39	71	UNU	-2.94	.58	.38	-2.94	.46	.36	-3.15	.38	.69	-2.94	.48	.68	-2.94	.58	.38
613	40	173	BAS	-4.18	.75	.11	-4.18	.72	.11	-4.18	.52	.20	-4.18	.49	.20	-4.18	.75	.11
614	40	177	UNU	-3.98	.53	.20	-3.98	.42	.20	-4.18	.53	.20	-3.98	.63	.20	-3.98	.63	.20
615	40	181	UNU	-4.57	.59	.45	-4.57	.49	.11	-4.39	.38	.32	-4.39	.66	.31	-4.39	.66	.31
616	41	104	T2	.21	.49	.30	.21	.52	.31	.21	.30	.86	-1.62	.64	.83	.21	.52	.31
617	41	208	T2	-2.72	.40	.75	-2.94	.61	.20	-3.15	.58	.10	-2.94	.93	.11	-2.94	.93	.11
618	41	312	T2	-3.78	.98	.10	-3.78	.00	.10	-4.18	.48	.20	-3.98	.56	.22	-3.78	.00	.10
619	41	407	BAS	-4.82	.59	.10	-4.94	.49	.10	-4.94	.86	.10	-5.19	.64	.35	-4.94	.86	.10
620	41	412	T2	-4.82	.78	.10	-4.82	.68	.10	-4.94	.73	.10	-5.19	.66	.35	-4.82	.78	.10
621	41	417	T2	-5.34	.61	.05	-5.34	.54	.05	-5.34	.66	.05	-5.34	.50	.20	-5.34	.66	.05
622	42	65	BAS	-.05	.75	.10	-.31	.37	.16	-1.09	.24	.84	-.83	.56	.69	-.05	.75	.10
623	42	70	UNU	.21	.57	.21	.21	.50	.30	.21	.341	.09	-.31	.50	.05	-.31	.50	.05
624	42	75	UNU	-.31	.45	.11	-2.72	.50	.69	-2.94	.72	.10	-2.94	.98	.10	-2.94	.98	.10
625	43	117	BAS	-2.72	.57	.66	-2.72	.68	.10	-3.15	.66	.10	-2.94	.55	.10	-2.72	.68	.10
626	43	122	UNU	-3.15	.42	.32	-3.15	.451	.39	-3.15	.49	.11	-3.15	.74	.11	-3.15	.74	.11
627	43	127	UNU	-3.37	.77	.11	-3.37	.64	.10	-3.37	.74	.10	-3.37	.57	.10	-3.37	.77	.11
628	44	352	UNU	-5.38	.59	.05	-5.38	.62	.05	-5.38	.65	.05	-5.38	.69	.05	-5.38	.69	.05
629	44	362	BAS	-5.38	.88	.05	-5.38	.89	.05	-5.38	.77	.05	-5.38	.78	.05	-5.38	.88	.05
630	45	212	BAS	-4.71	.30	.64	-4.71	.73	.21	-4.57	.42	.53	-4.57	.50	.12	-4.71	.73	.21
631	45	217	UNU	-4.57	.32	.86	-4.71	.82	.21	-4.57	.78	.91	-4.57	.64	.64	-4.71	.82	.21
632	45	222	UNU	-5.07	.46	.40	-5.07	.38	.39	-5.07	.66	.51	-5.07	.59	.50	-5.07	.66	.51

E-7

633 46 117	UNU-4.57	.431.14	-4.57	.331.14	-4.57	.64	.23	-4.57	.63	.22	-4.57	.64	.23
634 46 121	BAS-4.57	.27 .89	-3.57	.39 .71	-4.94	.53	.22	-4.94	.36 .31	-4.94	.53	.22	
635 46 125	UNU-4.71	.59 .50	-3.78	.50 .50	-4.71	.57	.21	-4.71	.58 .30	-4.71	.59	.50	
636 47 212	BAS-5.65	.72 .10	-5.65	.76 .10	-5.65	.71	.20	-5.65	.71 .10	-5.65	.76	.10	
637 47 217	UNU-5.65	.32 .82	-8.02	.44 .75	-5.78	.39 .79	-5.65	.40 .70	-8.02	.44 .75			
638 48 40	BAS-3.15	.351.88	1.78	.841.74	-3.15	.341.88	1.78	.321.71	1.78	.841.74			
639 48 45	UNU-3.15	.54 .11	1.78	.511.79	-3.15	.74 .11	-3.15	.60 .10	-3.15	.74 .11			
640 52 36	BAS-.05	.90 .05	-.051.00	.05	-.31	.52 .70	-.05	.76 .05	-.051.00	.05			
641 52 40	UNU-.05	.77 .05	-.05	.94 .05	-.31	.66 .05	-.31	.77 .05	-.05	.94 .05			
642 52 44	UNU-2.72	.38 .60	-2.72	.52 .66	-1.88	.54 .52	-1.88	.81 .37	-1.88	.81 .37			
643 53 121	BAS-3.37	.34 .53	-3.37	.42 .43	-4.57	.29 .59	-4.39	.34 .59	-3.37	.42 .43			
644 53 127	UNU-3.37	.79 .20	-3.37	.82 .11	-3.37	.78 .21	-3.37	.84 .11	-3.37	.84 .11			
645 53 133	UNU-4.57	.42 .98	-4.71	.48 .96	-4.57	.48 .73	-4.57	.80 .77	-4.57	.80 .77			
646 54 80	T2	.53 .93 .11	.53	.91 .11	.53	.89 .11	.53	.87 .11	.53	.93 .11			
647 54 160	T2	-.05 .66 .05	-.05	.91 .05	-2.94	.67 .66	-.05	.45 .67	-2.94	.67 .05			
648 54 240	T2	-2.94 .30 .42	-2.39	.43 .47	-3.15	.89 .10	-3.15	.79 .10	-3.15	.89 .10			
649 54 319	BAS-5.07	.48 .31	-4.94	.63 .20	-5.07	.68 .31	-5.07	.84 .11	-5.07	.84 .11			
650 54 324	T2	-5.07 .98 .10	-5.07	.97 .10	-5.071.00	.10	-5.071.00	.10	-5.071.00	.10			
651 55 407	UNU-4.82	.38 .30	-4.82	.49 .20	-4.82	.35 .30	-5.19	.36 .46	-4.82	.49 .20			
652 55 414	BAS-4.71	.75 .21	-3.78	.98 .10	-4.71	.56 .20	-4.82	.59 .19	-4.71	.75 .21			
653 55 420	UNU-4.71	.62 .59	-3.781.00	.10	-4.71	.79 .20	-4.71	.55 .09	-4.71	.79 .20			
654 55 433	UNU-3.78	.00 .10	-3.781.00	.10	-4.18	.40 .30	-4.71	.39 .41	-4.71	.39 .41			
655 57 38	BAS 0.00	.43 .16	.11	.39 .25	0.00	.45 .31	0.00	.41 .30	0.00	.45 .31			
656 57 43	UNU-3.15	.96 .10	-3.15	.71 .10	-3.15	.90 .11	-3.15	.64 .10	-3.15	.96 .10			
657 58 220	UNU-3.37	.54 .69	-3.37	.61 .61	-3.37	.33 .69	-3.37	.72 .43	-3.37	.72 .43			
658 58 230	BAS-3.15	.56 .31	-2.72	.37 .35	-3.15	.68 .10	-3.15	.50 .10	-3.15	.68 .10			
659 58 242	UNU-4.71	.34 .33	-4.71	.50 .85	-4.57	.63 .34	-4.71	.48 .21	-4.57	.63 .34			
660 60 55	UNU-3.98	.37 .31	-3.78	.55 .33	-3.98	.48 .10	-4.18	.85 .11	-4.18	.85 .11			
661 60 60	BAS-3.78	.82 .11	-3.78	.60 .10	-4.94	.34 .83	-4.18	.39 .33	-4.18	.39 .33			
662 60 65	UNU-3.78	.36 .44	-3.57	.51 .60	-4.18	.46 .74	-4.57	.40 .34	-4.57	.40 .34			
663 66 62	BAS-.05	.73 .05	-.05	.70 .05	-.05	.52 .10	-.05	.58 .05	-.05	.73 .05			
664 66 66	UNU-.05	.83 .05	-.05	.97 .05	-.05	.88 .32	-.05	.82 .05	-.05	.97 .05			
665 66 70	UNU-2.72	.47 .66	-2.72	.38 .65	-2.94	.84 .10	-2.94	.88 .10	-2.94	.88 .10			
666 67 69	T2	.11 .45 .22	0.00	.46 .15	-1.62	.25 .89	0.00	.38 .50	0.00	.46 .15			
667 67 139	T2	-2.28 .49 .62	-2.28	.76 .60	-2.94	.43 .52	-2.28	.52 .45	-2.28	.76 .60			
668 67 208	T2	-3.15 .44 .50	-3.15	.39 .50	-3.15	.83 .10	-3.15	.74 .53	-3.15	.83 .10			
669 67 260	T2	-3.78 .70 .10	-3.78	.83 .10	-3.98	.66 .21	-3.98	.65 .21	-3.78	.83 .10			
670 67 263	BAS-3.78	.00 .10	-3.781.00	.10	-3.98	.45 .31	-3.78	.43 .44	-3.781.00	.10			
671 67 276	T2	-3.78 .64 .51	-3.78	.65 .21	-4.57	.52 .42	-4.57	.71 .33	-4.57	.71 .33			
672 67 279	T2	-5.07 .81 .10	-5.07	.84 .10	-5.07	.80 .10	-5.07	.79 .10	-5.07	.84 .10			
673 68 78	UNU 1.78	.621.81	1.78	.91 .05	-3.15	.461.78	1.78	.341.69	-3.15	.461.78			
674 68 84	BAS-4.71	.60 .62	-4.71	.73 .63	-4.71	.59 .51	-4.71	.55 .54	-4.71	.73 .63			
675 68 88	UNU-4.71	.66 .30	-4.71	.67 .21	-4.71	.68 .21	-4.71	.52 .31	-4.71	.68 .21			
676 74 123	UNU-3.37	.66 .61	-3.37	.64 .60	-3.37	.60 .62	-3.37	.84 .42	-3.37	.84 .42			
677 74 128	BAS-3.15	.44 .85	-3.37	.45 .70	-3.15	.36 .69	-3.37	.38 .65	-3.37	.45 .70			
678 74 133	UNU-3.15	.551.31	-3.15	.62 .11	-3.15	.73 .21	-3.15	.50 .10	-3.15	.73 .21			

E.3 ABBILDUNGEN DER DATIERUNGEN

Die optimalen Lösungen sind in Kapitel 4 abgebildet, während hier die Ausgangslösungen für die optimale Lösung dargestellt sind. Zuerst werden die vier Lösungen in der Ebene, danach die vier Lösungen im Quertranssekt und zuletzt die vier Lösungen im Längstranssekt gezeigt.

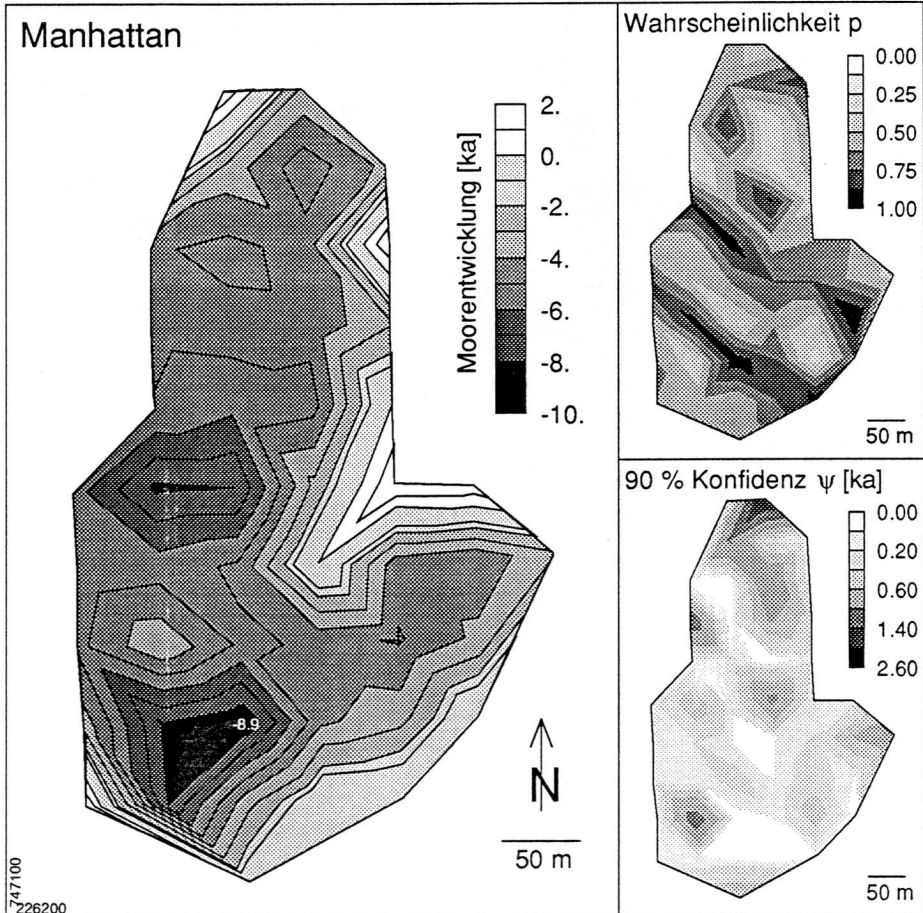


Abb. E.1 Ebene: Manhattan. Die kleine weiße Zahl zeigt den ungefähren Ort und das Alter der ältesten Torfbildung an.

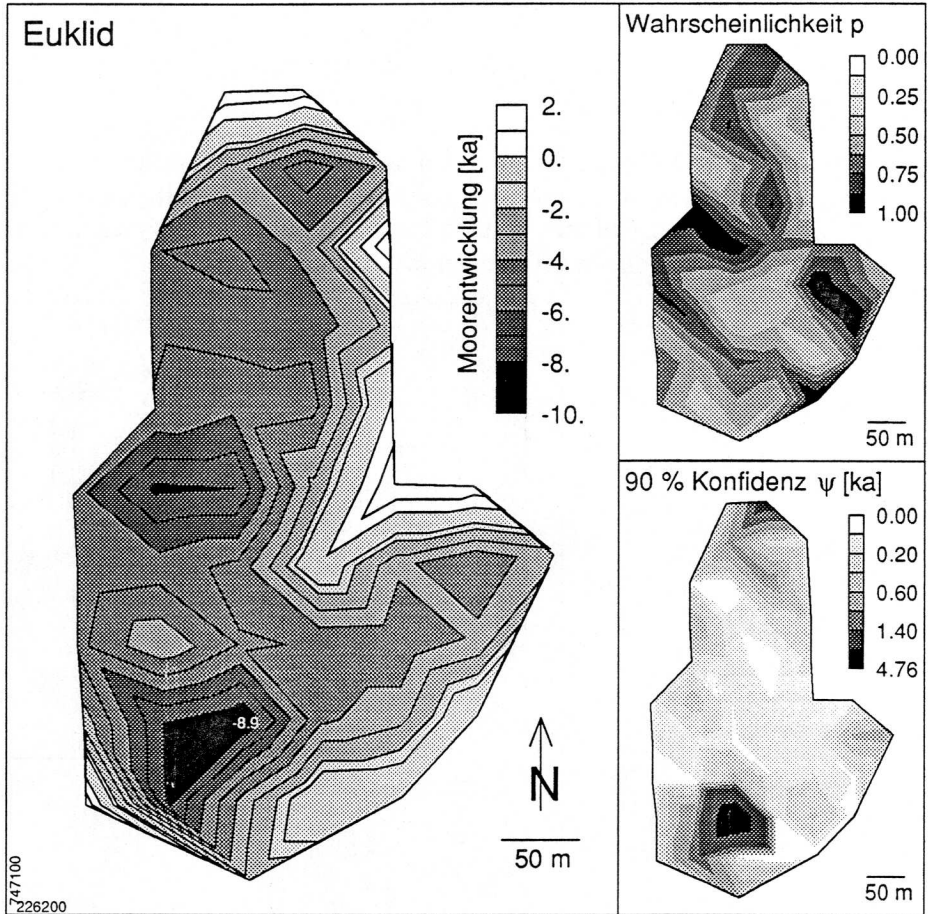


Abb. E.2 Ebene: Euklid

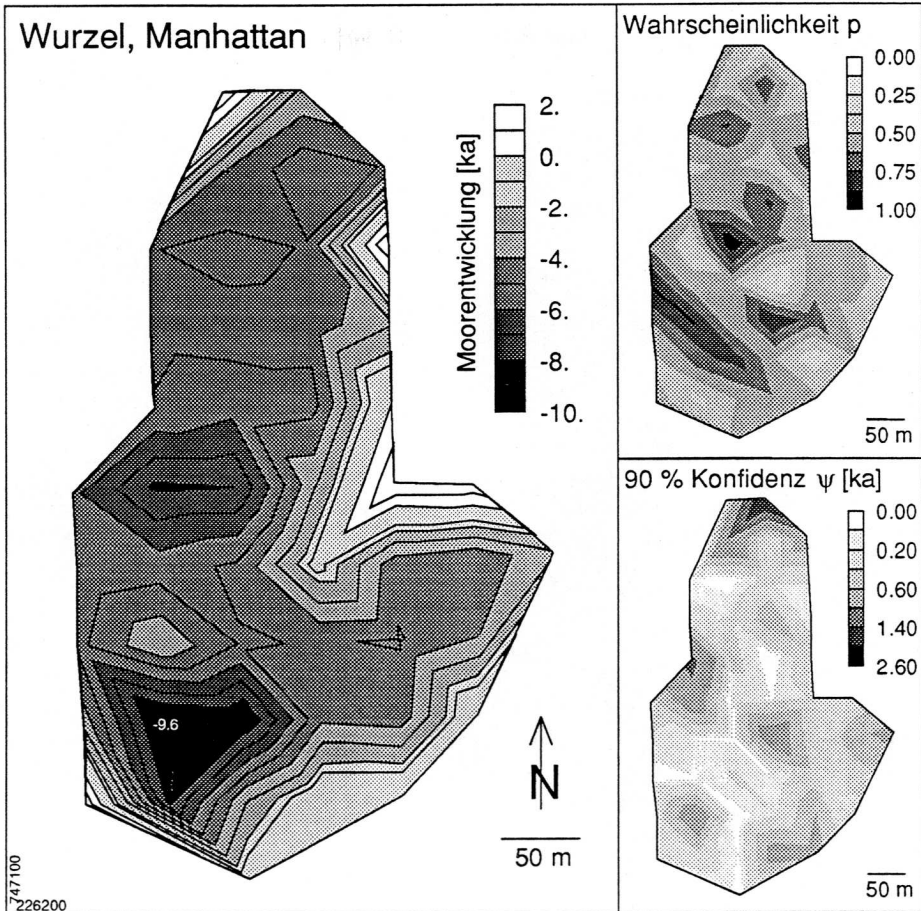


Abb. E.3 Ebene: Wurzeltransformiert, Manhattan

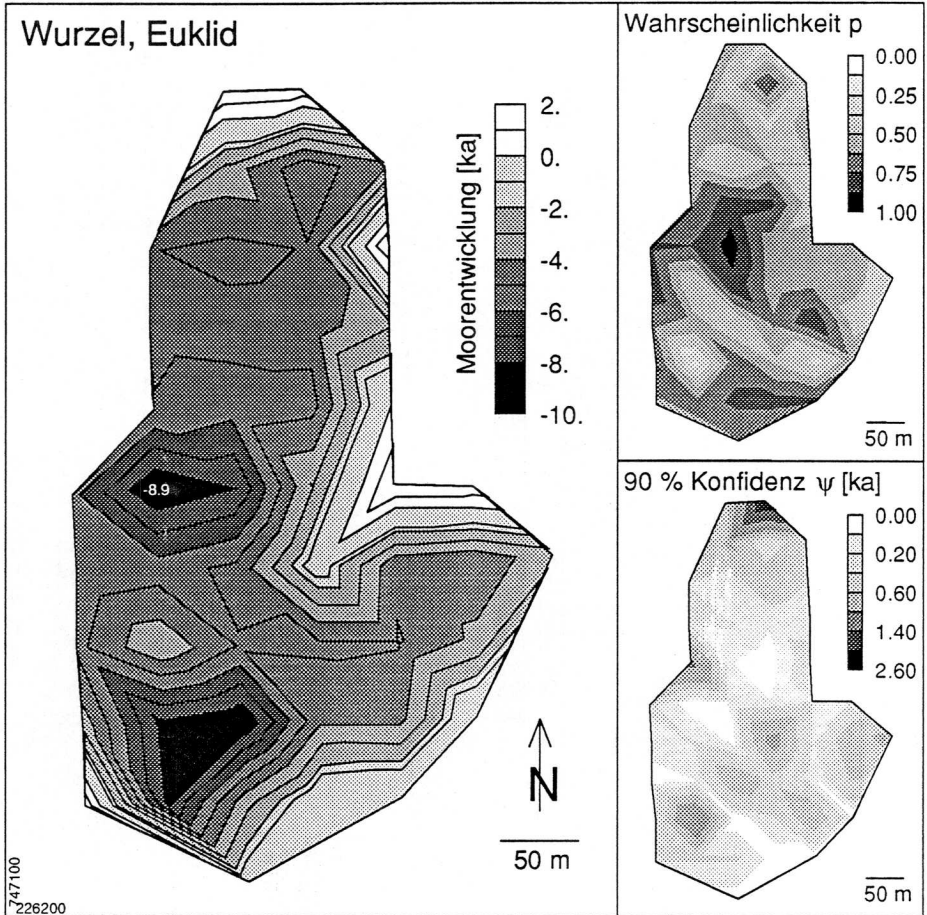


Abb. E.4 Ebene: Wurzeltransformiert, Euklid

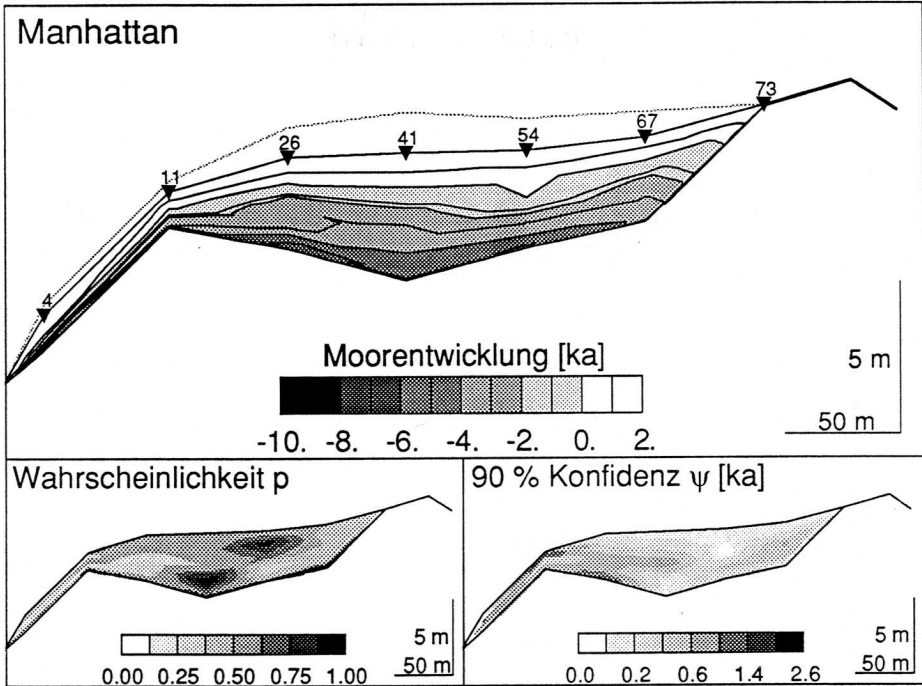


Abb. E.5 Quertranssekt 4–73: Manhattan. Die Dreiecke bezeichnen die Lage der Bohrkern, die punktierte Linie die Oberfläche des Moores vor der Entwässerung.

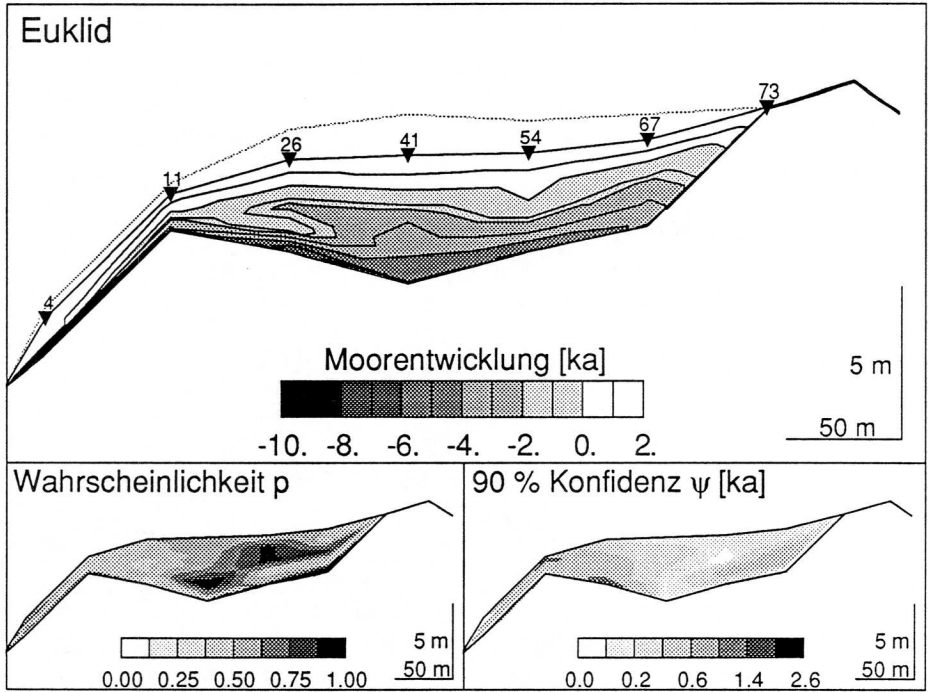


Abb. E.6 Quertranssekt 4-73: Euklid

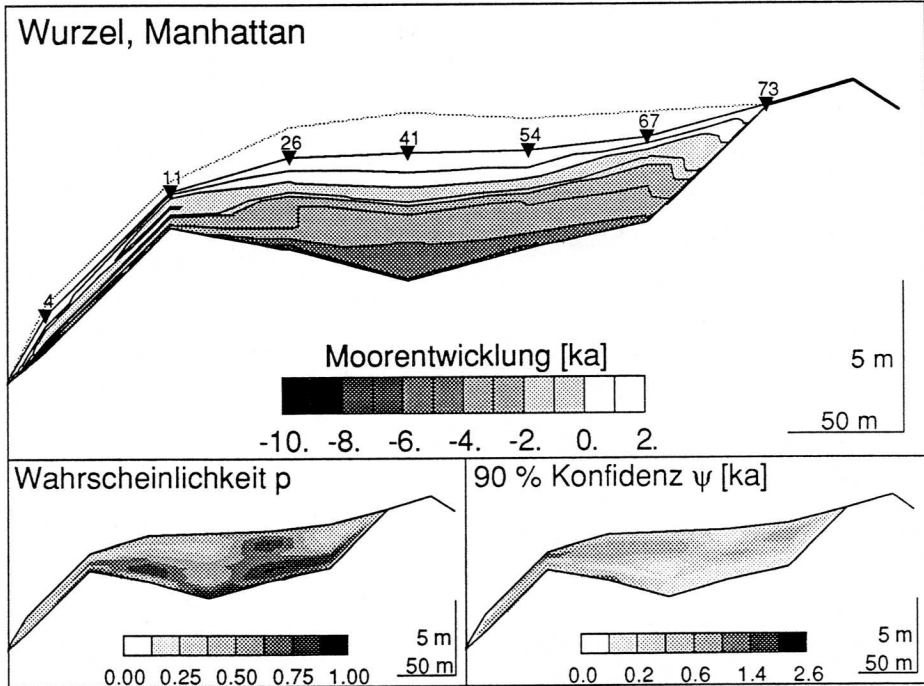


Abb. E.7 Quertranssekt 4-73: Wurzeltransformiert, Manhattan

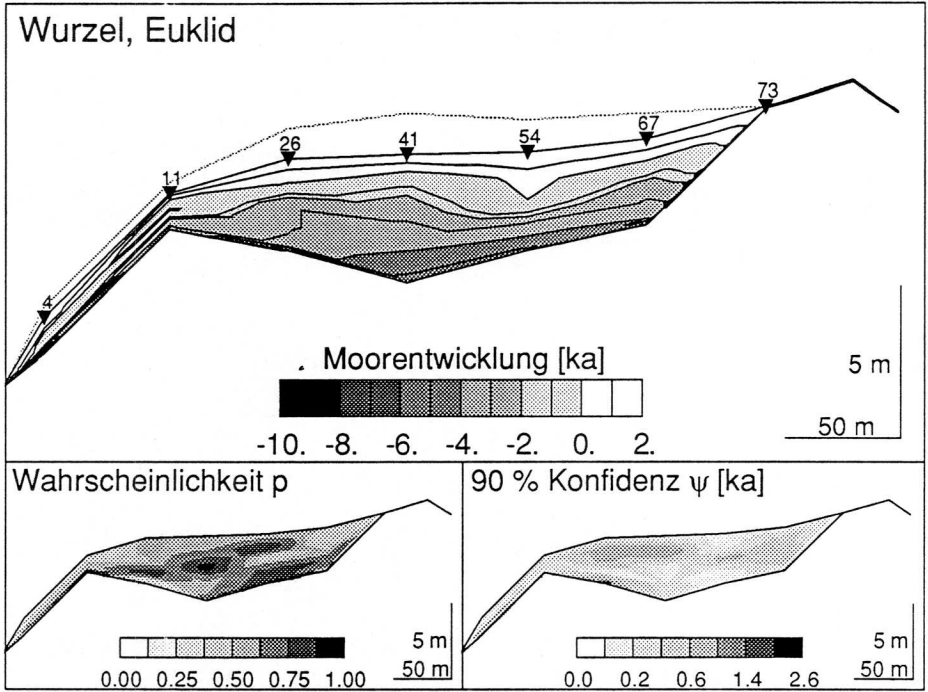


Abb. E.8 Quertranssekt 4-73: Wurzeltransformiert, Euklid

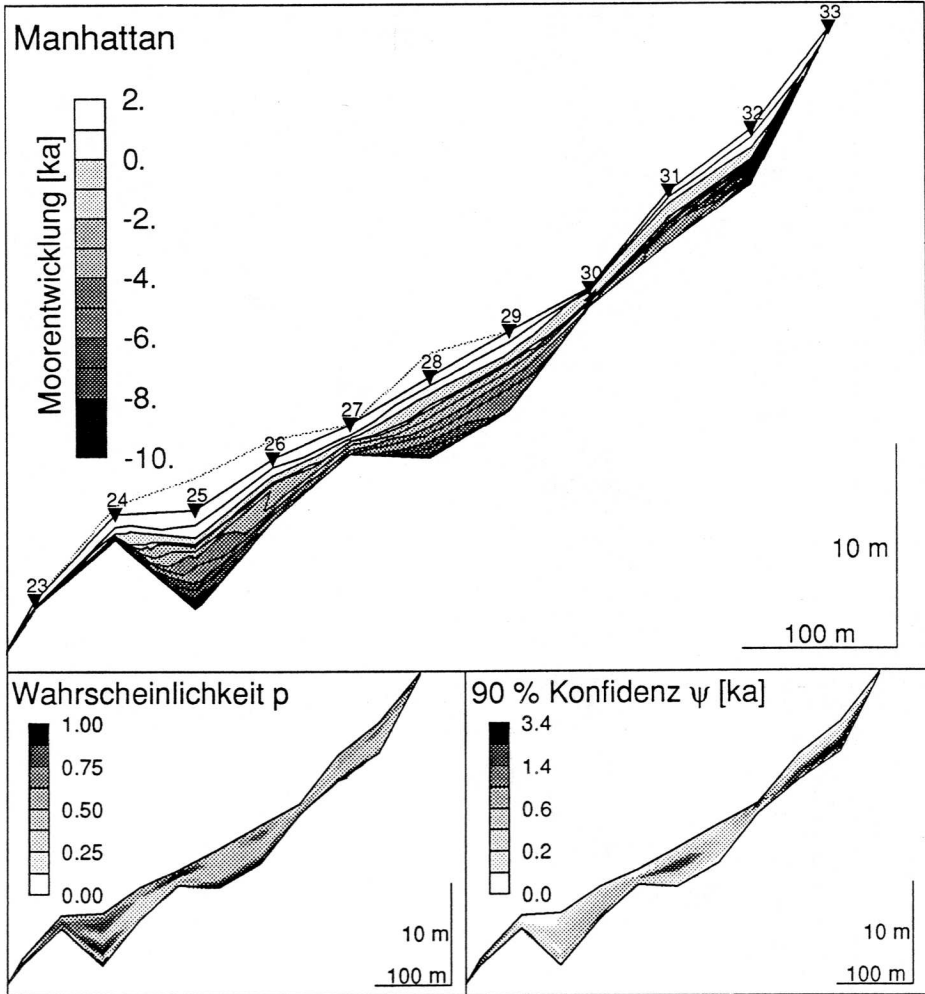


Abb. E.9 Längstranssekt 23–33: Manhattan. Die Dreiecke bezeichnen die Lage der Bohrkerne, die punktierte Linie die Oberfläche des Moores vor der Entwässerung.

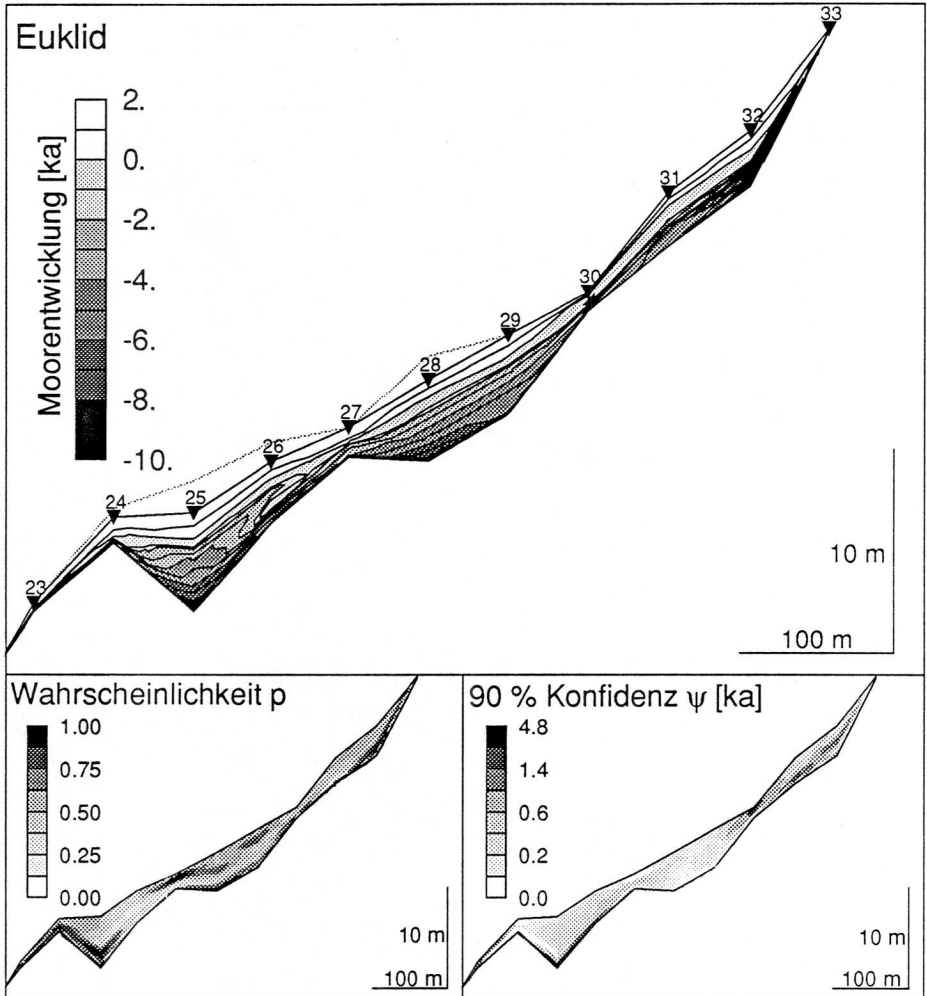


Abb. E.10 Längstranssekt 23–33: Euklid

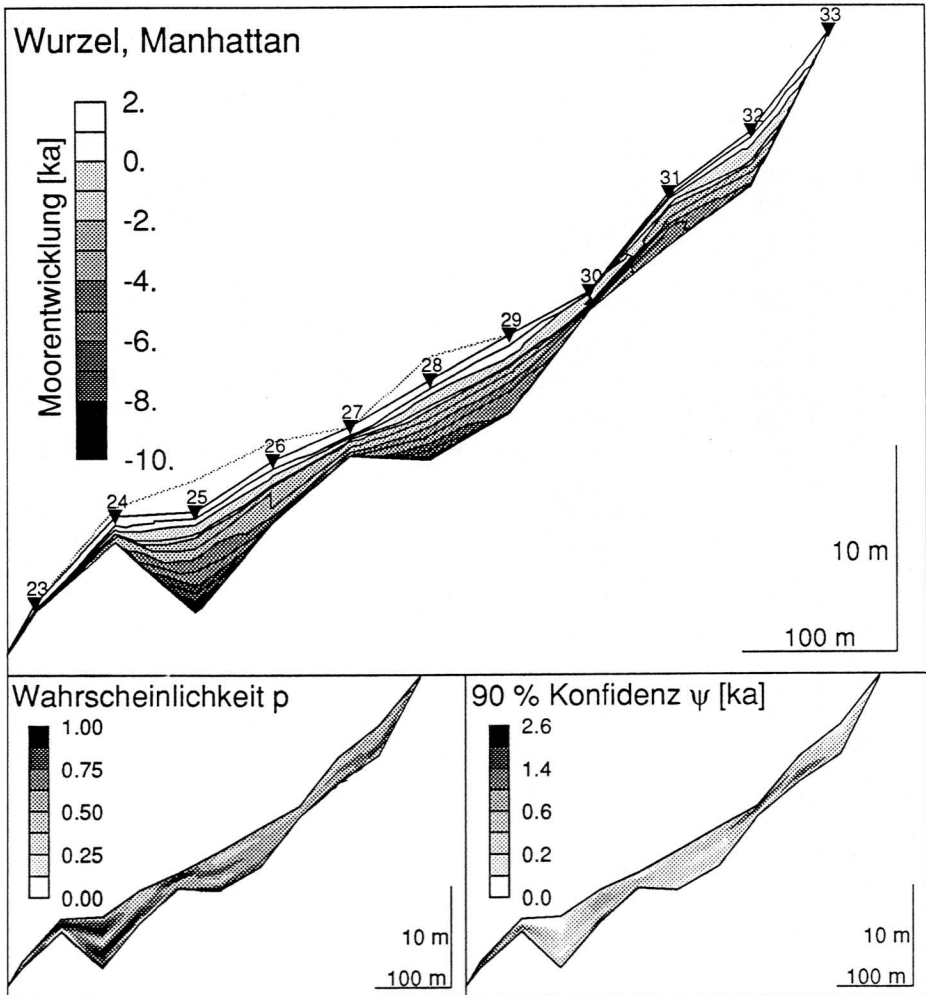


Abb. E.11 Längstranssekt 23–33: Wurzeltransformiert, Manhattan

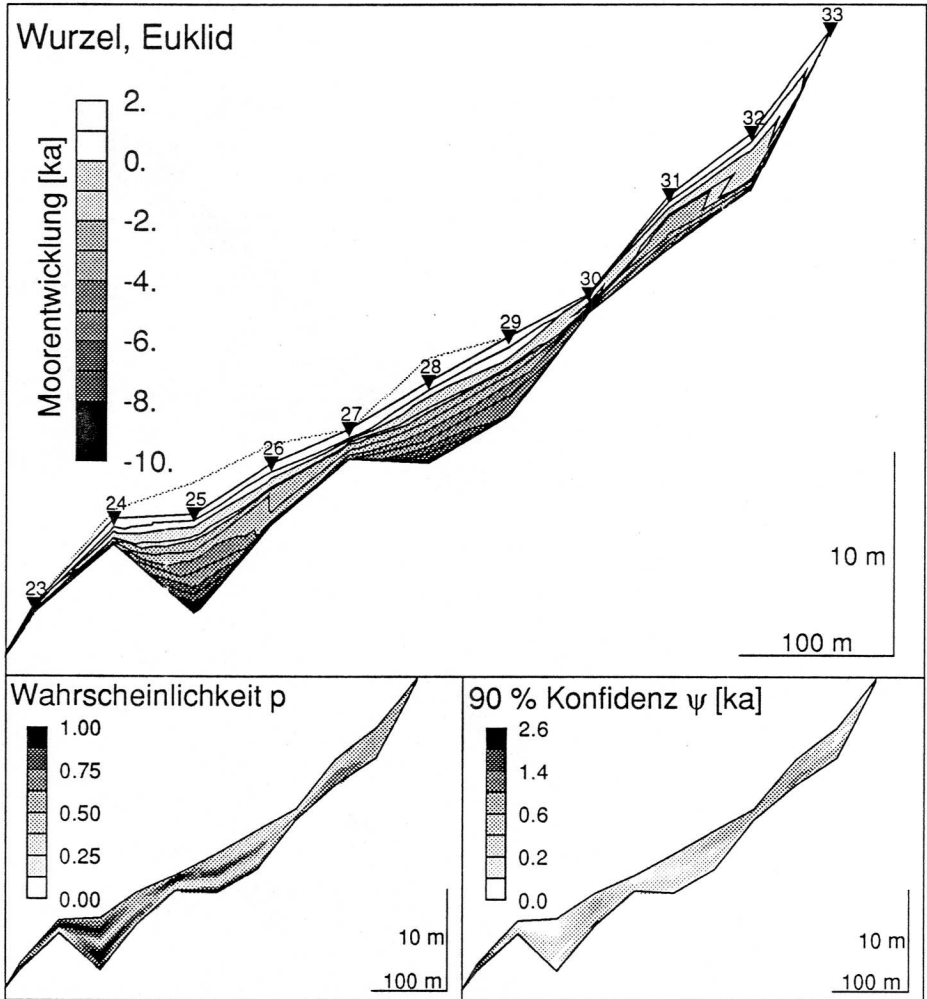


Abb. E.12 Längstranssekt 23–33: Wurzeltransformiert, Euklid

Die Flächen sind aufgrund der optimalen Datierung bestimmt.

Flächenberechnungen

- t_0 Beginn des Zeitintervalls
- t_1 Ende des Zeitintervalls
- A^{T23} vertikale Fläche im Transsekt 23–33
- A_{kum}^{T23} kumulative vertikale Fläche im Transsekt 23–33
- A^{T4} vertikale Fläche im Transsekt 4–73
- A_{kum}^{T4} kumulative vertikale Fläche im Transsekt 4–73
- A^S horizontale Fläche (ganzes Untersuchungsgebiet)
- A_{kum}^S kumulative horizontale Fläche

t_0 [ka]	t_1 [ka]	A^{T23} [m ²]	A_{kum}^{T23} [m ²]	A^{T4} [m ²]	A_{kum}^{T4} [m ²]	A^S [m ²]	A_{kum}^S [m ²]
-10	-9	0.3	0.3	•	•	664	664
-9	-8	30	31	•	•	2341	3005
-8	-7	37	68	•	•	3994	6998
-7	-6	40	108	•	•	5367	12365
-6	-5	123	230	8	8	19150	31515
-5	-4	132	362	99	107	27096	58611
-4	-3	154	516	164	272	15451	74063
-3	-2	158	674	142	413	7986	82049
-2	-1	59	733	42	455	3688	85737
-1	0	183	916	142	597	13558	99296
0	1	174	1090	127	724	1372	100667
1	2	216	1306	155	879	551	101218

Zuwachsraten und Zuwachsverhältnisse

$A^{T^{23}/L}$	über die Ausdehnung des Moores normalisierte vertikale Zuwachsrate, $L^{23} = 540$ m
$A^{T^4/L}$	normalisierte vertikale Zuwachsrate, $L^4 = 330$ m
$A^{T'/L'}$	mittlere normalisierte vertikale Zuwachsrate, $(L^{23} + L^4)/2$
V	volumetrischer Zuwachs
V_{kum}	kumulativer volumetrischer Zuwachs
A_h/A_v	Verhältnis des horizontalen zum vertikalen, gemittelten Flächenzuwachs

$A^{T^{23}/L}$ [m]	$A^{T^4/L}$ [m]	$A^{T'/L'}$ [m]	V [$10^3 \cdot m^3$]	V_{kum} [$10^3 \cdot m^3$]	A_h/A_v [m^2/m^2]
.0006	•	.0006	.0004	.0004	.0005
.06	•	.06	.2	.17	.013
.07	•	.07	.5	.65	.009
.07	•	.07	.9	1.56	.007
.23	.02	.13	4	5.53	.003
.24	.3	.27	15.9	21.47	.004
.28	.5	.39	29	50.45	.01
.29	.43	.36	29.6	80.03	.019
.11	.13	.12	10.2	90.19	.014
.34	.43	.38	38.2	128.39	.012
.32	.38	.35	35.6	163.96	.11
.4	.47	.43	44	207.93	.336

ALTER UND ZUWACHS

Die Ausgangsdaten stammen aus Tabellen und Graphiken der Arbeit von Foster et al. (1988).

Koordinaten, Alter und Langsamkeit

- Probe ¹⁴C-Probe (LU: Proben an der Universität Lund datiert), ?: keine näheren Angaben in Foster et al., – aus Lage am Rand des Moores hergeleitet
- x, y horizontale Koordinaten, willkürlicher Nullpunkt und Orientierung
- Tiefe Torfmächtigkeit an dieser Stelle
- D, ΔD horizontale Distanz von ältestem (LU-2534) oder zweitältestem (LU-2532) datierten Punkt
- konv konventionelles ¹⁴C-Datum, Zeitangabe in Jahre vor heute
- kalib, Δkal kalibriertes ¹⁴C-Datum, Zeitangabe in Jahren BC/AD
- hz L horizontale Langsamkeit
- vt L vertikale Langsamkeit
- fehlender oder nicht berechenbarer Wert

Probe	x [m]	y [m]	Tiefe [cm]	D [m]	Δ D [m]	konv [a]	kalib [ka]	Δkal [ka]	hz L [a/m]	vt L [ka/m]
LU-2526	0	60	27	1350	96	20	1.93	.9	9.38	•
LU-2527	96	60	107	1254	198	920	1.03	1.5	7.58	.86
LU-2528	294	60	217	1056	321	2320	-.47	1.02	3.18	1.12
LU-2529	615	54	302	735	165	3140	-1.49	1.09	6.61	1.14
LU-2545	780	15	312	570	255	4130	-2.58	1.17	4.59	1.45
LU-2530	1035	30	304	315	315	4950	-3.75	1.02	3.24	1.87
LU-2534	1350	0	390	0	•	5820	-4.77	•	•	1.72
LU-2531	1665	6	380	315	315	5190	-4.04	.73	2.32	1.58
LU-2532	2025	30	370	0	•	5240	-4.11	•	•	1.64
?	2370	90	•	310	310	3460	-1.91	2.2	7.1	•
LU-2533	2439	54	175	474	164	2130	-.23	1.68	10.24	1.25
LU-2546	2523	60	117	558	84	1130	.62	.85	10.12	1.14
-	2610	60	0	630	72	0	1.95	1.33	18.47	•
LU-2542	1350	213	317	213	213	4200	-2.95	1.82	8.54	1.55

G-2

LU-2535	1380	405	240	405	192	2390	-.54	2.41	12.55	1.04
LU-2536	1350	525	135	525	120	1450	.5	1.04	8.67	1.07
-	1350	627	0	630	105	0	1.95	1.45	13.81	•

Flächenberechnung

t_0, t_1 Anfangs- beziehungsweise Endzeitpunkt des Intervalls (aus kalibrierten ^{14}C -Daten)

t_0 [ka]	t_1 [ka]	Zuwachsrate [km ² /ka]	Fläche [km ²]
1	2	0.462	2.47
0	1	0.486	2.01
-1	0	0.433	1.52
-2	-1	0.379	1.09
-3	-2	0.329	0.71
-4	-3	0.252	0.38
-5	-4	0.130	0.13

Die für die Berechnungen im Kapitel 5 wesentlichen Programme sind im folgenden mit ihrem Quellcode dokumentiert. Die verwendete Sprache ist FORTRAN-77 mit der Erweiterung do...repeat. Diese Erweiterung ist in Absoft MacFortran implementiert.

H.1. PROGRAMM ZUR BERECHNUNG DES PHASENDIAGRAMMS: FD1DIS

```

program FD1dis
c algorithm and program m. schneebeli
c parts of FTCS-solver from Press et al. (1986)
c calculates relationship var(h(K,S)) (phase diagram) for one-
c dimensional aquifer under Dupuit-Forchheimer assumptions.
c the head is hold fixed at a prescribed level on the no flow boundary,
c therefore the mean K value must be determined using Newton-Raphson. It
c minimizes the difference  $h_0 - h$  with a given recharge f and ratio
c  $K_{max}/K_{min}$  (inverse one dimensional problem).
c data input: see subroutine inffit
c example files: fdini.dat, fdf.dat, fdratio.dat
c output: see program, result output files have unit numbers greater 9.
c example files: fdsshead.dat, fdk.dat, fdkhat.dat, fdishead.dat,
c fdisadev.dat, fdissigma.dat

include FD1dis.INC
integer i,j

c read input from files fdini.dat, fdf.dat, fdratio.dat
call inffit
c calculate avererage of source terms f0 and get an initial value for h0
call avelD
c initialize h0 and k
do (i=1,n)
  h0(i)=ht(i,1)
  k(i)=khat
repeat
c calculate the steady state solution for the homogeneous case
call ssld
c hhat is leftmost node of h0
hhat=h0(1)
c now the determination of the heterogeneous k-values and the MC-FD
c simulation begins
cc open output files
open (10,file='fdsshead.dat',status='new')
write (10,*) problem

```

H-2

```

open (11,file='fdk.dat',status='new')
write (11,*) problem
open (12,file='fdkhat.dat',status='new')
write (12,*) problem
open (13,file='fdishead.dat',status='new')
write (13,*) problem
open (14,file='fdisadev.dat',status='new')
write (14,*) problem
open (15,file='fdissigma.dat',status='new')
write (15,*) problem

cc minimization for every ratio
do (i=1,o)
  write(9,*) '** minimization',i
  call minild(i)
  write(10,*) i, (REAL(h0(j)),j=1,n)
  write(11,*) i, (REAL(k(j)),j=1,n)
  write(12,*) i,khat
  do (j=1,n)
    ht(j,i)=h0(j)
  repeat
  do (j=1,p)
    write (9,*) 'Instationary calculation',(i-1)*p+j
    call putstor (j)
    call solltd
    call statistics (i,j)
  repeat
  repeat
end

-----
c      subroutine inpfit
c inpfit: input for FDldis simulation
c global variables
  include FDldis.INC
c local variables
  double precision eta0,theta
  integer i,j,l
  character fileout*64,text*80

c open input file and test
  open (1,file='fdini.dat',status='old',action='read')
  open (2,file='fddebug.dat',status='new')
c read file
  read (1,'(a)') problem !description of problem
  read (1,'(a)') text    !get number of nodes in space
  read (1,*) n
  if (n>=ns) then
    write (2,*) 'number of nodes in space greater',ns,'!'
    write (2,*) 'redimension number of nodes'
    write (2,*) 'program aborted'
    stop
  endif
  read (1,*) disttit      !get distance between nodes
  read (1,*) dx
  read (1,'(a)') text    !get number of nodes in time
  read (1,*) m
  if (m>=nt) then

```

H-3

```

write (2,*) 'number of nodes in time greater',nt,' !'
write (2,*) 'redimension number of nodes in time'
write (2,*) 'program aborted'
stop
endif
read (1,*) text           !get times of interest
read (1,*) (t(i),i=1,m)
read (1,'(a)') text !get heigth at x=0 and slope
read (1,*) eta0,theta
read (1,'(a)') text !get height of impervious layer
read (1,*) (eta(i),i=1,n)
read (1,'(a)') ictit      !head initial
read (1,*) (ht(i,1),i=1,n)
read (1,'(a)') ktit      !conductivity
read (1,*) khat
close(1)
c calculate eta
do (i=1,n)
    eta(i)=eta0+eta(i)+(i-1)*dx*theta
repeat
c open second input file
open (1,file='fdf.dat',status='old',action='read')
read (1,'(a)') ftit      !source
read (1,*) i
if (i<>n) then
    write (2,*) 'nr of space nodes <> in fdf.dat and fdini.dat'
stop
endif
do (j=1,m)
    read (1,*) l, (f(i,1),i=1,n)
repeat
close (1)
c open third input file
open (1,file='fdratio.dat',status='old',action='read')
read (1,*) !begin read log conductivity ratios
read (1,*) o
read (1,*) (kr(i),i=1,o)
do (i=1,o)
    kr(i)=10.**(kr(i))
repeat
read (1,*) !begin read storativities
read (1,*) p
read (1,*) (srl(i),i=1,p)
read (1,*) (srr(i),i=1,p)
close (1)
c debug is let open!
end
-----
subroutine avelo
c create average of flow vector
INCLUDE FD1dis.INC
integer i, j

do (i=1,n)
    f0(i)=0.
    do (j=1,m)
        f0(i)=f0(i)+f(i, j)

```

```

        repeat
        f0(i)=f0(i)/m
        repeat
        end
c-----
        subroutine ss1d
        INCLUDE FD1dis.INC
c local variables
        double precision k12(ns),etal2(ns),resid,two,anorm,anormf,
        & zero,eps,a,b,e
        integer i,j,jj,idt,ol,ne,maxit
        parameter (zero=0.d0,two=2.0,eps=1.d-3)
        maxit=4*n*n
c steady state is at f0(0), h0(0)
c determine "medium" k12 and etal2
        do (i=1,n-1)
            etal2(i)=(eta(i)+eta(i+1))/two
            k12(i)=(k(i)+k(i+1))/two
            repeat
            anormf=zero
            do (i=2,n-1)
                anormf=anormf+ABS(f0(i))
            repeat
            do (i=1,maxit)
                anorm=0.d0
ccc calculate for left noflow boundary
                j=1
                a=k12(j)*((h0(j)+h0(j+1))/two-etal2(j))
                e=2*a
                resid=2*a*h0(j+1)-e*h0(j)+f0(j)*dx*dx
ccc calculate h new
                anorm=anorm+ABS(resid)
                h0(j)=h0(j)+1.80*resid/e
ccc calculate
                do (j=2,n-1)
                    a=k12(j)*((h0(j)+h0(j+1))/two-etal2(j))
                    b=k12(j-1)*((h0(j-1)+h0(j))/two-etal2(j-1))
                    e=a+b
                    resid=a*h0(j+1)+b*h0(j-1)-e*h0(j)+f0(j)*dx*dx
ccc calculate h new
                    anorm=anorm+ABS(resid)
                    h0(j)=h0(j)+1.80*resid/e
                    repeat
ccc calculate for rightmost noflow boundary
c                j=n
c                b=k12(j-1)*((h0(j-1)+h0(j))/two-etal2(j-1))
c                e=2*b
c                resid=2*b*h0(j-1)-e*h0(j)+f0(j)*dx*dx
ccc calculate h new
c                anorm=anorm+ABS(resid)
c                h0(j)=h0(j)+1.80*resid/e
                if ((i>1).and.(anorm.<eps*anormf)) return
            repeat
            write(2,*) 'max. number of iterations in SS1D exceeded'
            end
c-----
c minimize difference hhat-h(f(k)) using Newton-Raphson (see Press,

```

c chap. 9.4)

c

```

subroutine minild(ir)
include FD1dis.INC
integer i,j,ir,jmax
double precision khat1,h1,h2,dk,dh,df,xacc,delta
parameter (jmax=20)

```

```

xacc=1.e-2
do (j=1,jmax)
  call kprop(ir)
  call ssld
  h1=h0(1)
  khat1=khat
  dk=khat/100.
  khat=khat+dk
  call kprop(ir)
  call ssld
  df=((hhat-h0(1))-(hhat-h1))/dk
  delta=(hhat-h1)/df
  khat=khat1-delta
  if (ABS(hhat-h1).LT.xacc) return
repeat
write(2,*) 'MINILD: max. iterations exceeded'
end

```

c-----
c calculates for given length of domain, ratio (K_{left}/K_{right}), average
c khat inverse proportionally distributed $k(n)$ s

```

subroutine kprop (j)
include FD1dis.INC
integer i,j,node
real alpha(ns),len,rat,kn,sum
c creates proportionally distributed k-values
sum=0.
len=(n-1)*dx
rat=kr(j)
do (i=1,n)
  alpha(i)=(rat+(1-rat)/(n-1)*(i-1))
  sum=sum+len/(alpha(i)*n)
repeat
kn=khat*sum/len
do (i=1,n)
  k(i)=alpha(i)*kn
repeat
end

```

c-----
c put linearly interpolated values for storativity s in array

```

INCLUDE FD1dis.INC
integer i,j,is
double precision ds

ds=(srr(is)-srl(is))/(n-1)
do (i=1,n)
  s(i)=srl(is)+(i-1)*ds
repeat
end

```

```

c-----
      subroutine solldt
c solldt: solver for the FTCS-scheme for one dimensional, unconfined,
c instationary saturated flow on a varying slope
c global variables
      include FDldis.INC
c local variables
      double precision k12(ns),etal2(ns),D,dxx,two,dx1,dxr
      integer i,j,ii,jj,idt,ol,ne
      parameter (two=2.0)
c determine "medium" k12 and etal2
      do (i=1,n-1)
          etal2(i)=(eta(i)+eta(i+1))/two
          k12(i)=(k(i)+k(i+1))/two
      repeat
c loop over times of interest
      do (i=1,m-1)
cx      write (9,*) 'timestep',i
cc get an approximative D and set h(j,1) to ht(j,i)
      D=0.0
      do (j=1,n)
          D=MAX((ht(j,i)-eta(j))*k(j)/s(j),D)
          h(j,1)=ht(j,i)
          h(j,2)=ht(j,i)
      repeat
      if (D>1.e30)then
          write(2,*) 'D>1.e30 AT TIME',t(i); stop
      endif
cc determine timestep dt
      dt=dx*dx/two/D
      dt=dt*0.8 !get security
      idt=DINT((t(i+1)-t(i))/dt)+1
      dt=(t(i+1)-t(i))/idt
cc begin loop over one time of interest
      do (ii=1,idt)
ccc change index depending on ii even or uneven
          ol=1;ne=2
          if (MOD(ii,2)=0) then
              ol=2; ne=1
          endif
ccc calculate dxx for left noflow boundary
          dxx=k12(1)
          &          *((h(1,ol)+h(2,ol))/two-etal2(1))
          &          *(two*h(2,ol)-two*h(1,ol))/dx/dx
cx      write (2,*) '!',i,h(1,ne),h(1,ol),dt,s(1),f(1,i)
          h(1,ne)=h(1,ol)+dt/s(1)*dxx+dt/s(1)*f(1,i)
ccc calculate dxx
          do (j=2,n-1)
              dxx=((k12(j)*((h(j,ol)+h(j+1,ol))/two-etal2(j))
          &          *(h(j+1,ol)-h(j,ol))/dx)
          &          -(k12(j-1)*((h(j-1,ol)+h(j,ol))/two-etal2(j-1))
          &          *(h(j,ol)-h(j-1,ol))/dx))/dx
ccc calculate h new
cx      write (2,*) '!!!',ii,i,j,h(j,ne),h(j,ol),dt,s(j),f(j,i)
          h(j,ne)=h(j,ol)+dt/s(j)*dxx+dt/s(j)*f(j,i)
      repeat
      repeat

```

```

ccc write result on ht
      h(n,ne)::n(n,ol)
      do (j=1,n)
        ht(j,:+1)=h(j,ne)
      repeat
    repeat
  end

-----
c
c calculate average, absolute deviation, and standard deviation from
resulting array ht
      subroutine statistics (ik,is)
c global variables
      include FD1dis.INC
      integer ik,is
c local variables
      integer i,j
      double precision have(ns), hadev(ns), hsig(ns), ss,pp
      do (i=1,n)
        ss=0.
        do (j=1,m)
          ss=ss+ht(i,j)
        repeat
        have(i)=ss/m
        hadev(i)=0.
        hsig(i)=0.
        do (j=1,m)
          ss=ht(i,j)-have(i)
          hadev(i)=hadev(i)+ABS(ss)
          pp=ss*ss
          hsig(i)=hsig(i)+pp
        repeat
        hadev(i)=hadev(i)/m
        hsig(i)=SQRT(hsig(i)/(m-1))
      repeat
      write (13,*) ik,is,(REAL(have(i)),i=1,n)
      write (14,*) ik,is,(REAL(hadev(i)),i=1,n)
      write (15,*) ik,is,(REAL(hsig(i)),i=1,n)
    end

```

Das File "FD1dis.INC" muss während der Kompilation miteingeschlossen werden. Hier sind alle globalen Variablen definiert, welche über einen Common-Block übergeben werden.

```

IMPLICIT NONE
INTEGER ns,nt,nr,n,m,o,p
PARAMETER (ns=30, nt=150,nr=15)
DOUBLE PRECISION f(ns,nt),ht(ns,nt),t(nt),h(ns,2),f0(ns),h0(ns),
& eta(ns),x(ns),k(ns),s(ns),kr(nr),srl(nr),srr(nr),dx,dt,
& hhat,khat
CHARACTER problem*128,filename*64,disttit*80,ictit*80,ktit*80,
& stit*80,ftit*80
COMMON /fit1/ f(ns,nt),ht(ns,nt),t(nt),h(ns,2),f0(ns),h0(ns),
& eta(ns),x(ns),k(ns),s(ns),kr(nr),srl(nr),srr(nr),
& dx,dt,hhat,khat,
& problem,filename,disttit,ictit,ktit,stit,ftit,
& n,m,o,p

```

Verwendetes Inputfile "fdini.dat"

```

phase diagram input data
number of nodes in space
21
distance between nodes [m]
10.
number of timesteps of interest (including initial)
120
times [d]
0. 30. 60. 90. 120. 150. 180. 210. 240. 270. 300. 330. 360. 390. 420.
450. 480. 510. 540. 570. 600. 630. 660. 690. 720. 750. 780. 810. 840.
870. 900. 930. 960. 990. 1020. 1050. 1080. 1110. 1140. 1170. 1200. 1230.
1260. 1290. 1320. 1350. 1380. 1410. 1440. 1470. 1500. 1530. 1560. 1590.
1620. 1650. 1680. 1710. 1740. 1770. 1800. 1830. 1860. 1890. 1920. 1950.
1980. 2010. 2040. 2070. 2100. 2130. 2160. 2190. 2220. 2250. 2280. 2310.
2340. 2370. 2400. 2430. 2460. 2490. 2520. 2550. 2580. 2610. 2640. 2670.
2700. 2730. 2760. 2790. 2820. 2850. 2880. 2910. 2940. 2970. 3000. 3030.
3060. 3090. 3120. 3150. 3180. 3210. 3240. 3270. 3300. 3330. 3360. 3390.
3420. 3450. 3480. 3510. 3540. 3570.
eta at x=0 and slope (tan alpha) (added to height of impervious layer)
0.0 0.0
height of impervious layer
21*0.
initial head at t=0 [m]
2.81603 2.81261 2.80236 2.78517 2.76094 2.72947 2.69050 2.64371
2.58867 2.52484 2.45153 2.36787 2.27271 2.16453 2.04127 1.90000
1.73632 1.54311 1.30736 .999400 .500000
mean conductivity (space) [m/d]
10.

```

Das Inputfile "fdf.dat" enthält die variierende Nachlieferung für jeden räumlichen und zeitlichen Knoten.

```

precip-pETPrainfall, tab.25, Schmeidl et. al. 1970
21
1 21*1.260000E-03
2 21*3.326667E-03
3 21*2.356667E-03
4 21*1.733333E-04
5 21*9.000002E-05
6 21*2.640000E-03
7 21*2.276667E-03
8 21*5.733333E-03
9 21*6.200002E-04
10 21*1.623333E-03
11 21*-2.510000E-03
12 21*-8.333333E-04
13 21*7.966667E-04
14 21*2.526667E-03
15 21*3.203333E-03
16 21*2.553333E-03
17 21*2.656667E-03
18 21*8.100000E-04
19 21*1.986667E-03
20 21*4.456666E-03

```


21 21*1.650000E-03
22 21*4.096667E-03
23 21*1.120000E-03
24 21*1.596667E-03
25 21*1.890000E-03
26 21*9.900000E-04
27 21*2.100000E-04
28 21*1.550000E-03
29 21*2.363333E-03
30 21*1.213333E-03
31 21*7.530000E-03
32 21*-4.299998E-04
33 21*1.193333E-03
34 21*4.183333E-03
35 21*-1.773333E-03
36 21*-4.933333E-04
37 21*8.166666E-04
38 21*4.423333E-03
39 21*2.526667E-03
40 21*2.100000E-03
41 21*1.350000E-03
42 21*1.566666E-04
43 21*6.120001E-03
44 21*3.966667E-04
45 21*1.790000E-03
46 21*-1.863333E-03
47 21*1.270000E-03
48 21*-5.733334E-04
49 21*1.193333E-03
50 21*3.876667E-03
51 21*6.633333E-04
52 21*4.066667E-04
53 21*2.040000E-03
54 21*6.066668E-04
55 21*9.966667E-04
56 21*3.170000E-03
57 21*1.170000E-03
58 21*2.806667E-03
59 21*2.303333E-03
60 21*5.033334E-04
61 21*1.783333E-03
62 21*6.100000E-04
63 21*7.600000E-04
64 21*1.070000E-03
65 21*1.760000E-03
66 21*2.116667E-03
67 21*4.453334E-03
68 21*1.773333E-03
69 21*-1.400000E-03
70 21*2.503333E-03
71 21*-1.266665E-04
72 21*6.596666E-03
73 21*3.946667E-03
74 21*1.183333E-03
75 21*1.923333E-03
76 21*1.943333E-03
77 21*2.520000E-03

```

78 21*5.320000E-03
79 21*9.696668E-03
80 21*5.680000E-03
81 21*2.133333E-03
82 21*-6.766668E-04
83 21*1.953333E-03
84 21*-1.320000E-03
85 21*1.876667E-03
86 21*4.323333E-03
87 21*1.243333E-03
88 21*2.090000E-03
89 21*2.566667E-03
90 21*1.996667E-03
91 21*4.593333E-03
92 21*3.203334E-03
93 21*5.116667E-03
94 21*5.210000E-03
95 21*4.866666E-04
96 21*2.796667E-03
97 21*1.396667E-03
98 21*3.816667E-03
99 21*2.270000E-03
100 21*4.433333E-04
101 21*2.883333E-03
102 21*2.686667E-03
103 21*1.503334E-03
104 21*2.520000E-03
105 21*2.076667E-03
106 21*9.266665E-04
107 21*3.966667E-04
108 21*-1.833335E-04
109 21*6.733334E-04
110 21*2.110000E-03
111 21*2.920000E-03
112 21*1.233333E-03
113 21*-8.333333E-05
114 21*1.999995E-05
115 21*1.653333E-03
116 21*1.163333E-03
117 21*2.126667E-03
118 21*2.503334E-03
119 21*8.933335E-04
120 21*1.630000E-03

```

Das Inputfile "fdratio.dat" enthält die Leitfähigkeiten- und Speicherkoeffizientenverhältnisse.

```

k-ratios (log10)
9      !number of ratios
-2. -1.5 -1. -0 5 0. 0.5 1. 1.5 2. !left boundary/right boundary
s- effective
7      !number of ratios
.1 .2 .3 .4 .5 6 .7 !left boundary
.7 .6 .5 .4 .3 2 .1 !right boundary

```

H.2. PROGRAMM ZUR BERECHNUNG DER INSTATIONÄREN VERÄNDERUNG DER LEITFÄHIGKEIT: BOGFLO.FOR

```

program bogflo
c algorithm and program m. schneebeli
c SOR solver is partially from press et al. 1986
c calculates influence of compacting peat on head
c solution is based on a grid with 66x66 nodes, distance 3.125 m
c initial heads may be given in file bogflo.in
c boundary condition is constant head h = 0.5 m
c depth of drainage ditches is 1 m, may be changed in subroutine
c 'calcdrain'
c output is written to bogflo.h, bogflo.dh, bogflo.k and bogflo.sim.out
  include FLO2D.inc !from general purpose 2D-FD program
  integer tst
  parameter (tst=27)
  real ghe(nq,nq),ghe0(nq,nq),gco(nq,nq),gdh(nq,nq),t(tst),
    & tk(tst),k0
  integer i,j,k,l

c t are the timesteps, tk the factors of e^(tk z), where z=z(t)-z(0)
c water
c first set with tst=14
c   data t /0.,.5,1.,1.5,2., 2.5,3., 4.,5., 6., 7., 8., 9., 10./
c   data tk /0.,.5,1.,1.9,2.8,3.15,3.5,3.8,4.,4.1,4.25,4.35,4.45,4.5/
c second set with tst=27
c   data t /0.,.25,.5,.75,1.,1.25,1.5,1.75,2.,2.25,2.5,2.75,3.,3.5,
c   & 4.,4.5,5.,5.5,6.,6.5,7.,7.5,8.,8.5,9.,9.5,10./
c   data tk /0.,.25,.5,.75,1.,1.45,1.9,2.35,2.8,2.98,3.15,3.33,3.5,
c   & 3.65,3.8,3.9,4.,4.05,4.1,4.18,4.25,4.3,4.35,4.4,4.45,4.48,4.5/
  l=tst
  k0=10.      !initial overall hydraulic conductivity [m/d]
  r0=1.92e-3 !overall steady state recharge [m/d]
  call time (it0)
c open general output files
  open (20,file='bogflo.he',status='new')
  open (21,file='bogflo.dh',status='new')
  open (22,file='bogflo.co',status='new')
c open simulation log file
  open (30,file='bogflo.sim',status='new')
  write (30,*) 'region simnr omega iter solv inflo ',
    & 'outflo difflo percflo'
c get initial solution over entire domain
cc prepare input
  call prepglob(k0)
cc solve
  call init
  call solver
  call exit
  call simout('global',0)
cc put h(-∞) and K(-∞) to file and delete fictitious nodes
  call putglob (ghe,ghe0,gco)

```

```

cc change ghe to drained initial conditions
   call calcdrain (ghe)
c drained solutions
   do (k=1,tst)
       write (9,*) 'timestep',k
       type (9,*) 'region:'
cc get new K-values for next step
       call calccon (k,ghe,ghe0,gco,gdh,tk,k0)
cc calculate solutions for subregions
       do (i=1,4)
           type (9,*) i
ccc data
       call prepsubreg (i,ghe,gco)
ccc solve
       call init
       call solver
       call exit
       call simout('subregion'//CHAR(48+i),k)
ccc output to global matrix
       call putsubreg (i,ghe)
       repeat
cc output to files
       call putfile (k,ghe,gdh,gco,t)
       write (9,*)
       repeat
       call time (it)
       write (30,*) 'simulation time',it-it0,' s'
c end of time-loop
end

```

```

-----
subroutine prepglob(k0,r0)
include FJ.O2D.INC
integer i, j
logical inexist
real k0,r0,x,y,f2d
nx=66; ny=66
dxy=3.125
conf=.false.
ccc boundary condition
do (i=1,nx)
  bc(i,1)=1
  repeat
do (j=2,ny-2)
  bc(1,j)=9; bc(2,j)=0
  do (i=3,nx-1)
    bc(i,j)=2
    repeat
  bc(nx,j)=1
  repeat
bc(1,ny-1)=9
do (i=2,nx-1)
  bc(i,ny-1)=0
  repeat
bc(nx,ny-1)=1
do (i=1,nx)
  bc(i,ny)=9
  repeat

```

```

ccc initial heads
  do (i=1,nx)
    do (j=1,ny)
      vin(i,j)=0.5
    repeat
  repeat
ccc calculate analytical solution with k0 or get file
  inquire (file='bogflo.in',exist=inpexist)
  if (inpexist) then
    open (1,file='bogflo.in',status='old')
    read (1,*)
    do (j=1,65)
      read (1,*) (vin(i,j),i=2,66)
    repeat
  else
    do (i=2,nx-1)
      x=(i-2)*dxy
      do (j=2,ny-1)
        y=(ny-1-j)*dxy
        vin(i,j)=f2d(0.5,x,y,nx*dxy,nx*dxy,1.92e-3,k0)
      repeat
    repeat
  endif
  do (j=2,ny)
    vin(1,j)=vin(3,j)
  repeat
  do (i=2,nx)
    vin(i,ny)=vin(i,ny-2)
  repeat
  write (9,*) 'max z=',vin(2,ny-1)
ccc recharge
  do (i=1,nx)
    do (j=1,ny)
      r(i,j)=r0      !set in program
    repeat
  repeat
ccc conductivity
  do (i=1,nx)
    do (j=1,ny)
      c(i,j)=k0
    repeat
  repeat
end

-----
subroutine putglob (ghe,ghe0,gco)
include FLO2D.INC
integer i,j,k,l
real ghe(nq,nq),ghe0(nq,nq),gco(nq,nq)
c head
write (20,*) 'Wasserspiegel [m] t = [-1,0['
do (j=1,ny-1)
  write (20,*) (REAL(v(i,j)),i=2,nx)
repeat
c delete fictitious nodes
l=0
do (j=1,ny-1)
  l=l+1; k=0

```

```

do (i=2, nx)
  k=k+1
  ghe(k, 1)=v(i, j)
  ghe0(k, 1)=v(i, j)
  gco(k, 1)=c(i, j)
  repeat
repeat
end
c-----
subroutine calcdrain (ghe)
include FLO2D.INC
integer i, j
real ghe(nq, nq), ghe0(nq, nq), gdh(nq, nq)
c introduce new initial conditions
cc middle of region in x-direction
do (i=1, 65)
  if (ghe(i, 33)>=1.5) then
    ghe(i, 33)=ghe(i, 33)-1.
  else
    ghe(i, 33)=0.5
  endif
  repeat
cc top of region in x-direction
do (i=33, 65)
  if (ghe(i, 65)>=1.5) then
    ghe(i, 65)=ghe(i, 65)-1.
  else
    ghe(i, 65)=0.5
  endif
  repeat
cc middle of region in y-direction
do (j=1, 64)
  if (j<>33) then
    if (ghe(33, j)>=1.5) then
      ghe(33, j)=ghe(33, j)-1.
    else
      ghe(33, j)=0.5
    endif
  endif
  repeat
end
c-----
subroutine prepsubreg (k, ghe, gco)
include FLO2D.INC
integer i, j, k
real ghe(nq, nq), gco(nq, nq)
c top left region
if (k=1) then      !top left
  nx=34; ny=34
cc boundary conditions
bc(1, 1)=9; bc(2, 1)=0
do (i=3, 34)
  bc(i, 1)=1
  repeat
do (j=2, 32)
  bc(1, j)=9; bc(2, j)=0
do (i=3, 33)

```



```

        repeat
      repeat
cc initial heads
      do (i=33,65)
        do (j=33,65)
          vin(i-32,j-32)=ghe(i,j)
        repeat
      repeat
c bottom right region
      elseif (k=3) then
        nx=33; ny=33
cc boundary conditions
      do (i=1,nx)
        bc(i,1)=1
      repeat
      do (j=2,ny-1)
        bc(1,j)=1
        do (i=2,nx-1)
          bc(i,j)=2
        repeat
        bc(nx,j)=1
      repeat
      do (i=1,nx)
        bc(i,ny)=1
      repeat
cc conductivities
      do (i=33,65)
        do (j=1,33)
          c(i-32,j)=gco(i,j)
        repeat
      repeat
cc initial heads
      do (i=33,65)
        do (j=1,33)
          vin(i-32,j)=ghe(i,j)
        repeat
      repeat
c bottom left region
      elseif (k=4) then
        nx=34; ny=33
cc boundary conditions
      bc(1,1)=9;bc(2,1)=0
      do (i=3,34)
        bc(i,1)=1
      repeat
      do (j=2,32)
        bc(1,j)=9;bc(2,j)=0
        do (i=3,33)
          bc(i,j)=2
        repeat
        bc(34,j)=1
      repeat
      bc(1,33)=9
      do (i=2,34)
        bc(i,33)=1
      repeat
cc conductivities

```



```

do (i=1,33)
  do (j=1,33)
    c(i+1,j)=gco(i,j)
  repeat
repeat
do (j=1,33)
  c(1,j)=gco(2,j)
repeat
cc initial heads
do (i=1,33)
  do (j=1,33)
    vin(i+1,j)=ghe(i,j)
  repeat
repeat
do (j=1,33)
  vin(1,j)=ghe(2,j)
repeat
else
  pause 'invalid k in prepsubreg'
  stop
endif
end

```

```

subroutine putsubreg (k,ghe)
include FLO2D.INC
integer i,j,k
real ghe(nq,nq)

if (k=1) then
  do (i=2,nx-1)
    do (j=2,ny-1)
      ghe(i-1,j+32)=v(i,j)
    repeat
  repeat
elseif (k=2) then
  do (i=2,nx-1)
    do (j=2,ny-1)
      ghe(i+32,j+32)=v(i,j)
    repeat
  repeat
elseif (k=3) then
  do (i=2,nx-1)
    do (j=2,ny-1)
      ghe(i+32,j)=v(i,j)
    repeat
  repeat
elseif (k=4) then
  do (i=2,nx-1)
    do (j=2,ny-1)
      ghe(i-1,j)=v(i,j)
    repeat
  repeat
endif
end

```

```

subroutine calccon (k,ghe,ghe0,gco,gdh,tk,k0)
include FLO2D.INC

```

```

integer i,j,k
real ghe(nq,nq),ghe0(nq,nq),gco(nq,nq),gdh(nq,nq),tk(*),k0

c calculate matrix gdh
do (i=1,65)
  do (j=1,65)
    gdh(i,j)=ghe(i,j)-ghe0(i,j)
  repeat
repeat
c calculate new matrix gco
do (i=1,65)
  do (j=1,65)
    gco(i,j)=k0*exp(tk(k)*gdh(i,j))
  repeat
repeat
end

c-----
subroutine putfile (k,ghe,gdh,gco,t)
include FLO2D.INC
integer i,j,k
real ghe(nq,nq),gco(nq,nq),gdh(nq,nq),t(*)

write (20, '(a,f5.1)') 'Wasserspiegel [m], t =',t(k)
call rf(20,ghe,nq,65,65)
write (21, '(a,f5.1)') 'Wasserspiegeländerung [m], t =',t(k)
call rf(21,gdh,nq,65,65)
write (22, '(a,f5.1)') 'Durchlässigkeit [m/d], t =',t(k)
call rf(22,gco,nq,65,65)
end

c-----
c initialisation
c-----
subroutine init
include FLO2D.INC
c locals
integer i,j,nxx,nyy
real buf
c initialize v and change v to v*v for unconfined case
do (j=1,ny)
  do (i=1,nx)
    buf=vin(i,j)
    if (.not.conf) then
      buf=buf*buf
      vin(i,j)=buf
    endif
    v(i,j)=buf
  repeat
repeat
c multiply recharge r by dxy*dxy, r is the source term vector
do (i=1,nx)
  do (j=1,ny)
    if (bc(i,j)=2.OR.bc(i,j)=1.OR.bc(i,j)=0) then !interior
recharge
      r(i,j)=r(i,j)*dxy*dxy
    elseif (bc(i,j)=1.OR.bc(i,j)=9) then !fixed head bc
      r(i,j)=0.

```

H-19

```

        elseif (bc(i,j)=8) then      !fixed flow bc
            r(i,j)=r(i,j)*dxy
        endif
        repeat
        repeat
c multiply conductivity by initial heads if problem confined
(transmissivity)
        if (conf) then
            do (j=1,ny)
                do (i=1,nx)
                    c(i,j)=vin(i,j)*c(i,j)
                repeat
            repeat
c divide conductivity by 2 if problem unconfined
        else
            do (j=1,ny)
                do (i=1,nx)
                    c(i,j)=c(i,j)/2.
                repeat
            repeat
        endif
c calculate alpha, beta, gamma, delta (heterogeneous case)
cc set coefficients to zero
        do (j=1,ny)
            do (i=1,nx)
                a(i,j)=0.; b(i,j)=0.; g(i,j)=0.; d(i,j)=0.; e(i,j)=0.
            repeat
        repeat
c we never need factors a... e on boundary points
        nxx=nx-1; nyy=ny-1
        do (j=2,nyy)
            do (i=2,nxx)
c          a(i,j)=(c(i+1,j)+c(i,j))/2.      !arithmetic mean
c          b(i,j)=(c(i-1,j)+c(i,j))/2.
c          g(i,j)=(c(i,j+1)+c(i,j))/2.
c          d(i,j)=(c(i,j-1)+c(i,j))/2.
          a(i,j)=SQRT(c(i+1,j)*c(i,j))      !geometric mean
          b(i,j)=SQRT(c(i-1,j)*c(i,j))
          g(i,j)=SQRT(c(i,j+1)*c(i,j))
          d(i,j)=SQRT(c(i,j-1)*c(i,j))
          e(i,j)=-a(i,j)-b(i,j)-g(i,j)-d(i,j)
            repeat
        repeat
c include boundary conditions in coefficients a to e
        call flowbc
        end

c-----
c flowbc updates coefficients with flow boundary information
c-----

        subroutine flowbc
        include FLO2D.INC
c locals
        integer i,j
c set flow boundaries
cc bottom side no flow or prescribed flow
        if (bc(3,1)=9) then
            do (i=2,nx-1)

```

```

        d(i,2)=0.
        g(i,2)=2.*g(i,2)
        repeat
    elseif (bc(3,1)=8) then
        do (i=2,nx-1)
            d(i,2)=0.
            g(i,2)=2.
            e(i,2)=e(i,2)+2.*dxy*r(i,1)/((c(i,2)+c(i,3)/2.))
            repeat
        endif
cc left side no flow or prescribed flow
    if (bc(1,3)=9) then
        do (j=2,ny-1)
            b(2,j)=0.
            a(2,j)=2.*a(2,j)
            repeat
        elseif (bc(1,3)=8) then
            do (j=2,ny-1)
                b(2,j)=0.
                a(2,j)=2.
                e(2,j)=e(2,j)+2.*dxy*r(1,j)/((c(2,j)+c(3,j)/2.))
                repeat
            endif
cc top side no flow or prescribed flow
    if (bc(3,ny)=9) then
        do (i=2,nx-1)
            g(i,ny-1)=0.
            d(i,ny-1)=2.*d(i,ny-1)
            repeat
        elseif (bc(3,1)=8) then
            do (i=2,nx-1)
                g(i,ny-1)=0.
                d(i,ny-1)=2.
                e(i,ny-1)=e(i,ny-1)+2.*dxy*r(i,ny)/((c(i,ny-1)+c(i,ny-2)/2.))
                repeat
            endif
cc right side no flow or prescribed flow
    if (bc(nx,3)=9) then
        do (j=2,ny-1)
            a(nx-1,j)=0.
            b(nx-1,j)=2.*b(nx-1,j)
            repeat
        elseif (bc(nx,3)=8) then
            do (j=2,ny-1)
                a(nx-1,j)=0.
                b(nx-1,j)=2.
                e(nx-1,j)=e(nx-1,j)+2.*dxy*r(nx,j)/((c(nx-1,j)+c(nx-2,j)/2.))
                repeat
            endif
    endif
end

```

```

c-----
c solver is essentially the SOR-algorithm from press et al. 1986, p659,
c with Chebyshev-acceleration
c recharge term r is positive, because additional water into the
c aquifer is by convention positive, but for mass conservation negative
c-----

```

```

subroutine solver
include FLO2D.inc
real*8 anormr, resid, zero, half, qtr, one, rjac, pi
integer n, j, l

eps=1.d-5
zero=0.d0
half=.5d0
qtr=.25d0
one=1.d0
maxit=3*nx*ny
c calculate optimal rjac
pi=3.1415926
rjac=0.5*(COS(pi/nx)+COS(pi/ny))
c set initial anormr
anormr=zero
do 12 j=2, nx-1
  do 11 l=2, ny-1
    anormr=anormr+abs(r(j,l))
11  continue
12  continue
omega=one
do 15 n=1, maxit
  anormr=zero
  do 14 j=2, nx-1
    do 13 l=2, ny-1
      if(mod(j+1,2).eq.mod(n,2))then
        resid=a(j,l)*v(j+1,l)+b(j,l)*v(j-1,l)+
&          g(j,l)*v(j,l+1)+d(j,l)*v(j,l-1)+
&          e(j,l)*v(j,l)+r(j,l)
        anormr=anormr+abs(resid)
        v(j,l)=v(j,l)-omega*resid/e(j,l)
      endif
13    continue
14    continue
      if(n.eq 1) then
        omega=one/(one-half*rjac**2)
      else
        omega=one/(one-qtr*rjac**2*omega)
      endif
      if((n.gt.1).and.(anormr.lt.eps*anormr)) then
        iter=n
        eps=eps*anormr
        return
      endif
15    continue
  iter=n
  eps=eps*anormr
end

c-----
c exit undos transformations of v, r, c depending on problem,
c calculates mass balance and flows through fixed head boundaries
c-----
subroutine exit
include FLO2D.INC
c locals

```

```

integer i,j,jj,k,kk,l,ll,hi,lo
c divide conductivity by initial heads if problem confined
if (conf) then
  do (j=1,ny)
    do (i=1,nx)
      c(i,j)=c(i,j)/vin(i,j)
    repeat
  repeat
c change v*v to v (identical h) and
c multiply conductivity by 2 if problem unconfined
else
  do (j=1,ny)
    do (i=1,nx)
      if(v(i,j)<0) then
        v(i,j)=-2.**127.*1.999999 !smallest negative number
      else
        v(i,j)=SQRT(v(i,j))
        vin(i,j)=SQRT(vin(i,j))
        c(i,j)=c(i,j)*2.
      endif
    repeat
  repeat
endif
c calculate mass balance
cc determine sides with flow bc, get effective nodes
k=1;kk=nx;l=1;ll=ny
if (bc(3,1)=9.OR.bc(3,1)=8) then !bottom
  l=2
endif
if (bc(nx,3)=9.OR.bc(nx,3)=8) then !right
  kk=nx-1
endif
if (bc(3,ny)=9.OR.bc(3,ny)=8) then !top
  ll=ny-1
endif
if (bc(1,3)=9.OR.bc(1,3)=8) then !left
  k=2
endif
cc calculate inflow (0.0 for Laplace PDF)
inflo=0.
do (i=2,nx-1)
  do (j=2,ny-1)
    if (bc(i,j)<>0) then
      inflo=inflo+r(i,j)
    else
      inflo=inflo+r(i,j)/2. !under noflow bc!
    endif
  repeat
repeat
cc calculate outflow
ccc set outflo and bndflo to zero
outflo=0.
do (i=1,4)
  do (j=1,MAX(nx,ny))
    bndflo(i,j)=0.0
  repeat
repeat

```

```

do (i=1,4)
  bckl(i,1)=1; bckl(i,2)=-1
  repeat
ccc calculate flow on sides, bckl contains effective begin and end of
ccc   array bndflo
do (i=1,4)
cccc bottom side:
  if (i=1) then
    j=k; jj=kk-1
    if(bc(3,1)<>9) then !NOT a noflow side
      hi=1+1; lo=1
      call bndfcalc (i,j,jj,hi,lo)
    endif
cccc right side
  elseif (i=2) then
    j=1; jj=11-1
    if (bc(nx,3)<>9) then
      hi=kk-1; lo=kk
      call bndfcalc (i,j,jj,hi,lo)
    endif
cccc top side
  elseif (i=3) then
    j=k; jj=kk-1
    if (bc(3,ny)<>9) then
      hi=11-1; lo=11
      call bndfcalc (i,j,jj,hi,lo)
    endif
cccc left side
  elseif (i=4) then
    j=1; jj=11-1
    if (bc(1,3)<>9) then
      hi=k+1; lo=k
      call bndfcalc (i,j,jj,hi,lo)
    endif
  endif
  bckl(i,1)=j; bckl(i,2)=jj
  repeat
c undo transformations in recharge
do (i=1,nx)
  do (j=1,ny)
    if (bc(i,j)<>8) then      !interior recharge
      r(i,j)=r(i,j)/dxy/dxy
    else                    !fixed flow bc
      r(i,j)=r(i,j)/dxy
    endif
  repeat
  repeat
end
end

```

```

-----
c bndfcalc calculates flow trough boundaries, positive is flow out of
region,
c   negative flow into region
-----

```

```

subroutine bndfcalc (is,l,ll,hi,lo)
include FLO2D.INC
real*8 dhdx
real cbar,vbar

```

```

real bndrf
integer is,l,ll,hi,lo,i,j

c is is used for array indexes, l is begin of bndflow-index, ll end of
c bndflow-index, hi is "inside", lo "outside" of region
c dhdx is gradient, cbar is mean conductivity, vbar is mean head,
c bndflo contains flow in [L^3/T]

c calculate from left to right, or from bottom to top, respectively
do (i=l,ll)
cc for left and right sides
  if (MOD(is,2)=0) then
    dhdx=(v(hi,i)+v(hi,i+1)-v(lo,i)-v(lo,i+1))/dxy/2.
    cbar=(c(hi,i)*c(hi,i+1)*c(lo,i)*c(lo,i+1))**.25
    vbar=(v(hi,i)+v(hi,i+1)+v(lo,i)+v(lo,i+1))/4.
cc for bottom and top sides
  else
    dhdx=(v(i,hi)+v(i+1,hi)-v(i,lo)-v(i+1,lo))/dxy/2.
    cbar=(c(i,hi)*c(i+1,hi)*c(i,lo)*c(i+1,lo))**.25
    vbar=(v(i,hi)+v(i+1,hi)+v(i,lo)+v(i+1,lo))/4.
  endif
  bndrf=dhdx*cbar*vbar*dxy
  bndflo(is,i)=dhdx*cbar*vbar*dxy
  outflo=outflo+bndflo(is,i)
repeat
end

-----
subroutine simout(simtit,simnr)
include FLO2D.INC
integer i,j,simnr
character simtit*(*),solv*10
real difflo,percfl

if (iter>=maxit) then
  solv='unsolved'
else
  solv='solved'
endif
difflo=inflo-outflo
percfl=difflo/inflo*100.
write (30,*) TRIM(simtit),simnr, omega, iter,solv,inflo,outflo,
& difflo,percfl
end

-----
c rf creates unformatted output for real 2D matrix
-----
subroutine rf (unit,z,nq,nx,ny)
implicit none
real z(nq,nq)
integer unit,nq,nx,ny, nn,nnn,nnx, i,j,ii,numuf
parameter (numuf=80)

nn=nx/numuf-1
nnn=nx-(nr+1)*numuf
nnx=MIN(nx,numuf)
do (j=1,ny)
  write(urit,*) (z(i,j),i=1,nnx)

```



```

do (ii=1,nn)
  write(unit,*) (z(i,j),i=ii*numuf+1,(ii+1)*numuf)
  repeat
    if (nnn>0.AND.nn>-1) write(unit,*) (z(i,j),i=(nn+1)*numuf+1,nx)
  repeat
end
-----
c function f2d gets the function value
real*4 function f2d(z0,x,y,l2,l1,q,k)
implicit none
integer n
real*4 term,x,y,l2,l1,q,k,z,z0,pi,sum
pi=3.141592653589793
sum=0.0
do (n=0,15)
  term=(-1)**n*COS((2*n+1)*pi*x/(2*l1))
&      *COSH((2*n+1)*pi*y/(2*l2))
&      /((2*n+1)**3*COSH((2*n+1)*pi*l2/(2*l1)))
  sum=sum+term
repeat
f2d=SQRT(z0**2+((q/k)*(l1**2-x**2))-(32*(q/k)*(l1**2/pi**3)*sum))
end

```

Das File "FLOW2D.INC" enthält globale Variablen und Parameter für das Programm "bogflo.for"

```

c FLOW2D.INC is include file for global parameters
implicit none
c nq is maximal dimension of nodes in x and y direction
integer*4 nq
parameter (nq=100)
c global arrays
c bc: boundary conditions, bckl: index for bd-flow calculations
c v: head, vin: initial head, r: recharge,
c c: conductivity or transmissivity
c a,b,g,d,e,f=r: coefficients for elliptic pde, bndflo: flow through
c rectangular boundaries
double precision v(nq,nq)
integer bc(nq,nq),bckl(4,2)
real vin(nq,nq),r(nq,nq),c(nq,nq),a(nq,nq),b(nq,nq),g(nq,nq),
& d(nq,nq),e(nq,nq),bndflo(4,nq)

c global variables
c nx, ny: actual number of nodes in x- and y-direction, iter: number
c of iterations, maxit: max. number of iterations, it0 its0, its,
itp0,
c itp, it: time in seconds
c dxy: distance between nodes (equal for x and y),
c maxerr: maximal error within one iteration, eps: max. error aloud,
c omega: acceleration parameter for SOR, outflo: sum of outflow,
c inflo: sum of inflo, conf: status for aquifer confined
(conf=.true.)
c or unconfined (conf=.false.)
c problem: description of problem,
c filename: input file name
c disttit: distance title, ictit: initial condition title,

```

```

c      rectit: recharge title, contit: conductivity title
      real*8 anorm,eps
      integer nx,ny,iter,maxit
      integer it,it0,its,its0,itp,itp0
      real*4 dxy,omega,inflo,outflo
      logical conf
      character problem*128,filename*64,disttit*80,ictit*80,
&          rectit*80,contit*80

c define all global arrays and parameters as common block
COMMON /FLO2D1/ v(nq,nq),bc(nq,nq),bckl(4,2),
&          vin(nq,nq),r(nq,nq),c(nq,nq),
&          a(nq,nq),b(nq,nq),g(nq,nq),d(nq,nq),e(nq,nq),
&          bndflo(4,nq),
&          nx,ny,iter,maxit,dxy,anorm,eps,omega,inflo,outflo,
&          conf,problem,
&          filename,disttit,ictit,rectit,contit
COMMON /FLO2D2/ it,it0,its,its0,itp,itp0

```

Lebenslauf von Martin Christoph Schneebeili

- 1958 geboren in Zürich
- 1965-79 Primar- und Kantonsschule in Winterthur und Luzern
- 1979 Matura Typus B
- 1979-1984 Studium an der Abteilung für Kulturtechnik und Vermessung an der ETH Zürich
- 1984-1990 wissenschaftlicher Mitarbeiter und Assistent am Fachbereich Bodenphysik der ETH Zürich