



**Technische Universität Dresden**  
Fakultät Forst-, Geo- und Hydrowissenschaften  
Institut für Geographie

Diplomarbeit

# **Optisch stimulierte Lumineszenzuntersuchungen an fluviatilen Sedimenten aus dem Lena-Delta (sibirische Arktis)**

vorgelegt von Margret Fuchs

Gutachter: Dr. Lutz Schirrmeister (AWI Potsdam)  
Dr. Matthias Krbetschek (SAW Freiberg)  
Prof. Dr. Arno Kleber (TU Dresden)

Dresden, den 29.08.2008



### **Ehrenwörtliche Erklärung**

Hiermit erkläre ich ehrenwörtlich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig angefertigt habe. Die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind als solche kenntlich gemacht.

Dresden, 29. September 2008

Margret Fuchs

# **I INHALTSVERZEICHNIS**

<b>I</b>	<b>Inhaltsverzeichnis .....</b>	<b>I</b>
<b>II</b>	<b>Verzeichnis der Abbildungen und Tabellen .....</b>	<b>III</b>
<b>III</b>	<b>Abkürzungsverzeichnis .....</b>	<b>VI</b>
<b>1</b>	<b>EINLEITUNG .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>UNTERSUCHUNGSGEBIET</b>	
<b>2.1</b>	<b>Lena-Delta und regionales Umfeld</b>	
	2.1.1 Lageeinordnung .....	2
	2.1.2 Geologisch-tektonische Charakteristika .....	3
	2.1.3 Klimatische Charakteristika .....	4
	2.1.4 Geomorphologische Charakteristika .....	5
<b>2.2</b>	<b>Untersuchungen im westlichen Lena-Delta</b>	
	2.2.1 Ablagerungen der dritten Terrasse .....	8
	2.2.2 Ablagerungen der zweiten Terrasse .....	9
<b>2.3</b>	<b>Untersuchungs-Profile</b>	
	2.3.1 Nagym-Sektion (dritte Terrasse) .....	11
	2.3.2 Kurungnakh-Sektion (dritte Terrasse) .....	14
	2.3.3 Khardang-Sektion (dritte Terrasse) .....	17
	2.3.4 Turakh-Sektion (2. Terrasse) .....	19
	2.3.5 Bunge-Land (Neusibirische Inseln) .....	22
<b>3</b>	<b>OSL-METHODIK</b>	
<b>3.1</b>	<b>Lumineszenz - Grundlagen</b>	
	3.1.1 Einordnung der OSL-Datierungsmethode .....	25
	3.1.2 Grundprinzip der OSL-Datierung .....	26
	3.1.3 Modellvorstellungen zur Signalspeicherung .....	28
<b>3.2.</b>	<b>Dosisleistung</b>	
	3.2.1 Natürliche Quellen ionisierender Strahlung .....	30
	3.2.2 Radionuklide im Sediment .....	31
	3.2.3 Kosmische Strahlung .....	32
<b>3.3.</b>	<b>Äquivalenzdosis</b>	
	3.3.1 Messung des OSL-Signals .....	33
	3.3.2 Single aliquot regenerative (SAR) – Methode .....	34
	3.3.3 Auswertung der Messergebnisse .....	36
	3.3.4 Dose Recovery Test .....	37
<b>3.4</b>	<b>Statistische Verfahren zur Bestimmung der Paläodosi</b>	
	3.4.1 ED-Verteilung und Lageparameter .....	39
	3.4.2 Statistische Methoden .....	42

<b>4</b>	<b>PROBENAHPME UND PROBENAUFBEREITUNG</b>	
<b>4.1</b>	<b>Probennahme .....</b>	<b>45</b>
<b>4.2</b>	<b>Probenaufbereitung</b>	
	4.2.1 Bestimmung des Wassergehalts .....	46
	4.2.2 Separation der Quarz-Grobkornfraktion .....	47
	4.2.3 Herstellung homogener Teilproben .....	48
<b>5</b>	<b>ERGEBNISSE</b>	
<b>5.1</b>	<b>Ergebnisse zur Bestimmung der Gesamtdosisleistung in den Untersuchungsgebieten</b>	
	5.1.1 Bunge-Land .....	49
	5.1.2 Nagym-Sektion und Kurungnakh-Sektion .....	50
	5.1.3 Khardang-Sektion .....	51
	5.1.4 Turakh-Sektion .....	51
<b>5.2</b>	<b>Ergebnisse der statistischen Untersuchungen auf Bunge-Land</b>	
	5.2.1 Vergleichsprofil (Bun-4) .....	53
	5.2.2 Auswertung der statistischen Verfahren .....	58
	5.2.3 Übertragen der Ergebnisse auf Bun-5 und Bun-7.....	60
<b>5.3.</b>	<b>Bestimmung der Paläodosen der Profile im Lena-Delta</b>	
	5.3.1 Ergebnisse der Nagym-Sektion.....	64
	5.3.2 Ergebnisse der Kurungnakh-Sektion.....	67
	5.3.3 Ergebnisse der Khardang-Sektion.....	69
	5.3.4 Ergebnisse der Turakh-Sektion.....	71
<b>6</b>	<b>INTERPRETATION UND DISKUSSION</b>	
<b>6.1</b>	<b>Geochronologische Interpretation der Profile</b>	
	6.1.1 Profile von Bunge-Land.....	79
	6.1.2 Profile der dritten Terrasse .....	80
	6.1.3 Profile der zweiten Terrasse .....	84
	6.1.4 Vergleich der OSL-Alter der zweiten und dritten Terrasse.....	86
<b>6.2</b>	<b>Altersdifferenzen zwischen OSL und <sup>14</sup>C.....</b>	<b>88</b>
<b>7</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG.....</b>	<b>91</b>
<b>8</b>	<b>LITERATUR- UND QUELLENVERZEICHNIS.....</b>	<b>93</b>
<b>9</b>	<b>ANHANG.....</b>	<b>101</b>

## II VERZEICHNIS DER ABBILDUNGEN UND TABELLEN

### Abbildungen

Abb. 1:	Lageeinordnung des Lena-Deltas .....	2
Abb. 2:	Tektonischer Überblick der Lena-Delta-Region.....	3
Abb. 3:	Gliederung des Lena-Deltas.....	4
Abb. 4:	Geomorphologische Prozesse im Lena-Delta.....	6
Abb. 5:	Terrassengliederung und Lage der untersuchten Profile .....	7
Abb. 6:	Lage und stratigraphische Einheiten der Kurungnakh-Sektion .....	12
Abb. 7:	Lage und stratigraphische Einheiten der Kurungnakh-Sektion .....	15
Abb. 8:	Lage und stratigraphische Einheiten der Khardang-Sektion .....	18
Abb. 9:	Lage und stratigraphische Einheiten der Turakh-Sektion .....	20
Abb.10:	Lage- und Profilübersicht der Teilprofile Bun-4, Bun-5 und Bun-7 auf Bunge-Land, Neusibirische Inseln .....	23
Abb. 11:	Prinzip der OSL-Datierung .....	26
Abb. 12:	Wachstum des Lumineszenzsignals .....	28
Abb. 13:	Das Bädermodell .....	29
Abb. 14:	Darstellung der Mikrodosimetrie von Quarzkörnern der Grobkornfraktion .	30
Abb. 15:	Schematischer Aufbau der Messgeräte und der Aufzeichnung der Ausleuchtkurve .....	33
Abb. 16:	Generalisierte SAR-Sequenz .....	35
Abb. 17:	Schematischer Ablauf der Probenaufbereitung im Lumineszenzlabor der SAW-Freiberg .....	48
Abb. 18:	Ergebnisse der Gammaskpektrometrie von Bunge-Land, Neusibirische Inseln .....	50
Abb. 19:	Ergebnisse der Gammaskpektrometrie der Nagym- und Kurangnakh-Sektion .....	50
Abb. 20:	Ergebnisse der Gammaskpektrometrie der Khardang-Sektion .....	51
Abb. 21:	Ergebnisse der Gammaskpektrometrie der Turakh-Sektion .....	52
Abb. 22:	Darstellung der Normalverteilungsfunktionen (NV) der PD und ihrer sd nach den untersuchten statistischen Verfahren von Bunge-1 .....	54
Abb. 23:	Darstellung der Normalverteilungsfunktionen (NV) der PD und ihrer sd nach den untersuchten statistischen Verfahren von Bunge-2 .....	57
Abb. 24:	Darstellung der Normalverteilungsfunktionen (NV) der PD und ihrer sd nach den untersuchten statistischen Verfahren von Bunge-3 .....	61
Abb. 25:	Darstellung der Normalverteilungsfunktionen (NV) der PD und ihrer sd nach den untersuchten statistischen Verfahren von Bunge-4 .....	62
Abb. 26:	Darstellung der Normalverteilungsfunktionen (NV) aus PD und ihrer sd nach den untersuchten statistischen Verfahren von Bunge-5 .....	63
Abb. 27:	Darstellung der Normalverteilungsfunktionen (NV) aus PD und ihrer sd nach den untersuchten statistischen Verfahren von OLE 3 .....	65

Abb. 28 :	Darstellung der Normalverteilungsfunktionen (NV) aus PD und ihrer sd nach den untersuchten statistischen Verfahren von OLE 4 .....	66
Abb. 29:	Darstellung der Normalverteilungsfunktionen (NV) aus PD und ihrer sd nach den untersuchten statistischen Verfahren von OLE 5 .....	67
Abb. 30:	Darstellung der Normalverteilungsfunktionen (NV) aus PD und ihrer sd nach den untersuchten statistischen Verfahren von OLE 8 .....	68
Abb. 31:	Darstellung der Normalverteilungsfunktionen (NV) aus PD und ihrer sd nach den untersuchten statistischen Verfahren von OLE 8b .....	69
Abb. 32:	Darstellung der Normalverteilungsfunktionen (NV) aus PD und ihrer sd nach den untersuchten statistischen Verfahren von Kha-OSL-1 .....	70
Abb. 33:	Darstellung der Normalverteilungsfunktionen (NV) aus PD und ihrer sd nach den untersuchten statistischen Verfahren von Kha-OSL-2 .....	71
Abb. 34:	Darstellung der Normalverteilungsfunktionen (NV) aus PD und ihrer sd nach den untersuchten statistischen Verfahren von Tur-OSL-1 .....	72
Abb. 35 :	Darstellung der Normalverteilungsfunktionen (NV) aus PD und ihrer sd nach den untersuchten statistischen Verfahren von Tur-OSL-2 .....	73
Abb. 36:	Darstellung der Normalverteilungsfunktionen (NV) aus PD und ihrer sd nach den untersuchten statistischen Verfahren von Tur-OSL-3 .....	74
Abb. 37:	Darstellung der Normalverteilungsfunktionen (NV) aus PD und ihrer sd nach den untersuchten statistischen Verfahren von Tur-OSL-4 .....	75
Abb. 38:	Darstellung der Normalverteilungsfunktionen (NV) aus PD und ihrer sd nach den untersuchten statistischen Verfahren von Tur-OSL-5 .....	76
Abb. 39 :	Darstellung der Normalverteilungsfunktionen (NV) aus PD und ihrer sd nach den untersuchten statistischen Verfahren von Tur-OSL-6 .....	77
Abb. 40:	Darstellung der Normalverteilungsfunktionen (NV) aus PD und ihrer sd nach den untersuchten statistischen Verfahren von Tur-OSL-7 .....	78
Abb. 41:	OSL-Alter der Subprofile Bun-4 und Bun-5 von Bunge-Land, Neusibirische Inseln .....	79
Abb. 42:	OSL-Alter des Subprofils Bun-7 von Bunge-Land, Neusibirische Inseln ....	80
Abb. 43:	OSL-Alter der Nagym-Sektion .....	81
Abb. 44:	OSL-Alter der Kurungnakh-Sektion .....	83
Abb. 46:	OSL-Alter des Profils Kha-1 der Khardang-Sektion .....	84
Abb. 47:	OSL-Alter der Profile Tur-1 und Tur-2, Turakh-Sektion .....	85
Abb. 48:	Vergleich der OSL-Alter der zweiten und dritten Terrasse .....	86
Abb. 49:	Schematische Darstellung der Ablagerungen im westlichen Lena-Delta .....	87

## Tabellen

Tab. 1:	Zusammenfassung der Altersvorstellungen zum westlichen Lena-Delta ...	11
Tab. 2:	Übersicht bisheriger Datierungsergebnisse der Nagym-Sektion .....	13
Tab. 3:	OSL-Proben der Nagym-Sektion .....	14
Tab. 4:	Übersicht bisheriger Datierungsergebnisse der Kurungnakh-Sektion .....	16
Tab. 5:	OSL-Proben der Kurungnakh-Sektion .....	17
Tab. 6:	OSL-Proben der Khardang-Sektion .....	19
Tab. 7:	Radiokarbonalter der Turakh-Sektion (Tur-1 und Tur-2) .....	21
Tab. 8:	OSL-Proben der Turakh-Sektion .....	21
Tab. 9:	OSL-Proben von Bungeland .....	24
Tab. 10:	Ergebnisse der statistischen OSL-Analysen von Bunge-1 und ihre Altersdifferenz zum $^{14}\text{C}$ -Parallelalter bei $12.405 \pm 55$ a BP .....	55
Tab. 11:	Ergebnisse der statistischen OSL-Analysen von Bunge-2 und ihre Altersdifferenz zum $^{14}\text{C}$ -Parallelalter bei $7.070 \pm 25$ a BP .....	57

### III ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

$^{14}\text{C}$	-	Radiokarbonmethode, kurz für $^{14}\text{C}$ -Methode
$\alpha, \beta, \gamma$	-	alpha, beta, gamma
$\mu\text{m}$	-	Mikrometer ( $10^{-6}\text{m}$ )
a	-	Jahr(e) (anno)
Abb.	-	Abbildung
AMS	-	Accelerated Mass Spectrometry (beschleunigte Massenspektrometrie)
AWI	-	Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung
Bi	-	Wismut
BP	-	vor heute (before present)
Bq	-	Becquerel
bzw.	-	beziehungsweise
ca.	-	circa
D	-	Natürlich akkumulierte Dosis
DL	-	Dosisleistung
DR	-	Dose Recovery
ED	-	Äquivalenzdosis
g	-	Gramm
Gew.-%	-	Gewichtsprozent
GOF	-	Geländeoberfläche
Gy	-	Gray, Einheit der absorbierten Strahlendosis ( $1\text{ Gy} = 1\text{ J/kg}$ )
$\text{H}_2\text{O}$	-	Wasser
$\text{H}_2\text{O}_2$	-	Wasserstoffperoxid
$\text{H}_2\text{SO}_4$	-	Schwefelsäure
HCl	-	Salzsäure
HF	-	Flusssäure
i.d.R.	-	in der Regel
IC	-	Eiskomplex, eis- und organikreich Permafrostsequenz mit großen Eiskeile
IR	-	Infrarot
IR-OSL	-	infrarot stimulierte Lumineszenz
K	-	Kalium
ka	-	1000 Jahre (kiloanno)
kg	-	Kilogramm
km	-	Kilometer
LED	-	Light Emitting Diode
LN	-	natürlicher Logarithmus
m	-	Meter
max.	-	maximal
Max.	-	Maximum
md	-	Median
mGy	-	Milligray ( $1\text{ Gy} = 1000\text{ mGy}$ )
Min.	-	Minimum
min.	-	Minute(n)
MIS	-	Marines Sauerstoffisotopen-Stadium
ml	-	Milliliter
mm	-	Millimeter
mW	-	Milliwatt

N	-	Anzahl der Werte
N.S.	-	Natürliches OSL-Signal
nm	-	Nanometer ( $10^{-9}$ m)
NP	-	Nullpunktverhältnis
OSL	-	optisch stimulierte Lumineszenz
Pd	-	Palladium
PD	-	Paläodosis
Ra	-	Radium
Rn	-	Radon
rpm	-	rounds per minute
RR	-	Recycling Ratio
s	-	Sekunde
SAR	-	Single-Aliquot Regenerative-Dose Protocol
SAW	-	Sächsische Akademie der Wissenschaften zu Leipzig
sd	-	Standardabweichung
Sr	-	Strontium
t	-	Zeit
Tab.	-	Tabelle
TDE	-	Test Dose Error
Th	-	Thorium
TL	-	Thermolumineszenz
TU	-	Technische Universität
U	-	Uran
u.a.	-	und andere / unter anderem
ü.d.M	-	über dem Meer (als Bezugsgrundlage gegenüber dem lokalen Meeresspiegelniveau)
v	-	relative Standardabweichung (Variationskoeffizient)
V	-	Volumen
v.a.	-	vor allem
$v_{DR}$	-	relative Standardabweichung (Variationskoeffizient) des Dose-Recovery-Tests
vgl.	-	vergleiche
$\bar{x}_q$	-	arithmetisches Mittel
Y	-	Yttrium
z.B.	-	zum Beispiel
z.T.	-	zum Teil

# 1 EINLEITUNG

Das Lena-Delta als größtes arktisches Delta stellt ein wichtiges Bindeglied zwischen kontinentalen und marinen Prozessen dar. Über die Lena werden enorme Sedimentmengen aus dem Sibirischen Festland in die Laptevsee eingetragen (RACHOLD et al. 1999b). Durch die Lieferung salzarmen Oberflächenwassers über das Schelf ins Nordpolarmeer trägt die Lena bedeutend zum Zirkulationssystem der Transpolardrift und zum Mechanismus der thermohalinen Zirkulation bis in den Atlantik bei (MÜLLER-LUPP 2002). Über diesen Zusammenhang beeinflusst das Lena-Delta einerseits das globale Klima und andererseits besteht eine Rückkopplung vom Klima auf die Entwicklung des Lena-Deltas (u.a. BLÜMEL 1999; SCHWAMBORN et al. 2002). Einhergehend mit der Sedimentakkumulation im Delta an sich, werden zahlreiche Informationen über die Umweltbedingungen der Ablagerung gespeichert. Sie gewähren einen Einblick in die Vergangenheit und lassen Rückschlüsse auf das arktische Klimasystem der Gegenwart und nahen Zukunft zu.

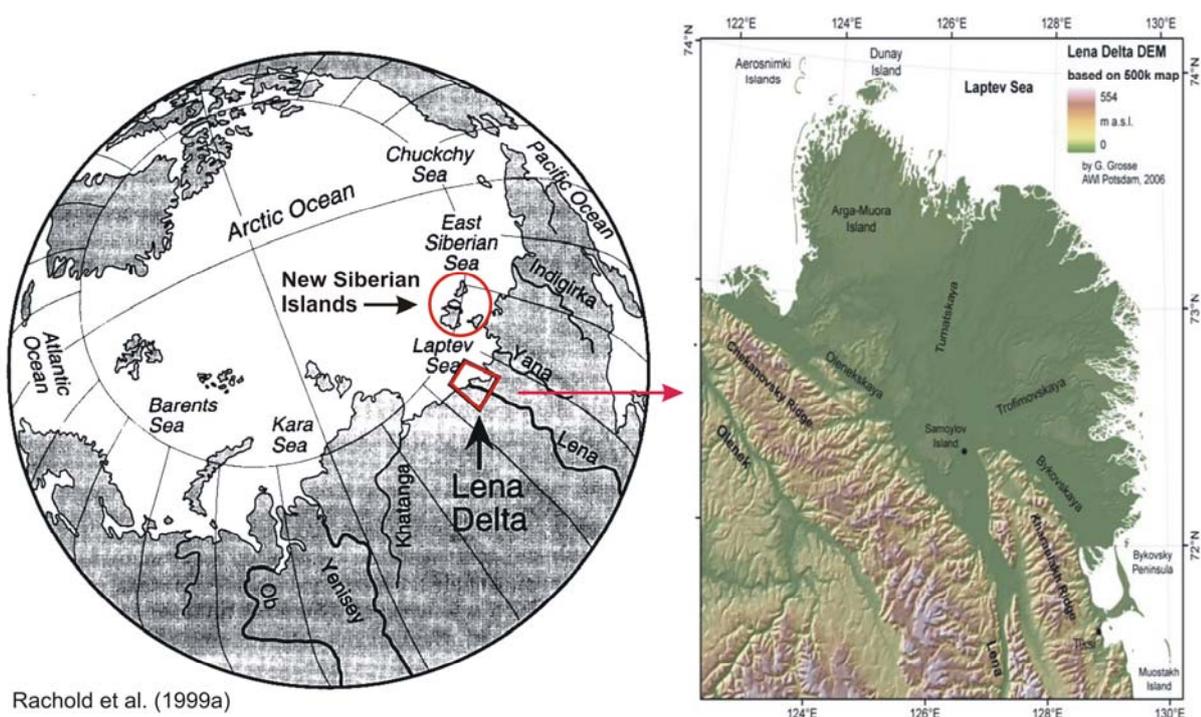
Im Rahmen der deutsch-russischen Wissenschaftskooperation SYSTEM LAPTEV SEA wurden während verschiedener Expeditionen des Alfred-Wegener-Instituts für Polar- und Meeresforschung seit 1998 zahlreiche multidisziplinäre Untersuchungen zur quartären Umweltdynamik der sibirischen Arktis an den Küsten der Laptevsee, im Lenadelta sowie auf den Neusibirischen Inseln durchgeführt (u.a. SCHWAMBORN et al. 1999, 2002, KRBETSCHKE et al. 2002, SCHIRRMEISTER et al. 2003a, 2003b, 2007). Zur Rekonstruktion der Paläoumwelt ist eine möglichst genaue geochronologische Aufschlüsselung der Sedimentkomplexe von besonderer Bedeutung. Hierfür eignen sich vor allem OSL-Untersuchungen zur Bestimmung der Sedimentationsalter. Ein wichtiges Problem der OSL-Datierung stellt die möglicherweise unzureichende Bleichung der Quarzkörner im Zuge der periglazialen Transport- und Ablagerungsprozesse dar. Anhand eines Beispielprofils von den Neusibirischen Inseln, für das  $^{14}\text{C}$ -Vergleichsalter vorliegen, werden die in der Literatur vorgeschlagenen statistischen Methoden der Auswertung von OSL-Daten (Lage- und Streuungsparameter, MURRAY et al. 1995, OLLEY et al. 1998, GALBRAITH et al. 1999, FUCHS & LANG 2001, LEPPER & MCKEEVER 2002) miteinander verglichen, um möglichst genaue Datierungsergebnisse zu erreichen. Die aus diesen unabhängigen Untersuchungen gewonnenen Erkenntnisse zur statistischen Auswertung werden anschließend auf die Permafrostsequenzen im westlichen Lena-Delta übertragen. Im Zentrum steht dabei die Altersbeziehung zwischen der dritten geomorphologischen Hauptterrasse mit den imposanten Eiskomplexformationen an der Oberfläche im südlichen Delta und den sandigen Sequenzen des Arga-Komplexes auf der zweiten Terrasse im nordwestlichen Delta. Die OSL-Untersuchungen und statistischen Auswertungen wurden repräsentativ an drei Lokalitäten der dritten Terrasse und zwei zusammenhängenden Profilen der zweiten Terrasse vorgenommen. Da in den Untersuchungsprofilen zusätzlich zahlreiche  $^{14}\text{C}$ -Alter vorliegen, können diese mit der an den Profilen erarbeiteten OSL-Chronologie verglichen werden, um Rückschlüsse auf Genauigkeit und Probleme zu ziehen.

## 2 UNTERSUCHUNGSGEBIET

### 2.1 Lena-Delta und regionales Umfeld

#### 2.1.1 Lageinordnung

Das Lena-Delta als größtes arktisches Delta ( $3.2 \cdot 10^4 \text{ km}^2$ ) liegt nördlich des Polarkreises zwischen  $72^\circ$  und  $74^\circ$  nördlicher Breite und  $123^\circ$  und  $129^\circ$  östlicher Länge an der nordsibirischen Küste in der russischen Republik Sakha (Yakutien) (SCHWAMBORN et al. 2002a). Hier mündet die ca. 4400 km lange Lena aus dem über 20 Breitengrade südlicher gelegenen Baikalsee kommend in die das Delta nördlich umschließende Laptevsee, einem breiten Schelfmeer des Nordpolarmeers (Walker 1998). Aus diesem riesigen Einzugsgebiet (ca.  $2,5 \cdot 10^6 \text{ km}^2$ ) akkumuliert sie mächtige Sedimentfolgen im rezenten Kontaktbereich von kontinentalen und marinen Prozessen (RACHOLD et al. 1999b). Im Süden begrenzen das Delta die nördlichen Ausläufer des Verkhoyansker Berglandes, die Chekanovsky- und im Südost die Kharaulakh-Gebirgskette, zwischen denen die Lena in einer engen Passage hindurchfließt (Abb. 1). Der nordsibirischen Küste vorgelagert, nordöstlich des Lena-Deltas grenzen die Neusibirischen Inseln die Laptevsee gegen Osten gegen die Ostsibirische See ab. Im Westen schließt die Taymyr-Halbinsel die Laptevsee ab (MÜLLER-LUPP 2002).

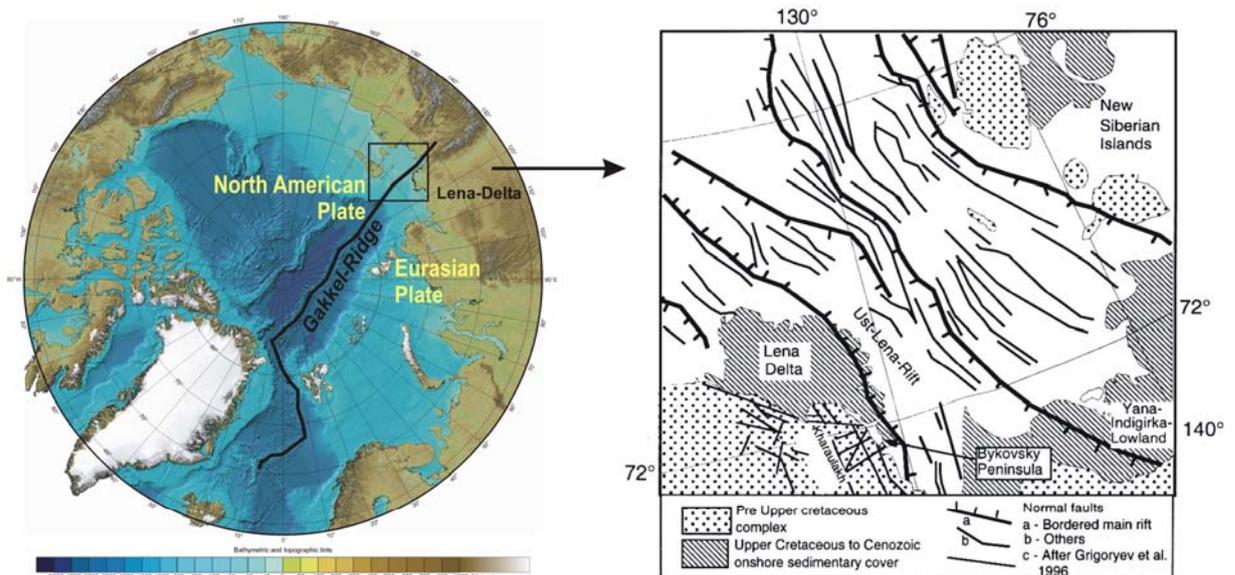


Rachold et al. (1999a)

Abb. 1: Lageinordnung des Lena-Deltas (links: verändert nach RACHOLD et al. (1999a); rechts: GROSSE (2005))

## 2.1.2 Geologisch-tektonische Charakteristika

Die Lage im Bereich der seismisch aktiven arktischen Rift-Zone zwischen eurasischer und nordamerikanischer Platte prägt die Entwicklung des Lena-Deltas bis heute. Seismische Daten dokumentieren eine Verbindung zur Gakkel-Ridge des arktischen Beckens (ARE & REIMNITZ 2000). Dessen Ausläufer bilden nordöstlich des Deltas im flachen, breiten Schelfbereich das neoaktive Ust'-Lena Riftsystem aus (vgl. Abb. 2). Es wird beschrieben als vertikale Block-Tektonik mit engstehenden langen Horst-, Graben- und Synklinalstrukturen, die sich als Serie von Störungen unter den känozoischen Sedimenten des Deltas bis zum Verkhoyansker Bergland (Chekanovsky – und Kharaulakh Gebirgskette) fortsetzt (GALABALA 1987, SCHIRRMEISTER et al. 1999, 2003b). Die auffallende Linearität der Haupt-Deltaarme, wie Olenyokskaya, Bykovskaya und Tumatskaya Kanal, zeichnet diese Block-Tektonik an der Oberfläche nach. Die Sedimentmächtigkeiten deuten auf eine anhaltende Absenkung des im östlichen Delta-Sektor hin (SCHWAMBORN et al. 2002a).



**Abb. 2: Tektonischer Überblick der Lena-Delta-Region** (links: nach Kartengrundlage: Geology.Com, bearbeitet nach: AWI (2008a); rechts: SCHIRRMEISTER et al. 1999)

Seit mindestens 400 ka wird in der Laptevsee-Region von periglazialen Bedingungen mit Permafrost ausgegangen. Der mehr als 400 km breite und durchschnittlich nur 60 m tiefe Laptevsee-Shelf unterlag während den pleistozänen Glazialen mehreren Regressions- und Transgressionsphasen. Das Lena-Delta war zumindest im letzten Glazial ohne Eisschild und zeigt keine glazial-isostatische Bewegungen (SCHWAMBORN et al. 2002a, HUBBERTEN et al. 2004, ROMANOVSKII et al. 2004). Ca. 40 % des Lena-Deltas bestehen aus Erosionsresten gehobener Blöcke präholozäner Ebenen und vereinzelt Vorkommen devonischen Grundgesteins, die vor allem im westlichen und südlichen Delta anstehen. Das moderne Delta nimmt die Bereiche zwischen den älteren Inseln und in großen Bereichen im Osten ein (ARE & REIMNITZ 2000) (Vgl. Abb. 3).

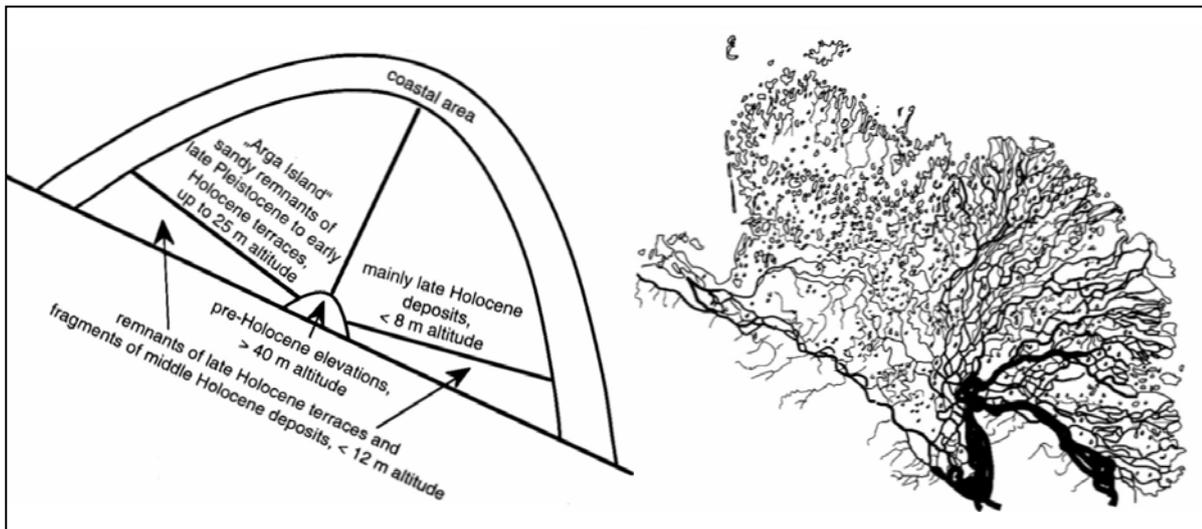


Abb. 3: Gliederung des Lena-Deltas (nach: SCHWAMBORN et al. 1999)

### 2.1.3 Klimatische Charakteristika

Das Klima im Lena-Delta ist gekennzeichnet als Tundrenklima (ET, wärmster Monat 0 – 10 °C). Es resultiert aus den Einstrahlungsverhältnissen der polaren Breitenlage (geringe Sonneneinstrahlung bis Polarnacht) und durch seine Küstenlage aus kontinentalen und maritimen Klima-Komponenten. Dabei dominiert der starke kontinentale Einfluss der eurasiatischen Landmasse, wodurch ein ausgeprägtes polares Jahreszeitenklima vorherrscht (WALKER 1998). Die Monatsmittel der Temperaturen schwanken von < 10 °C im Juli bis unter -30 °C im Januar bei einem Jahresmittel um -14 °C (BLÜMEL 1999, WÜTHRICH & THANNHEISER 2002). Danach wird das Delta der hochpolaren periglazialen Frostschuttzone zugerechnet. Dauerfrost und Frostwechsel prägen die geomorphologischen Prozesse (FRENCH 2007). Die Winter sind allgemein extrem kalt und lang (WEISE 1983). Im Schnitt sind das Lena-Delta sowie die angrenzende Laptevsee 8 – 9 Monate eis- bzw. schneebedeckt (WALKER 1998, SCHWAMBORN et al. 2002a). Das Zufrieren der Laptevsee verstärkt die kontinentale Klimakomponente durch die hohe Albedo von Eis und Schnee und hemmt den mildernden Einfluss des Meerwassers auf die Temperatur (BLÜMEL 1999). Die Sommer sind kurz mit einer durchschnittlichen frostfreien Periode im Lena-Delta von < 45 Tagen. Verstärkt wirkt der ozeanische Einfluss mit feuchter, kühler Luft und z.T. starken Winden vom Nordpolarmeer (WEIN 1999).

Trotz Küstenlage fallen relativ geringe Niederschläge (ca. 200 – 250 mm/a) (WEISE 1983, WALKER 1998) und diese v.a. in den Sommermonaten (WEIN 1999). Die trockeneren Winter akkumulieren bis zur Schneeschmelze nur eine geringmächtige Schneedecke (i.d.R. < 40 cm), die von starken Winden häufig verweht wird. (WEISE 1983). Trotz geringer Niederschläge kommt es zu einer Überfeuchtung der Landschaft durch stauende Wirkung des Dauerfrostbodens mit nur geringmächtiger Auftauschicht und durch geringe Evapotranspiration infolge der niedrigen Temperaturen (WALKER 1998, WEIN 1999)

## 2.1.4 Geomorphologische Charakteristika

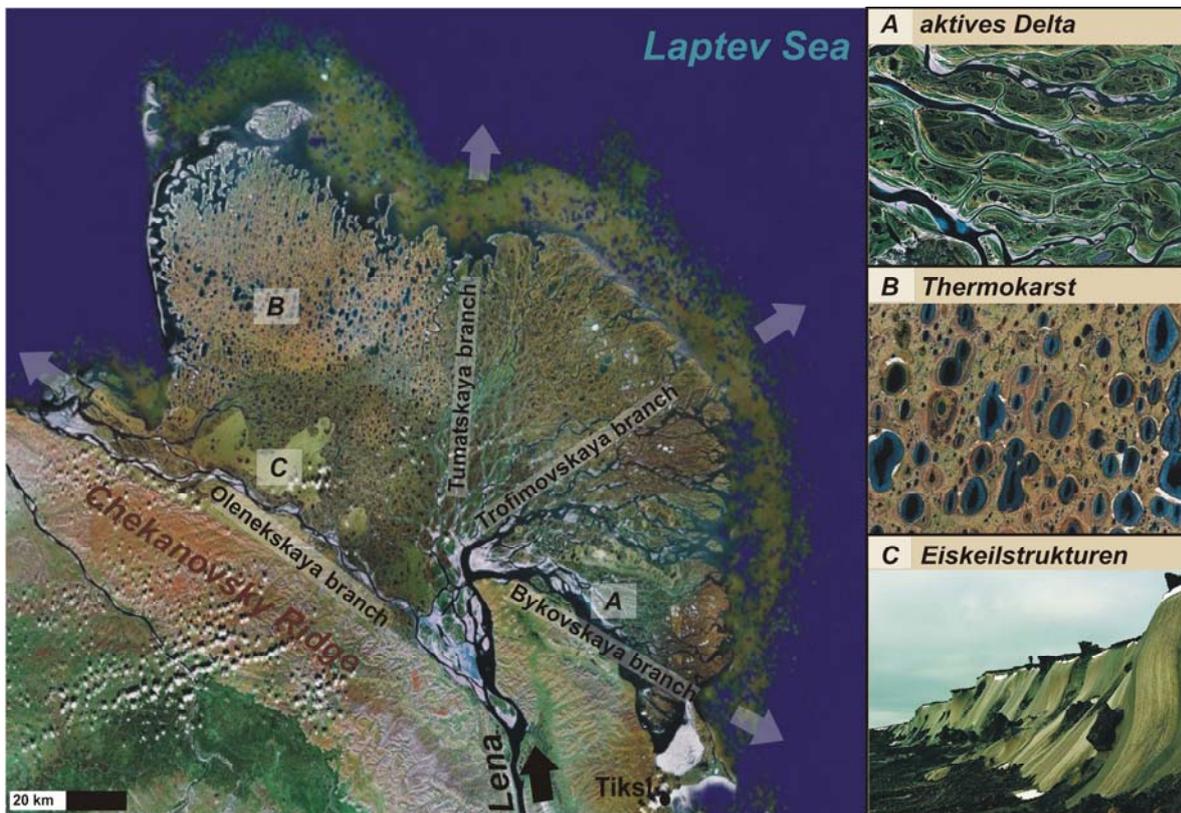
Die Prozesse im Lena-Delta charakterisiert das Wechselspiel einerseits aus Deltadynamik und andererseits aus dem periglazialen Regime der Arktis. Als Bindeglied zwischen kontinentalen und marinen Prozessen spiegelt sich im Sedimentkörper des Deltas das Sedimentbudget wieder. Es wird gesteuert von dem großen Materialinput des riesigen Einzugsgebietes der Lena und dem Materialoutput infolge von Transport- und Erosionsprozessen der Deltaarme und der Küstenerosion (RACHOLD et al. 1999b).

Auf der flachen Akkumulationsplattform bilden sich über 800 vielfach verzweigte und verschlungene Deltaarme zwischen tausenden, zumeist kleiner Inseln (WALKER 1998). Der Hauptteil des jährliche Gesamtabfluss von  $525 \text{ km}^3/\text{a}$  entwässert über den Trofimovskaya -, Bykovskaya -, Tumatskaya – und Olenyokskaya Kanal und unterliegt einer starken saisonalen Variabilität (SCHWAMBORN 2004). Gemäß den arktischen Bedingungen findet in den langen Wintern kaum geomorphologische Aktivität in Form von Partikel- und Materialtransport statt (ANTONOW 1999). Mit dem Aufbrechen der Flusseisdecke während der wenigen Wochen im arktischen Frühjahr steigt der Partikeltransport rapide an und erreicht seine maximale Intensität im Juni, auf den etwa einem Drittel des Gesamtabflusses entfallen (WALKER 1998, SCHWAMBORN et al. 2002a). Im Sommer erfolgt der Übergang in das reguläre sehr dynamische hydrologische Regime bis zum erneuten Einfrieren im Herbst. Wegen der resultierenden hochgradigen lateralen Migration der Flussarme und der Erosionskraft der Frühjahrsschmelzwässer unterliegt das Delta insgesamt ständigen Veränderungen der Deltaarmgeometrie und Flutungsbereiche. Diese dynamischen Deltaprozesse werden rezent insbesondere im östlichen Delta-Sektor (modernes Delta) beobachtet (ANTONOW 1999) (vgl. Abb. 4, A)

Neben den Deltaprozessen spielen für die interne Sedimentdynamik des Lena-Delta frostgesteuerte Prozesse der periglazialen Gebiete eine entscheidende Rolle und prägen einhergehend den Formenschatz. Bedingt durch die niedrigen Temperaturen herrscht im Untergrund des Lena-Deltas kontinuierlicher Permafrost vor (ab ca.  $-6 \text{ °C}$  Jahresdurchschnitt nach WEISE 1983), in dem die Temperatur ganzjährig  $0 \text{ °C}$  für mindestens zwei aufeinander folgende Jahre nicht übersteigt (FRENCH 2007). Er reicht bis 600m tief ins Gestein und setzt sich auch bis ca. 50 – 60 m unter dem Meeresspiegel im Schelfgebiet fort (ROMANOVSKII et al. 2004). Die sommerliche Auftauschicht (active layer) beträgt im Lena-Delta selten  $> 50 \text{ cm}$  (WEIN 1999) und ist lokal v.a. abhängig von der Korngröße und Vegetationsbedeckung des Sediments (WALKER 1998). Der Permafrost bleibt im Untergrund erhalten und wirkt daher stauend für das Wasser der hangenden Schicht. Die morphologischen Prozesse konzentrieren sich demnach auf diese oberflächliche Auftauschicht. Sie ergeben sich im Wesentlichen aus den Auftau-Gefrier-Zyklen, die zu einer Vielzahl von periglazialen Transport- bzw. Umlagerungsprozessen sowie resultierenden Formen führen (ANTONOW 1999).

Charakteristische periglaziale Prozesse werden als Kryoturbation und Solifluktion beschrieben. Vor allem durch Frostwechsel und die damit verbundenen Volumenänderungen von  $\text{H}_2\text{O}$  kommt es zur Materialsortierung mit Frostmusterböden und Polygonstrukturen gegliedert durch Eiskeil(-netz)-e, Steinringe, Steinnetze und Steinstreifen (WEISE 1983, FRENCH 2007). Die Eiskeile variieren in Größe und Abstand abhängig von Material und

Temperaturverhältnissen. Besonders groß treten sie in torfigen und feinkörnigen Sedimenten in Erscheinung, wo sie Eiskeil-Polygone bilden können und einen wichtigen Anteil zur Flussufer-Erosion beitragen können (WALKER 1998). Besonders imposante Eiskeilstrukturen treten im südlichen Delta auf (Abb. 4, C). Weitere typische Landformen sind zahlreiche Pingos (WALKER 1998). Starke Winde formen Deflationswannen und Dünen (ANTONOW 1999).



**Abb. 4: Geomorphologische Prozesse im Lena-Delta** (Kartengrundlage bearbeitet nach: Google-Maps, Foto: Eiskeilstrukturen, AWI 2008b)

Das Tauen von eisreichen Permafrost und die damit verbundenen meist lokalen Prozesse, wie Kollabieren, Absenken und Erosion von Sedimenten, werden unter dem Begriff Thermokarst und Thermoerosion zusammengefasst. Ursachen werden insbesondere in klimatischen Erwärmungen und/oder im Zusammenhang mit der Wärmekapazität saisonaler Tauwasserkörper in Hohlformen gesehen (meist orientiert an Ausrichtung der Eiskeilpolygonstrukturen), die das thermische Gleichgewicht im Permafrost stören und zu seiner Degradation führen können. Die Bildung von Depressionen mit bevorzugter Wasseransammlung begünstigen das Fortschreiten der Austauprozesse. Bleibt das Wasser ganzjährig in Form von Seen erhalten, kommt es unter ihnen zur Talikbildung (Niefrostbereich) (FRENCH 2007). Im Zuge der holozänen Klimaerwärmung setzten die Thermokarstprozesse im Lena-Delta etwa 7 – 8 ka BP ein. Sie sind in bedeutendem Maße beteiligt an der Entwicklung der orientierten Seen, die sich besonders auffällig im westlichen Teil des Deltas zeigen (Abb. 4, B) (SCHWAMBORN et al. 2002a, LANTUIT et al. 2007). Ein zusätzlicher Faktor für die Längsstreckung der Seen wird in der Neigung der Geländeoberfläche gen Norden gesehen (PAVLOVA & DOROZHKINA 2001).

Anhand der unterschiedlichen Charakteristika lassen sich im Lena-Delta verschiedene Bereiche abgrenzen (PAVLOVA & DOROZHKINA 2001), die in 3 geomorphologische Hauptterrassen gegliedert sind (vgl. SCHWAMBORN 2004). Demnach werden die alluvialen Sedimente im Osten zwischen dem Tumatskaya und dem Bykovskaya Kanal der ersten Terrasse (1 – 12 m ü.d.M) zugeordnet, die das modern aktive Delta bilden (ARE & REIMNITZ 2000). Im Nordwesten zwischen dem Tumatskaya und dem Olenyokskaya Kanal liegen die sandigen Sequenzen der zweiten Terrasse (20 – 30 m ü.d.M), die durch zahlreiche orientierte Seen, Thermokarstprozesse und von Deltaarmen kaum zerschnittene große Inseln gekennzeichnet sind. Den bedeutendsten Flächenanteil dieser Terrasse nimmt deren größte Insel Arga Muora Sise mit einem Durchmesser von 110 km ein, die den sogenannten Argakomplex aufbaut (WALKER 1998, SCHWAMBORN et al. 2002b). Im Süden und Südosten des Deltas entlang des Olenyokskaya und des Bykovskaya Kanals treten einzelne Inseln der dritten Terrasse (30 – 55 m ü.d.M) aus Sanden überlagert von einem sogenannten Eiskomplex (IC) mit zahlreichen, großen Eiskeilen in Erscheinung (SCHWAMBORN et al. 2002a, SCHIRRMEISTER et al. 2003a). Die Untersuchungen dieser Arbeit konzentrieren sich anhand von ausgewählten Profilen (Abb. 5) auf die Altersbeziehungen der zweiten und dritten Terrasse im westlichen Lena-Delta, die im Kap. 2.2 näher beschrieben werden.

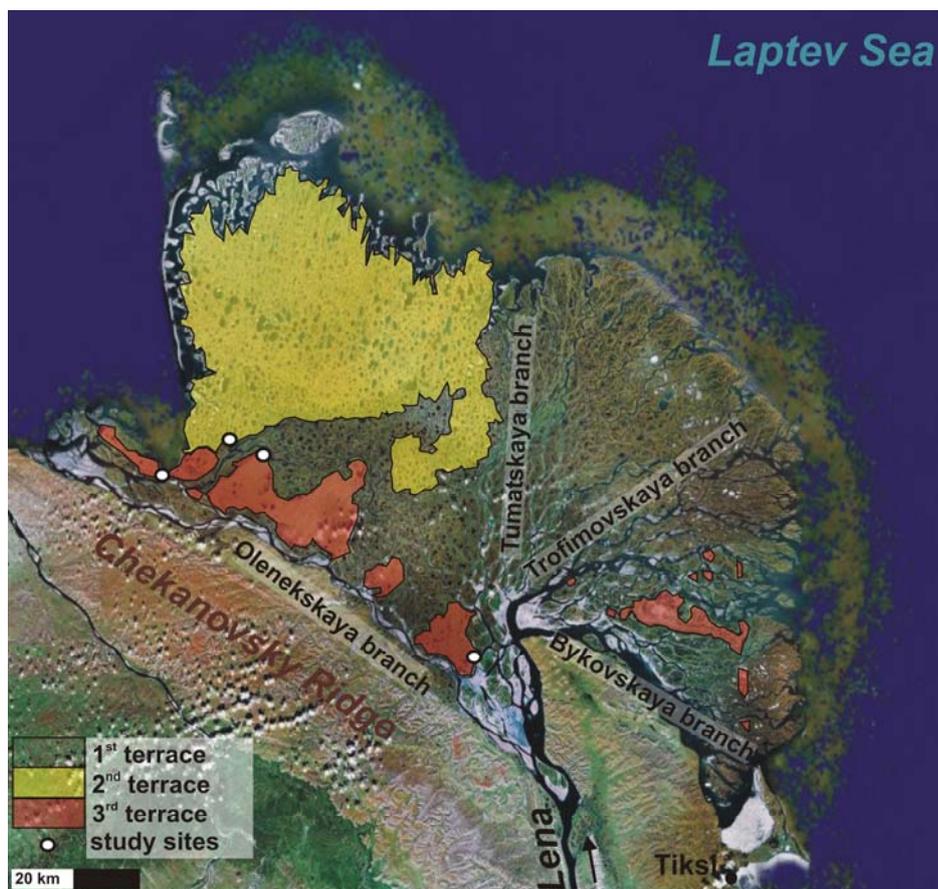


Abb. 5: Terrassengliederung und Lage der untersuchten Profile (SCHWAMBORN et al. 2002a, Kartengrundlage bearbeitet nach: Google-Maps)

## 2.2 Untersuchungen im westlichen Lena-Delta

### 2.2.1 Ablagerungen der dritten Terrasse

Die inselhaft auftretenden Ablagerungen der dritten Terrasse (30 – 55 m ü.d.M) werden als Reste einer ausgedehnten spätpleistozänen Akkumulationsebene nördlich der Chekanovsky Gebirgskette auf dem trockengefallenen Laptevsee-Schelf gedeutet (SCHIRRMEISTER et al. 2003a). Tektonischen Prozessen (differenzierte vertikale Bewegung von Blöcken) und einhergehende Erosion hinterließen das räumlich variable Muster der heute erhaltenen Terrassenreste auf gehobenen Bereichen (GALABALA 1997, ARE & REIMNITZ 2000). Im westlichen Lena-Delta sind sie entlang des Olenyok-Kanals und des Arynskaya-Kanals auf den Inseln Ebe-Basyn-Sise, Khardang-Sise, Dzhangylakh-Sise und Kurungnakh Sise aufgeschlossen (PAVLOVA & DOROZHINA 2001). Es werden die zwei charakteristischen Hauptformationen untere Sandeinheit (Bulukurskaya Folge) diskordant überlagert von einem Eiskomplex (Kobakh Folge / Yedomas Folge) beschrieben (SCHIRRMEISTER et al. 1999, 2001). An der Oberfläche wird der Eiskomplex (IC) von zahlreichen holozänen Thermokarst-Depressionsfüllungen überlagert (WETTERICH et al. 2008).

Die liegende sandige Sequenz werden als alluvial-äolische Sande mit Kiesanteilen beschrieben (SCHIRRMEISTER et al. 2003a). Es handelt sich um eisarme (< 25 Gew.-%), Sande mit Kryoturbationen und zwischengeschalteten Wurzelhorizonten, deren Anzahl zur Oberfläche hin abnimmt sind zu erkennen. Die wellige Lagerung und die Korngrößen sprechen für eine fluviale, sandbankartige Sedimentation unter Flachwasserbedingungen. Schwermineral-zusammensetzung spiegelt das Lena-Signal wieder, vergleichbar dem rezenten Alluvium der ersten Terrasse (SCHWAMBORN et al. 2002a, SCHIRRMEISTER et al. 2003a). GALABALA 1987 stellt sie stratigraphisch der 2. Terrasse gleich. Doch zahlreiche Datierungen widerlegen diese These. Aufgrund von <sup>14</sup>C-Altern (AMS) und IR-OSL-Untersuchungen konnten die Sandsequenzen dem Zyryan (100 – 50 ka BP, Q<sub>III</sub><sup>2</sup>, **siehe Anhang, A1**) mit kaltem und trockenem Klima zugeordnet werden. <sup>230</sup>Th/ U-Datierungen stellen die Basis der Sandsequenz in das Kazantsev-Interglazial (Q<sub>III</sub><sup>1</sup>, 130 – 100 ka BP) (KRBETSCHKE et al. 2002, SCHWAMBORN et al. 2002a, SCHIRRMEISTER et al. 2003a). IR-OSL-Untersuchungen auf der Bykovsky Halbinsel und der Insel Bol'shoy Lyakhovsky an der Basis des überlagernden IC ergaben Alter > 150 ka BP, wonach die sandigen Ablagerungen im Tazov-Shirtin (Q<sub>II</sub><sup>3</sup>) wesentlich früher entstanden sind (GROSSE 2001).

Der scharfe Fazieswechsel wird als Resultat der tektonischen Hebung der kontinentalen Seite entlang des durch den Olenyok-Kanal markierten Verwerfungssystems bis ca. 50 ka BP) und klimatischer Veränderungen interpretiert. An verschiedenen Lokalkitäten kann ein stark kryoturbierter Paläoboden beobachtet werden (SCHWAMBORN et al. 2002a).

Bei dem IC handelt sich um eisreiche Permafrostsequenzen, die im Lena-Delta Mächtigkeiten bis 20 – 30 m erreichen und weit verbreitet in den Küstenebenen Nordost-Sibiriens sind (SCHIRRMEISTER et al. 2003a). Charakteristisch sind organikreiche (TOC < 18 Gew.-%), feinsandige bis schluffige, teils karbonathaltige Sedimente in Wechsellagerung mit torfigen Formationen bzw. Torfeinschlüssen (SCHWAMBORN et al. 2002a, WETTERICH et al. 2008). Sie zeigen einen gravimetrischer Eisgehalt bis 150 % des Trockengewichts bei hohem Gehalt an

segregiertem Eis und großen Eiskeilen (einige > 20 m tief und 5 - 6 weit), kryoturbierte Paläoböden und zahlreiche Säugetierfossilien („Mammut-Fauna“) (WETTERICH et al. 2008). Zusammensetzung der Schwerminerale ist vergleichbar mit der aus dem südlich bis südwestlich gelegenen Chekanovsky-Gebirge und ist deutlich unterschieden von den sonst relativ ähnlichen Gehalten (Lena River Signal) in den sandigen Sequenzen der drei Terrassen. Entsprechend wird die Lena in dieser Phase als inaktiv zumindest im Bereich des Olenyok-Kanals angesehen (SCHWAMBORN et al. 2002a). Die nur gering sortierten Sedimenten mit polymodaler Korngrößenverteilung lassen auf multiple Transportprozesse geringer Uniformität schließen (SCHIRRMEISTER et al. 2003a, SCHWAMBORN 2004). Über die Entstehung des IC gibt es vielfältige Theorien, die von fluvialen, alluvialen, lakustrinen, äolischen bis hin zu kryogenetischen oder eisgestaut-alluvialen Sedimentationsbedingungen reichen (Überblick in: SCHIRRMEISTER et al. 2003a, WETTERICH et al. 2008). SCHWAMBORN et al. (2002) favourisiert eine periglaziale polygenetische Akkumulation mit Materiallieferung aus lokalen Abflüssen des Chekanovsky-Gebirgszugs, die durch multiple Ab- und Umlagerungsprozesse verändert wurden. SCHIRRMEISTER et al. (2003a) charakterisieren sie als eisreiche Ablagerung, die durch alluviale und nival-äolische Einträge entstanden. Verschiedene Autoren unterscheiden im IC zwei Komplexe (u.a. WETTERICH et al. 2008). Da GALABALA 1987 die Fortsetzung der sandigen Sequenzen der zweiten Terrasse unter dem IC vermutet, stuft er den IC jünger ein. Er gliedert ihn in die alluviale, eiskeilreiche Aryniskaya (Kargin) und die heterogene Khardangskaya Folge (Kargin-Sartan). Mittels zahlreicher <sup>14</sup>C-Datierungen wurde der Hauptteil der IC-Ablagerungen zwischen 50 – 33 ka BP dem relativ warmen und feuchten Kargin-Interstadial (50 – 22 ka BP, Q<sub>III</sub><sup>3</sup>) zugeordnet. Es korreliert mit dem Marinen Isotopenstadium 3 (MIS 3) (WETTERICH et al. 2008). Die Ablagerung des oberen Abschnitts bis ca. 13 ka BP rechnet man dem extrem kalten und trockenen Sartan-Stadial (22 – 10 ka BP, Q<sub>III</sub><sup>4</sup>, MIS 2) zu (SCHWAMBORN et al. 2002a, SCHIRRMEISTER et al. 2003a, SHER et al. 2005)

Die dritte Terrasse kann anhand eines beachtlichen Höhenunterschiedes (> 20 m) weiter in zwei „Sub-Terrassen“, dem Ost- (-8 bis -10 m ü.d.M.) bzw. West-Sektor (10 bis 28 m ü.d.M.), differenziert werden. Er gilt als Indiz für eine tektonische Grenze entlang dem Tumatskaya Kanal (PAVLOVA & DOROZHINA 2000). Im Kapitel Untersuchungs-Profile werden repräsentativ die Nagym-Sektion im Westen (vgl. Kap. 2.3.1) und die Kurungnakh-Sektion im Osten (vgl. Kap. 2.3.2) vorgestellt. Zwischen diesen gelegen wird zusätzlich die Khardang-Sektion (vgl. Kap. 2.3.3) untersucht.

## **2.2.2 Ablagerungen der zweiten Terrasse**

Die sandigen Inseln im Nordwesten des Deltas werden als sogenannter Arga-Komplex zusammengefasst, benannt nach der Insel Arga-Sise, die den größten Anteil der zweiten Terrasse (20 – 30 ü.d.M) ausmacht (ARE & REIMNITZ 2000), aber auch kleinere Inseln wie Turakh-Sise mit einschließt. Sie werden als Erosionsrelikte angesehen, die sich unterscheiden von den anderen Terrassenebenen besonders markant in der Oberflächenmorphologie mit den zahlreichen orientierten Thermokarstseen bzw. -depressionen (PAVLOVA & DOROZHINA

2001). Der Arga-Komplex besteht hauptsächlich aus gut sortierten, organikarmen, feinsandigen Sequenzen, die häufig von Eiskeilen durchdrungen werden. Die Sande, deren Eisgehalt i.d.R. niedrig (< 25 Gew.-%) ist, durchzieht ein Netz aus engstehenden Eisadern (SCHWAMBORN 2004). Über die Genese und das Alter der zweiten Terrasse gibt es sehr unterschiedliche Auffassungen (Überblick in: PAVLOVA & DOROZHINA 2001). Im Vergleich mit rezenten Flussbettablagerungen sind sedimentologische und mineralogische Ähnlichkeiten zu erkennen (Lena-River-Signal). Die Armut an Schluff, Ton und organischem Material deutet auf ein hoch energetisches Kanalnetzwerk eines verwilderten Flussystems hin (SCHWAMBORN et al. 1999, 2002a). Die Bündelung der fluvialen Energie wird verursacht von der „Lena Pipe“, der engen Passage zwischen Chekanovsy- und Kharaulakh-Gebirgskette. Beim Austritt der Lena in die Tieflandebene nimmt diese schlagartig ab und sedimentiert flachlagernde, schwemmfächerähnliche, strukturlose Schichten (SCHWAMBORN et al. 2002a). GALABALA 1987 stellt eine ähnliche Zusammensetzung der Sande wie die sogenannten Bestyakh-Sedimenten fest. Er hält sie für älter als den Eiskomplex und parallelisiert sie mit den diesen unterlagernden Sandsequenzen der dritten Terrasse. Er unterscheidet die obere ca. 15 – 20 m mächtige Turakhskaya-Folge (Zyryan) mit inhomogener Textur, Eiskeilen, Pflanzen- und Torfreste sowie die untere Muorinskaya-Folge (Kazantsev und älter, vgl. Tab. 1) mit homogenen, organikarmen Sanden in deltatypischer horizontaler bis leicht schräger Schichtung. Die deutlich jüngeren <sup>14</sup>C - und IR-OSL-Alter stufen die Sande der zweiten Terrasse dagegen ins Sartan (Arga Sektion) bis Frühholozän (Jeppiries Sektion) ein. Die Alter sind nicht in korrekter chronologischer Abfolge, weisen aber sich überlappende Fehlerbereiche auf, die vermutlich aus hohen Akkumulationsraten in einer hochenergetischen fluvialen Abflussdynamik mit tektonischem Einfluss resultieren (KRBETSCHKEK et al. 2002, SCHWAMBORN et al. 2002a). Begleitet wird sie von ausgesprochener äolischer Aktivität (GALABALA 1997, ARE & REIMNITZ 2002). Die hohe Abflussenergie scheint mit klimatischen Veränderungen im Einzugsgebiet dem niedrigeren Meeresspiegel einherzugehen, dessen Paläoküstenlinie über 150 km weiter im Norden lag (SCHWAMBORN et al. 2002a). ROMANOVSKII et al. (2004) sprechen sogar von einer Küstenverlagerung der letzten 11 ka um 300 – 800 km. Das heutige Meeresspiegelniveau ist etwa 5 – 6 ka BP erreicht, weshalb die Sedimentation unter den Bedingungen der nacheiszeitlichen Transgression (ab ca. 15 ka BP) gesehen wird (SCHWAMBORN et al. 2002a). Sauerstoffisotopenmessungen und die weite Verbreitung mächtiger Sandablagerungen in den Tiefländern des Lena-Einzugsgebietes sprechen für den Beitrag größerer enteisungsbedingter Schmelzwasserereignisse mit einem maximalem Abfluss um 13 ka BP (MEYER 2003, SCHWAMBORN et al. 2002a). Mit dem Übergang zum Holozän wird der Westsektor des Deltas in fluvialer Hinsicht zunehmend inaktiv. Als ursächlich gilt die relative Hebung des Westdeltas bzw. Senkung des Ost-Sektors an der tektonischen Bruchzone entlang des Tumatskaya-Kanals mit. Die Hauptentwässerung und –sedimentation verlagert sich nach Osten (SCHWAMBORN et al. 2002a). Der Beginn der Thermokarstprozesse wurde über <sup>14</sup>C-Datierungen der subaerischen und limnischen Ablagerungen in den resultierenden Depressionen auf < 9 ka BP bestimmt (SCHWAMBORN et al. 2002b). Stellvertretend für die Ablagerungen der zweiten Terrasse wurde ein Profil auf Turakh-Insel untersucht (Kap. 2.3.4).

**Tab. 1: Zusammenfassung der Altersvorstellungen zum westlichen Lena-Delta**

	3. Terrasse		2. Terrasse	
	u. Sande	IC	u. Sande	o. Sande
GALABALA 1987	bis Zyryan	(jünger)	bis Kazantsev	Zyryan
KRBETSCHKEK et al. 2002	Zyryan			Sartan
SCHWAMBORN et al. 2002a	Zyryan	Kargin		Sartan
SCHIRRMEISTER et al. 2003a	Zyryan	Kargin		

## 2.3 Untersuchungs-Profile

### 2.3.1 Nagym-Sektion (dritte Terrasse)

Das Profil **LD98-D6** (Nagym) liegt am Olenyok-Kanal auf der Insel Ebe-Basyn-Sise im Westdelta bei 72° 52,812' N und 123° 12,5' E und wurde während der russisch-deutschen Lena-Delta-Expedition 1998 (SCHWAMBORN et al. 1999) und 2000 (72°52,76' N und 123°19,33' E) beschrieben (SCHIRRMEISTER et al. 2001). Die Ergebnisse der Untersuchungen an der Nagym-Sektion wurden in KRBETSCHKEK et al. (2002), SCHWAMBORN et al. (2002) und SCHIRRMEISTER et al. (2003) veröffentlicht.

Die Nagym-Sektion wird von der für die dritte Terrasse charakteristischen Folge aus den unteren sandigen Sequenzen überlagert vom Eiskomplex (IC) aufgebaut (Abb. 6). Die unteren Sande reichen etwa von 3 - 11 m ü.d.M. und werden weiter in zwei Subeinheiten unterteilt. Der untere Bereich ist dominiert von welliger Lagerung fein- bis mittelkörniger Sande. In zwischengeschalteten Schichten sind Pflanzenreste bzw. Wurzelhorizonte und torfige Sande enthalten. Der obere Bereich besteht aus geschichtetem, feinkörnig bis schluffigem Sand mit einzelnen Zwischenlagen aus mittelkörnigem Sand und Kies. Obwohl Wurzelhorizonte auftreten ist der Anteil an Pflanzenresten generell geringer als in den liegenden Schichten. Der Eisgehalt ist allgemein niedrig (ca. 20 – 37 Gew.-%). Nur einzelne kleine Eiskeile wurden beobachtet (KRBETSCHKEK et al. 2002, SCHWAMBORN et al. 2002a, SCHIRRMEISTER et al. 2001, 2003). An der Grenze zum hangenden IC tritt an verschiedenen Stellen ca. 13 – 15 m a.r.l. ein bräunlich-grauer, kryoturbiertes, torfiger Paläoboden auf (ca. 0,5 – 1 m mächtig) (SCHIRRMEISTER et al. 2001, 2003). Der IC nimmt den Bereich von ca. 11 bis max. 30 m ü.d.M. ein. Er besteht aus organikreichen, fein- bis mittelkörnigen bzw. schluffigen Sanden mit Torfeinschlüssen sowie –linsen, Paläoböden und hohem gravimetrischen Eisgehalt von 60 – 380 % relative zum Probengewichts, Eisbändern ( 2 – 5 cm dick) und linsenähnlichen Eisformen. Häufig treten große syngenetische Eiskeile auf, die am oberen Ende eine Weite von 3 – 5 m erreichen und mit einer verjüngten Wurzel einige Meter in die unteren Sande hineinreichen können (SCHWAMBORN et al. 2002a, SCHIRRMEISTER et al. 2001, 2003).

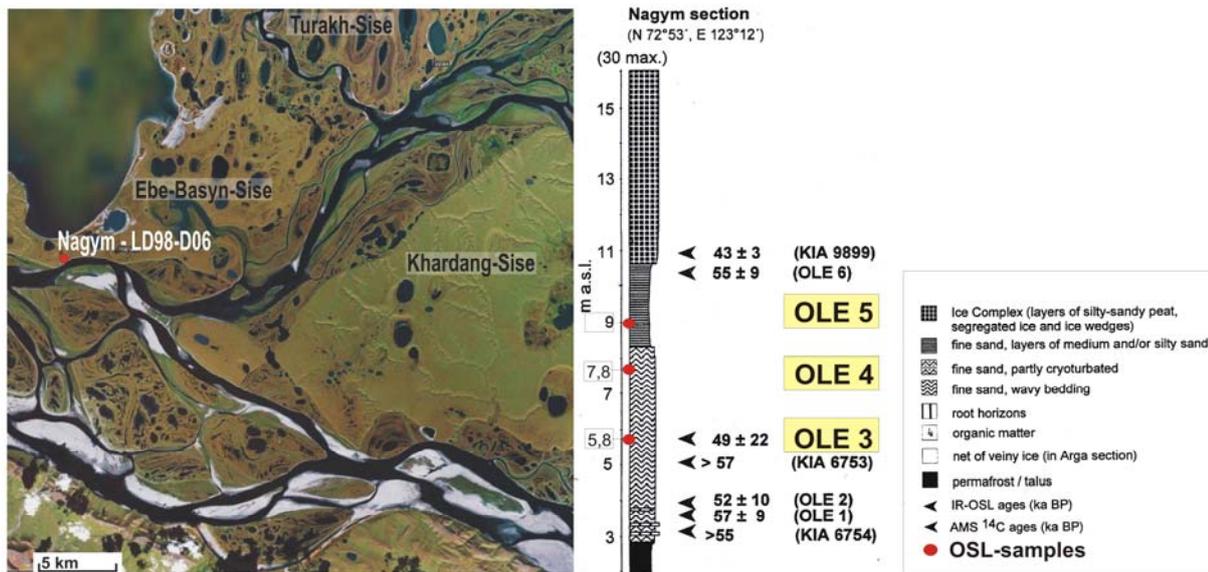


Abb. 6: Lage und stratigraphische Einheiten der Kurungnakh-Sektion (nach: SCHWAMBORN et al. 2002a, KRBETSCHEK et al. 2002, SCHIRRMEISTER et al. 2003a, Kartengrundlage bearbeitet nach: Google-Maps)

Zur Altersbestimmung wurden Proben für Radiokarbon- und IR-OSL-Untersuchungen im Zuge der Expedition 1998 genommen (SCHWAMBORN et al. 1999). Zusätzlich stehen  $^{14}\text{C}$  – Analysen von Proben der Lena-Delta-Expedition 2000 zur Verfügung (SCHIRRMEISTER et al. 2003a), die aber wegen einer Höhendifferenz der Grenze IC – untere Sande von ca. 10 m nicht direkt übertragen werden können (vgl. Tab. 2). Die Radionuklidalter wurden mittels beschleunigter Massenspektrometrie (AMS) vom Leibnitz-Labor für Altersbestimmung und Isotopenforschung der Universität Kiel bestimmt. Sämtliche AMS-Alter liegen unkalibriert vor (SCHIRRMEISTER et al. 2003a). Die IR-OSL-Untersuchungen wurden von der Sächsischen Akademie der Wissenschaften zu Leipzig Arbeitsstelle Geochronologie in Freiberg unter Verwendung der multiple-aliquot additive-dose Methode an Kalium-Feldspat durchgeführt.

Die  $^{14}\text{C}$  (AMS)-Datierungen der Sandsequenzen liegen nahe der oberen Altersgrenze dieser Methode. Sie deuten auf Alter der untersten Sande von  $> 57$  ka BP und  $> 55$  ka BP. Besser konnte die Basis des IC mit  $43 \pm 3$  ka BP bestimmt werden (SCHWAMBORN et al. 2002a). Die neueren Datierungen nach SCHIRRMEISTER et al. (2003) geben einen ähnlichen Altersbereich von  $53 \pm 3.9 / - 2.6$  ka BP nahe der Basis der Sande und  $> 54$  ka BP nahe der oberen Grenze zum IC an. Die IR-OSL-Untersuchungen zeigen für die Sandsequenzen vergleichbare Alter zwischen 57 ka BP und 49 ka BP. Nur unter Berücksichtigung der Fehlerbereiche, die sich gegenseitig überlappen, kann eine chronologische Altersfolge mit geringer Altersspanne angenommen werden. Auffällig ist dabei OLE 3 mit einem enormen Fehler und dem niedrigsten IR-OSL-Alter. Eine genauere Altersauflösung erreicht nicht möglich und die Ablagerung wird am wahrscheinlichsten zwischen 65 – 50 ka BP vermutet (KRBETSCHEK et al. 2002). Die IC-Basis wird nach SCHWAMBORN et al. (2002) mit  $43 \pm 3$  ka BP datiert. Der Paläoboden zwischen den Sanden und dem IC lässt sich auf  $44 \pm 2$  ka BP festlegen (SCHIRRMEISTER et al. 2003a). Die Datierungen der hangenden Bereiche des IC zeigen beide inverse Alter von  $> 48$  ka BP und  $> 46$  ka BP. Die Alter holozäner Ablagerungen, die an einigen Stellen über dem IC als kryoturbierte schluffige, 1 – 3 m

mächtige Sande mit torfien Einschlüssen anstehen, betragen  $4,82 \pm 0,04$  ka BP (SCHIRRMEISTER et al. 2003a).

**Tab. 2: Übersicht bisheriger Datierungsergebnisse der Nagym-Sektion**

Profil	LD98-D6, Nagym-Sektion, Lena-Delta Expedition 1998 72° 52,812' N; 123° 12,5' E				
Probe	Höhe m ü.d.M	Stratigraphie	Methode	Alter ka BP	Referenz
KIA 9898	14,0	IC	AMS	> 47,5	Schwamborn et al. 2002a
KIA 9899	11,0	IC-Basis	AMS	$42,9 \pm 3,1$	Schwamborn et al. 2002a
OLE 6	10,3	geschichtete Sande	IR-OSL	$55,0 \pm 9,0$	Krbetschek et al. 2002
OLE 3	5,8	welliger Sand	IR-OSL	$49,0 \pm 22,0$	Krbetschek et al. 2002
KIA 6753	5,1	welliger Sand	AMS	> 56,8	Schwamborn et al. 2002a
OLE 2	4,0	welliger Sand	IR-OSL	$52,0 \pm 10,0$	Krbetschek et al. 2002
OLE 1	3,4	welliger Sand	IR-OSL	$57,0 \pm 9,0$	Krbetschek et al. 2002
KIA 6764	3,1	welliger Sand	AMS	> 54,5	Schwamborn et al. 2002a

Profil	Sektion A, Nagym, Ebe-Basyn-Sise, Lena-Delta Expedition 2000 72° 52,76' N; 123° 19,33' E				
Probe	Höhe m ü.d.M	Stratigraphie	Methode	Alter ka BP	Referenz
KIA 12586	21,0	holozän	AMS	$4,8 \pm 0,04$	Schirrmeister et al. 2003a
KI 4938	22,0	IC	Conv. $^{14}\text{C}$	> 45,6	Schirrmeister et al. 2003a
KIA 12584	21,2	Paläoboden	AMS	$44,2 \pm 1,0$	Schirrmeister et al. 2003a
KIA 12585	16,5	obere Sandeinheit	AMS	> 54,5	Schirrmeister et al. 2003a
KIA 12583	1,6	untere Sandeinheit	AMS	$53,0 \pm 3,5$	Schirrmeister et al. 2003a

Einige der 1998 genommenen IR-OSL Proben konnten nicht datiert werden. Dabei fällt auf, dass IR-OSL-Alter in Sedimenten am Olenyok-Kanal im Vergleich zu den Arga-Sanden allgemein höhere Fehler aufweisen. Sie gelten als Resultat schlechter Bleichung und könnten mit einer wahrscheinlich kürzeren Transportstrecke und einhergehend kürzeren Lichtexposition begründet werden. Ole 5 besitzt zusätzlich einen zu geringen Kalium-Feldspat-Gehalt für eine Datierung. (KRBETSCHEK et al. 2002). Daher sollen die Proben OLE 3 (5,8 m ü.d.M.), OLE 4 (7,8 m ü.d.M.) und OLE 5 (9,0 m ü.d.M.) in dieser Arbeit mittels OSL und verschiedenen statistischen Ansätzen untersucht werden (Tab. 3).

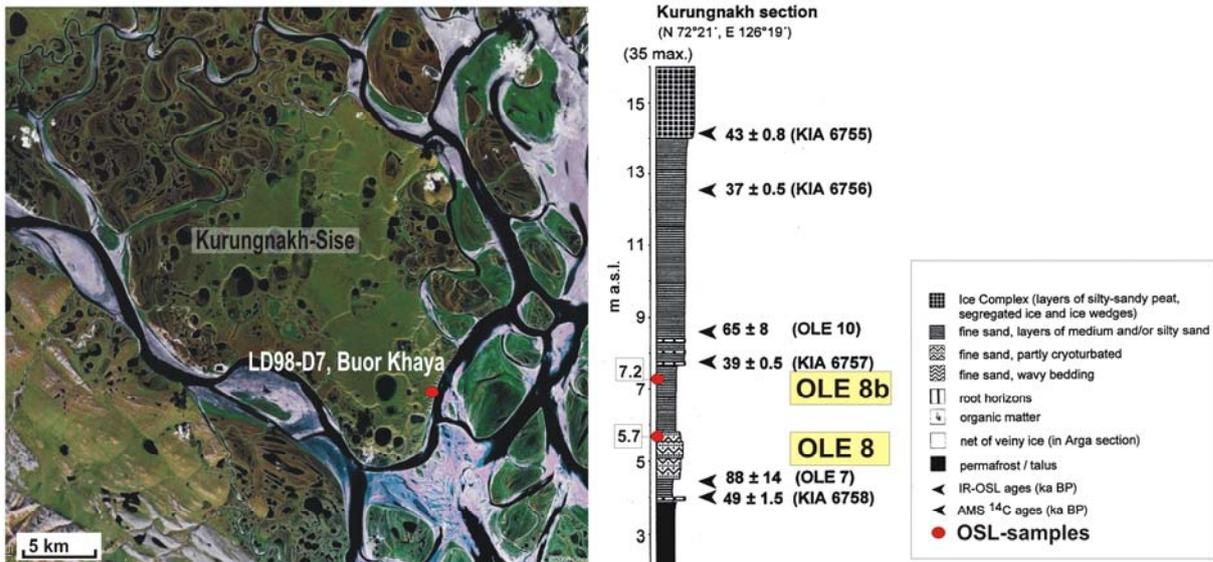
**Tab. 3: OSL-Proben der Nagym-Sektion** (nach: KRBETSCHKE et al. 2002)

Profil	LD98-D6, Nagym-Sektion, Lena-Delta Expedition 1998 72° 52,812' N; 123° 12,5' E			
Probe	Höhe m ü.d.M	Tiefe m u. GOF	Lithologie	Kollektor
OLE 5	9,0	21,0	Feinsand, mittlere - schluffige Sandlagen	M. Krbetschek
OLE 4	7,8	22,2	Feinsand, wellige Lagerung	M. Krbetschek
OLE 3	5,8	24,2	Feinsand, wellige Lagerung	M. Krbetschek

### 2.3.2 Kurungnakh-Sektion (dritte Terrasse)

Weiter im Osten ebenfalls am Olenyok Kanal auf der Kurungnakh Insel wurde das Profil **LD98-D7** (Sektion B, Buor Khaya) bei 72°20,711' N und 126°18,748' E während der russisch-deutschen Lena-Delta-Expedition 1998 und erneut 2000 (4 Teilprofile, 72° 20,00' – 72° 21,03' N und 126° 17,26 – 126° 19,26' E) sowie 2001 untersucht (SCHWAMBORN et al. 1999, 2002, SCHIRRMEISTER et al. 2001, 2003, PFEIFFER et al. 2002). Ergebnisse der Expedition 2002 (KUZMINA et al. 2003) sind bei WETTERICH et al. (2008) veröffentlicht.

Die Lithofazies ähnelt stark den in Kap. 2.3.1 beschriebenen Sedimenteinheiten der Nagym-Sektion. Es treten die für die dritte Terrasse typischen Sandsequenzen, lokal als Bulukurskaya-Folge bezeichnet, überlagert vom IC auf, der synonym auch Kobakh- oder Yedomas-Folge genannt wird (KUZMINA et al. 2003). Die untersten Sandsequenzen werden als alternierende Lagen von gut sortierten, mittelkörnigen Sanden und wenig sortierten, schluffigen Sanden mit einzelnen Schlufflagen beschrieben. Die Wechsellagerung reflektiert alternierende Strömungsgeschwindigkeiten unter Flachwasserbedingungen (WETTERICH et al. 2008). Vor allem im untersten Bereich sind zahlreiche Wurzelhorizonte enthalten (Abb. 7). Der obere Bereich der Sandeinheit besteht aus homogenen, fein laminierten mittelkörnigen Sanden. Die Gehalte an organischem Material sind gering (KUZMINA et al. 2003). Der Eisgehalt liegt bei ca. 25 Gew.-%. Größere Eiskeile (ca. 20 m lang und 5 – 7 m weit) reichen mit an der Faziesgrenze stark verjüngten Wurzeln aus dem hangenden, etwa 15 m mächtigen IC in den oberen Bereich der Sandeinheit hinein. An der Grenze zum IC ist ein ca. 1 m mächtiger, kryoturbiertes Paläoboden entwickelt. Im IC variiert der Eisgehalt zwischen 24 und 150 Gew.-%. Eine oberere IC-Einheit konnte gegenüber der unteren anhand von einem größeren Sand- und geringerem Pflanzenrestanteil sowie dem Fehlen von Torfeinschlüssen abgegrenzt werden. Über dem IC treten lokal Thermokarstdepressionen mit Sedimentfüllungen auf (SCHIRRMEISTER et al. 2001, 2003, WETTERICH et al. 2008).



**Abb. 7: Lage und stratigraphische Einheiten der Kurungnakh-Sektion** (nach: SCHWAMBORN et al. 2002a, KRBETSCHKEK et al. 2002, SCHIRRMEISTER et al. 2003a, Kartengrundlage bearbeitet nach: Google-Maps)

Ergebnisse der Altersbestimmungen mittels Radiokarbon-, IR-OSL- und  $^{230}\text{Th}/\text{U}$ -Untersuchungen an Proben der Lena-Delta Expeditionen 1998, 2000 und 2002 stehen zur Verfügung (vgl. Tab. 4). Das Alter der unteren sandigen Einheit wurde mittels  $^{14}\text{C}$  auf  $49 \pm 1,5$  ka BP (unterster Bereich) bis  $37 \pm 0,5$  ka BP (oberer Bereich) datiert. Für die Basis des hangenden IC wurde dagegen ein Alter von  $43 \pm 0,8$  ka BP ermittelt, welches im Widerspruch zu den liegenden jüngeren Proben steht (KRBETSCHKEK et al. 2002, SCHWAMBORN et al. 2002). Weitere  $^{14}\text{C}$ -Ergebnisse aus der Expedition 2000 werden von SCHIRRMEISTER et al. (2003) vorgestellt. Diesem zufolge ist der obere Teil der Sandsequenz  $> 51,7$  ka BP alt, also deutlich älter als zuvor bestimmt. Auch der Torfeinschluss eines kryptoturbierten Paläobodens an der IC-Basis liegt mit  $50,1 \pm 2,5$  ka BP in diesem älteren Altersbereich. Die IR-OSL-Untersuchungen der sandigen Einheit unterstützen die älteren  $^{14}\text{C}$ -Alter und liegen zwischen  $88 \pm 14$  ka BP und  $65 \pm 8$  ka BP und datieren damit den mittleren und unteren Bereich der Sandeinheit. Danach wird vermutet, dass die Ablagerung etwa von 100 – 60 ka BP stattfand (KRBETSCHKEK et al. 2002). Eine nur partielle Bleichung mit einhergehender Altersüberschätzung ist möglich. Die Diskrepanz zu den jüngeren  $^{14}\text{C}$ -Altern scheint aber eher in einer Kontamination des Probenmaterials mit jüngeren Kohlenstoff begründet zu liegen. Im Vergleich zur Nagym-Sektion ist hier die Basis der unteren Sandsequenz möglicherweise älter (KRBETSCHKEK et al. 2002). Die  $^{230}\text{Th}/\text{U}$ -Alter aus torfigen Schichten der untersten Sandeinheit ergaben  $107 \pm 3$  ka BP und  $95 \pm 4$  ka BP (WETTERICH et al. 2008) und sind vergleichbar mit  $^{230}\text{Th}/\text{U}$ -Altern vom Anrynsky-Kanal im westlichen Lena-Delta von  $113 \pm 14$  ka BP (SCHIRRMEISTER et al. 2003a).

Der IC bildete sich nach den  $^{14}\text{C}$ -Analysen wahrscheinlich zwischen  $50,1 \pm 2,8$  ka BP und  $17,0 \pm 0,1$  ka BP und wird von holozänen Ablagerungen (ca. 7,8 ka BP) abgedeckt. Diese Thermokarst-Ablagerungen wurden auf 7,6 ka BP und 8,6 ka BP datiert (SCHIRRMEISTER et al. 2003a). Die  $^{14}\text{C}$ -Alter der Expedition 2002 datieren die Basis der IC deutlich jünger auf ca.

41 ka BP. Insgesamt zeigt aber sich eine gute Übereinstimmung zu den  $^{14}\text{C}$ -Altern von SCHIRRMEISTER et al. (2003). Nur die beiden obersten KIA-Proben von 2002, die noch dem IC zugeordnet wurden, sind wesentlich jünger (8,3 – 8,6 ka BP). Aus der Kombination beider Datensätze zeichnen sich 2 „Lücken“ ab bei etwa 32 – 17 ka BP und 17 – 8 ka BP (WETTERICH et al. 2008).

**Tab. 4: Übersicht bisheriger Datierungsergebnisse der Kurungnakh-Sektion**

Profil	LD98-D7, Kurungnakh -Sektion, Lena-Delta Expedition 1998 72° 20,711' N, 126° 18,748' E				
Probe	Höhe m ü.d.M	Stratigraphie	Methode	Alter ka BP	Referenz
KIA 6755	14,0	IC - Basis	AMS	42,9 ± 0,8	Schwamborn et al. 2002a
KIA 6756	12,5	geschichtete Sande	AMS	37,2 ± 0,5	Schwamborn et al. 2002a
OLE 10	8,9	geschichtete Sande	IR-OSL	65,0 ± 8,0	Krbetschek et al. 2002
KIA 6757	7,7	untere Sande	AMS	39,4 ± 0,5	Schwamborn et al. 2002a
OLE 7	4,5	untere Sande	IR-OSL	88,0 ± 14,0	Krbetschek et al. 2002
KIA 6758	4,0	untere Sande	AMS	49,4 ± 1,5	Schwamborn et al. 2002a

Profil	Sektion B, Buor Khaya, Kurungnakh-Sise, Lena-Delta Expedition 2000 72° 20,00' – 72° 21,03' N, 126° 17,26' – 126° 19,26' E				
Probe	Höhe m ü.d.M	Stratigraphie	Methode	Alter ka BP	Referenz
KIA 12596	34,0	holozäne Torflinse	AMS	7,7 ± 0,04	Schirrmeister et al. 2003a
KI 4939.02	34,0	Thermokarst	Conv. $^{14}\text{C}$	7,6 ± 0,05	Schirrmeister et al. 2003a
KI 4939.01	33,0	Thermokarst	Conv. $^{14}\text{C}$	7,8 ± 0,04	Schirrmeister et al. 2003a
KI 4939.03	~ 30	Thermokarst	Conv. $^{14}\text{C}$	8,3 ± 0,07	Schirrmeister et al. 2003a
KI 4939.04	~ 30	Thermokarst	Conv. $^{14}\text{C}$	8,6 ± 0,07	Schirrmeister et al. 2003a
KIA 12595	31,0	IC	AMS	17,0 ± 0,09	Schirrmeister et al. 2003a
KIA 12594	28,5	IC, Torf	AMS	33,5 ± 0,4	Schirrmeister et al. 2003a
KIA 12593	24,0	IC, Torf	AMS	38,0 ± 0,5	Schirrmeister et al. 2003a
KIA 12592	21,0	IC, Torf	AMS	44,5 ± 1,5	Schirrmeister et al. 2003a
GIN 110883	20,0	IC	Conv. $^{14}\text{C}$	34,3 ± 0,5	Schirrmeister et al. 2003a
KIA 12591	15,9	IC, Torfeinschluss	AMS	50,1 ± 2,8	Schirrmeister et al. 2003a
KIA 12587	20,1	untere Sandeinheit	AMS	> 51,7	Schirrmeister et al. 2003a
KIA 12590	15,2	(umgelagert)	AMS	16,7 ± 0,08	Schirrmeister et al. 2003a
KIA 12589	7,0	untere Sandeinheit	AMS	> 57,2	Schirrmeister et al. 2003a
KIA 12588	4,4	untere Sandeinheit	AMS	> 52,1	Schirrmeister et al. 2003a
Bkh2 U/Th-2	3,7	unterste Sande, Torf	$^{230}\text{Th}/\text{U}$	95,0 ± 4,0	Wetterich et al. 2008
Bkh2 U/Th-1	3,3	unterste Sande, Torf	$^{230}\text{Th}/\text{U}$	107,0 ± 3,0	Wetterich et al. 2008

<b>Profil</b>	<b>Buor Khaya, outcrops, Kurungnakh-Sise, Lena-Delta Expedition 2002</b> 72° 20,00' N, 126° 18' E				
<b>Probe</b>	<b>Höhe</b> m ü.d.M	<b>Stratigraphie</b>	<b>Methode</b>	<b>Alter</b> ka BP	<b>Referenz</b>
KIA 31046	35,0	Thermokarst	AMS	2,8 ± 0,03	Wetterich et al. 2008
KIA 31047	34,0	Thermokarst	AMS	5,9 ± 0,04	Wetterich et al. 2008
KIA 31048	33,2	IC (obere Einheit)	AMS	8,2 ± 0,05	Wetterich et al. 2008
KIA 31049	32,5	IC (obere Einheit)	AMS	8,1 ± 0,03	Wetterich et al. 2008
KIA 30235	31,7	IC (obere Einheit)	AMS	16,9 ± 0,07	Wetterich et al. 2008
KIA 31050	31,0	IC (obere Einheit)	AMS	17,2 ± 0,08	Wetterich et al. 2008
KIA 31051	30,0	(umgelagert)	AMS	0,7 ± 0,03	Wetterich et al. 2008
KIA 30236	29,2	IC (untere Einheit)	AMS	32,9 ± 0,3	Wetterich et al. 2008
KIA 30237	29,0	IC (untere Einheit)	AMS	32,0 ± 0,4	Wetterich et al. 2008
KIA 30238	26,3	IC (untere Einheit)	AMS	34,8 ± 0,4	Wetterich et al. 2008
KIA 30240	24,0	IC (untere Einheit)	AMS	40,4 ± 0,6	Wetterich et al. 2008
KIA 30239	23,0	IC (untere Einheit)	AMS	40,0 ± 0,7	Wetterich et al. 2008
KIA 30241	19,8	IC (untere Einheit)	AMS	41,2 ± 1,3	Wetterich et al. 2008
KIA 31052	17,9	IC (untere Basis)	AMS	41,3 ± 2,0	Wetterich et al. 2008

Da die IR-OSL-Untersuchungen einzelner Proben problematisch war (vgl. Nagym-Sektion), sollen die Proben Ole 8 (5,7 m ü.d.M.) und Ole 8b (7,2 m ü.d.M.) mittels OSL erneut analysiert werden (Tab. 5).

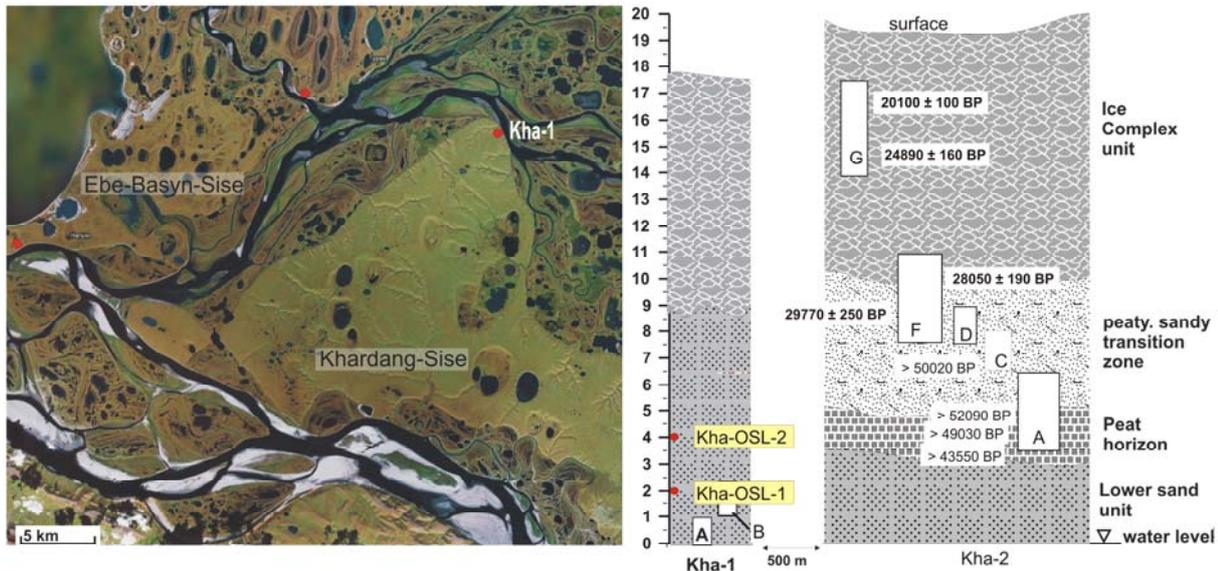
**Tab. 5: OSL-Proben der Kurungnakh-Sektion** (nach: KRBETSCHKEK et al. 2002)

<b>Profil</b>	<b>LD98-D7, Kurungnakh-Sektion, Lena-Delta Expedition 1998</b> 72° 20,711' N, 126° 18,748' E			
<b>Probe</b>	<b>Höhe</b> m ü.d.M	<b>Tiefe</b> m u. GOF	<b>Lithologie</b>	<b>Kollektor</b>
OLE 8b	7,2	27,8	Feinsand, mittelkörn. - schluffige Sandlagen	M. Krbetschek
OLE 8	5,7	29,3	Feinsand, z.T. krypturbiert	M. Krbetschek

### 2.3.3 Khardang-Sektion (dritte Terrasse)

Am NW-Ufer der Insel Khardang am Arynskaya-Kanal wurde ein komplexer Aufschluss der dritten Terrasse aufgebaut aus der unteren Sandeinheit und dem IC während der Lena-Delta Expedition 2005 untersucht (SCHIRRMEISTER et al. 2007). Die in dieser Arbeit analysierten Proben Kha-OSL-1 (2,0 m ü.d.M.) und Kha-OSL-2 (4,0 m ü.d.M.) stammen aus der unteren Sandeinheit repräsentiert durch das Subprofil Kha-1 bei 72° 57,00' N und 124° 12,48' E (Abb. 8 & Tab. 6). Die unteren Sandsequenzen stehen bis ca. 9 m ü.d.M. an und setzen sich vermutlich nach unten weiter fort. Sie zeigen einen Wechsel von horizontal-laminierten und

kreuzgeschichteten Abschnitten mittel- bis feinkörniger Sande mit schluffigen Zwischenlagen. Der relative Eisgehalt liegt bei 24 – 32 Gew.-%. Es treten Risse auf, die von kleinen Eiskristallen ausgefüllt werden (SCHIRRMUSTER et al. 2007, SCHIRRMUSTER 2008, persönl. Mitteilung). Die in den anderen Teilprofilen beobachteten Übergangszonen wurden in Kha-1 nicht eindeutig festgestellt (SCHIRRMUSTER 2008, persönl. Mitteilung).



**Abb. 8:** Lage und stratigraphische Einheiten der Khardang-Sektion (SCHIRRMUSTER et al. 2007, SCHIRRMUSTER 2008, persönl. Mitteilung; Kartengrundlage bearbeitet nach: Google-Maps)

Mehrere  $^{14}\text{C}$ -Alter liegen für das ca. 500 m entfernt gelegene Teilprofil Kha-2 im Bereich des IC und der Übergangszone zu den liegenden Sanden vor (SCHIRRMUSTER 2008, persönl. Mitteilung). Die torfige Schicht über der Sandsequenz konnte mit > 44 ka BP bis > 52 ka BP bestimmt werden. Trotz einer inersen Altersfolge liegen die Ergebnisse etwa im Bereich der für die IC-Basis an anderen Profilen der dritten Terrasse (vgl. Nagym- und Kurungnakh-Sektion) ermittelten Alter. Der obere Bereich der torfigen Übergangszone wird auf ca. 28 – 30 ka BP und der hangende IC auf ca. 20 – 25 ka BP datiert. Vergleichbare  $^{14}\text{C}$ -Altern ergaben Untersuchungen im Nordosten der Khardang Insel (Sektion D, Mys Khaya Kumaga) und auf der Dzhangylakh Insel am linken Ufer des Arynskaya-Abflusses (Sektion C, Sasyr) zwischen Nagym und Kurungnakh. Die Grenze vom IC zu den liegenden Sanden wurde auf etwa 50 – 53 ka BP (SCHIRRMUSTER et al. 2003a). Die Ergebnisse aus  $^{230}\text{Th}/\text{U}$ -Datierungen im Subprofil Kha-2 einer liegenden Torfschicht (5 Proben) liegen noch nicht vor (SCHIRRMUSTER et al. 2007).

Für die untere Sandeinheit gibt es noch keine direkten Altersbestimmungen des beschriebenen komplexen Aufschlusses. Die zwei Proben Kha-OSL-1 und Kha-OSL-2 stehen nun für OSL-Untersuchungen zur Verfügung (Tab. 6).

**Tab. 6: OSL-Proben der Khardang-Sektion** (nach: SCHIRRMEISTER et al. 2007)

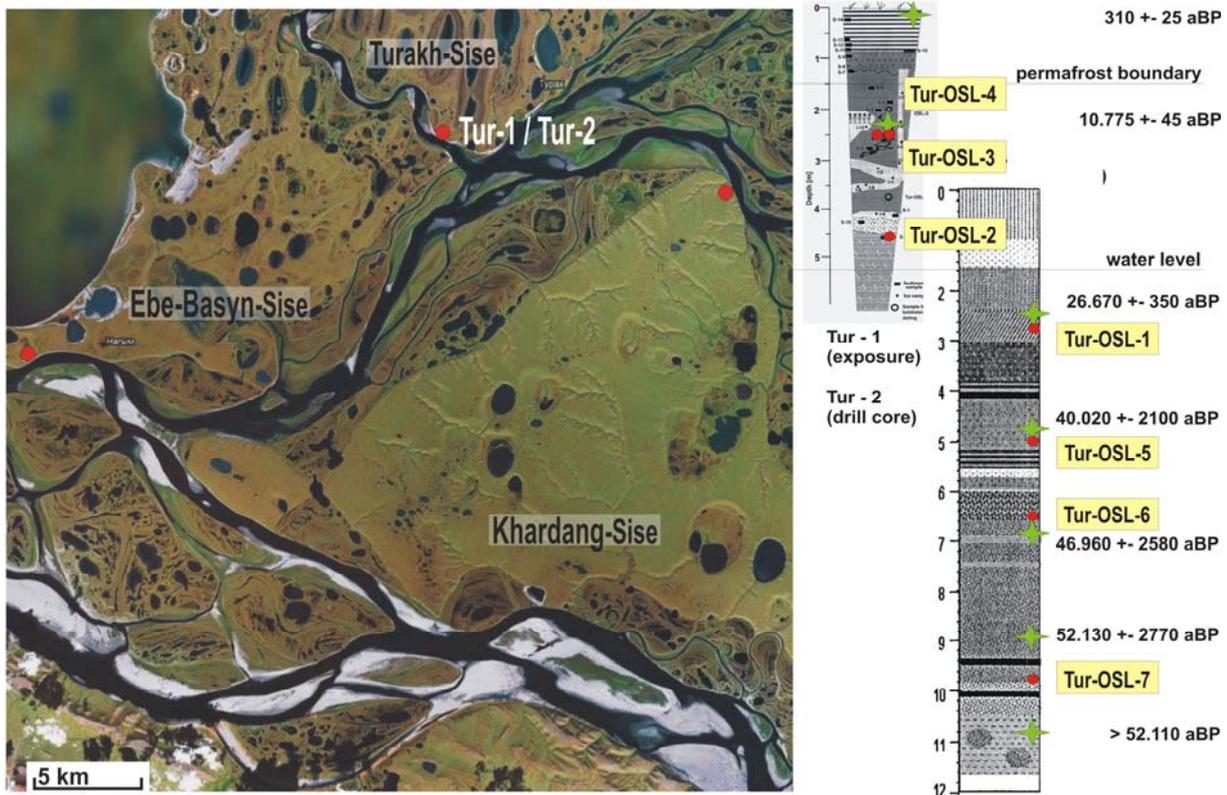
<b>Profil</b>	<b>Kha-1, Khardang-Sektion, Lena-Delta Expedition 2005</b> 72° 57,00' N, 124° 12,48' E			
<b>Probe</b>	<b>Höhe</b> m ü.d.M	<b>Tiefe</b> m u. GOF	<b>Lithologie</b>	<b>Kollektor</b>
Kha-OSL-2	4,0	16,0	untere Sande	L.Schirrmeister
Kha-OSL-1	2,0	18,0	untere Sande	L.Schirrmeister

### 2.3.4 Turakh-Sektion (2. Terrasse)

Auf der Insel Turakh am Ausfluss eines orientierten Sees in den Arynskaya-Kanal stehen Sande des Arga-Komplexes an. Diese wurden im Aufschluss **Tur-1** bei 72° 58,44' N und 123° 47,91' E sowie anhand des Bohrkerns **Tur-2** direkt neben dem Aufschluss während der Lena-Delta Expedition 2005 untersucht und beprobt (SCHIRRMEISTER et al. 2007).

Der Aufschluss **Tur-1** ist 4,5 m mächtig und die Permafrostgrenze steht ca. 1,5 m unter der Geländeoberfläche an (Abb. 9). Im untersten Bereich bis ca. 4,5 m Tiefe treten kreuzgeschichtete fein- bis mittelkörnige Sande auf, die überlagert werden feinkörnigen Sanden mit kleinen Eisschlieren. Zwischen ca. 4,25 und 1,25 m u.GOF werden bräunliche, eisreiche Sande beschrieben. Eisenoxid-Imprägnationen und Bänder von Humusanreicherungen deuten Bodenbildungsprozesse an. Horizontal und vertikal orientierte, bis hin zu gitterartigen Eisadern wurden beobachtet. Die obere Grenze dieser Schichte fällt in etwa mit der Permafrostgrenze im Profil zusammen. Hangend schließt sich zwischen ca. 1,3 bis 1,0 m Tiefe u.GOF eine Torfschicht an, die von einem etwa 20 cm mächtigen, feinlagigem Wechsel aus bräunlichen und grauen Schichten überdeckt wird. Den obersten Bereich bauen äolische Sande (Dünen) auf (SCHIRRMEISTER et al. 2007).

Von einer Geländeoberfläche bei ca. 1,5 m ü.d.M. wurde die 11,43 m tiefe Bohrung **Tur-2** durchgeführt. Der oberste Meter besteht aus Strandsand, unter dem sich ähnliche Strukturen wie im unteren Teil von Tur-1 fortsetzen. Eine vertikale Eisader wurde beobachtet. Zwischen etwa 1,5 und 5,8 m Tiefe treten geschichtete fein-, mittel- und grobkörnige Sande auf. Liegend unter einer 2. Eisader von etwa 5,9 m bis 9,8 m Tiefe treten Imprägnationen durch Eisenoxide auf sowie organikreiche Zwischenlagen mit Pflanzenresten. Bis etwa 10,3 m Tiefe zeigt sich eine glimmerhaltige Schicht. Den untersten Teil der Bohrung charakterisieren schwarze Einschlüsse, die wahrscheinlich Kohlefragmente darstellen (SCHIRRMEISTER et al. 2007).



**Abb. 9: Lage und stratigraphische Einheiten der Turakh-Sektion** (grüner Stern:  $^{14}\text{C}$ -Alter, roter Punkt: OSL-Proben, nach: SCHIRRMEISTER et al. 2007, SCHIRRMEISTER 2008, persönl. Mitteilung; Kartengrundlage bearbeitet nach: Google-Maps)

Die obersten Schichten über der Permafrostgrenze im Aufschluss Tur-1 wurden mittels  $^{14}\text{C}$ -Datierungen auf etwa 700 a BP und 300 a BP bestimmt (Tab. 7). Für den unteren gefrorenen Teil der Ablagerungen ergeben sich Alter von etwa 9 - 15 ka BP, wobei in 4 m Tiefe eine Altersinversion auftritt (SCHIRRMEISTER 2008, persönl. Mitteilung). Der Altersbereich korreliert relativ gut mit den IR-OSL-Ergebnissen der Arga-Sektion am Nikolaysee von 14,5 - 10,9 ka BP (KRBETSCHKE et al. 2002).

Die  $^{14}\text{C}$ -Alter im obersten Teil der Bohrung Tur-2 nehmen mit der Tiefe von 15 ka BP auf 27 ka BP zu, wobei sich ein relativ zu den anderen Proben erhöhtes Alter mit 29 ka BP etwa in 1 m Tiefe zeigt. Nach unten nehmen die Radiokarbonalter weiter chronologisch zu. Für den mittlere Bereich der Bohrung liegen bei 40 – 47 ka BP. Im untersten Bereich erreichen sie 52 ka BP in ca. 9 m Tiefe und > 52 ka BP in ca. 11 m Tiefe (SCHIRRMEISTER 2008, persönl. Mitteilung).

**Tab. 7: Radiokarbonalter der Turakh-Sektion (Tur-1 und Tur-2)**

(nach: SCHIRRMEISTER et al. 2007, SCHIRRMEISTER 2008, persönl. Mitteilung)

Probe	Höhe (m ü.d.M.)	Tiefe (m)	Lithologie	Methode	Alter (a BP)
Tur-1-14	5,2	0,2	Feinsand, Dünen	AMS	310 + 25 / - 20
Tur-1-10	4,4	1,0	Treibholz	AMS	695 ± 35
Tur-1-5	3,6	1,8	Sand, feinkörnig	AMS	9.105 ± 50
Tur-1-3	2,9	2,5	Torfeinschluss	AMS	10.775 ± 45
Tur-1-1	1,4	4,0	Sand, strukturlos	AMS	6.630 ± 70
Tur-1-16	0,9	4,5	Wechsel Fein- / Mittel- sand, Kreuzschichtung	AMS	15.390 + 150 / - 140
Tur-2-1	0,5	1,0	Feinsand, vgl. Tur-1	AMS	29.280 + 610 / - 560
Tur-2-3	0,2	1,3	Feinsand	AMS	15.510 + 190 / - 180
Tur-2-5	0,1	1,5	Feinsand	AMS	15.980 + 300 / - 280
Tur-2-9	- 0,4	1,9	Feinsand	AMS	18.490 + 260 / - 250
Tur-2-15	- 0,9	2,4	Feinsand, geschichtet, dünne Schlufflagen	AMS	26.670 + 350 / - 330
Tur-2-30	- 3,4	4,9	Feinsand	AMS	40.020 + 2100 / - 1660
Tur-2-50	- 5,3	6,8	Feinsand, organische Einschlüsse	AMS	46.960 + 2580 / - 1950
Tur-2-76	- 7,5	9,0	Feinsand, Pflanzenreste, Eis	AMS	52.130 + 2770 / - 2050
Tur-2-99	- 9,3	10,8	Feinsand	AMS	> 52.110

Für die OSL-Untersuchungen dieser Arbeit stehen aus dem Aufschluss Tur-1 die Proben Tur-OSL-3 und Tur-OSL-4 bei 2,5 m Tiefe sowie Tur-OSL-2 bei 4,5 m Tiefe unter der Geländeoberfläche zur Verfügung. Aus der Bohrung Tur-2 liegen die Proben Tur-OSL-1 in 3,7 m, Tur-OSL-5 in 5,0 m, Tur-OSL-6 in 6,5 m und Tur-OSL-7 in 9,8 m Tiefe vor (Tab. 8).

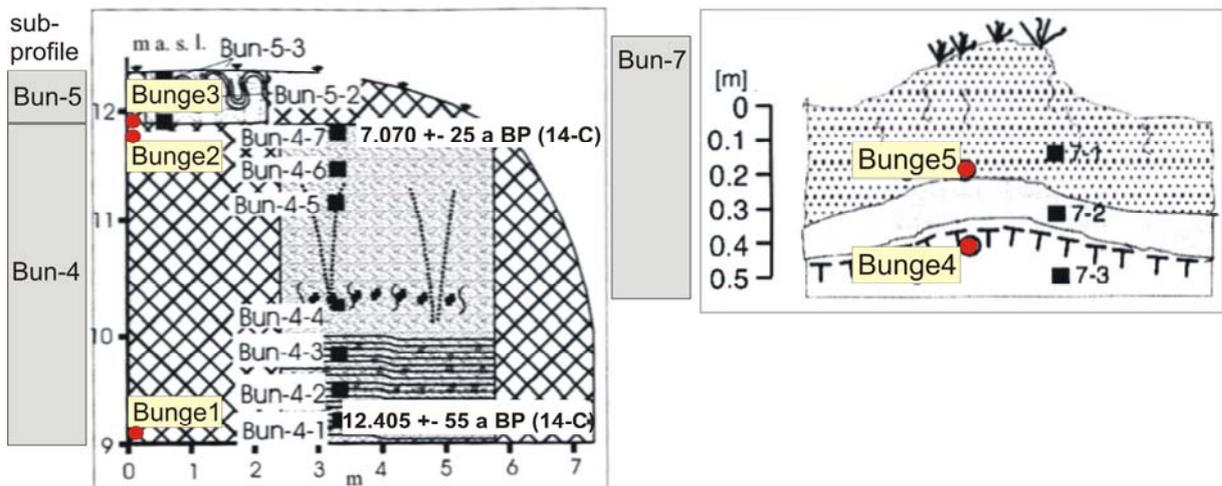
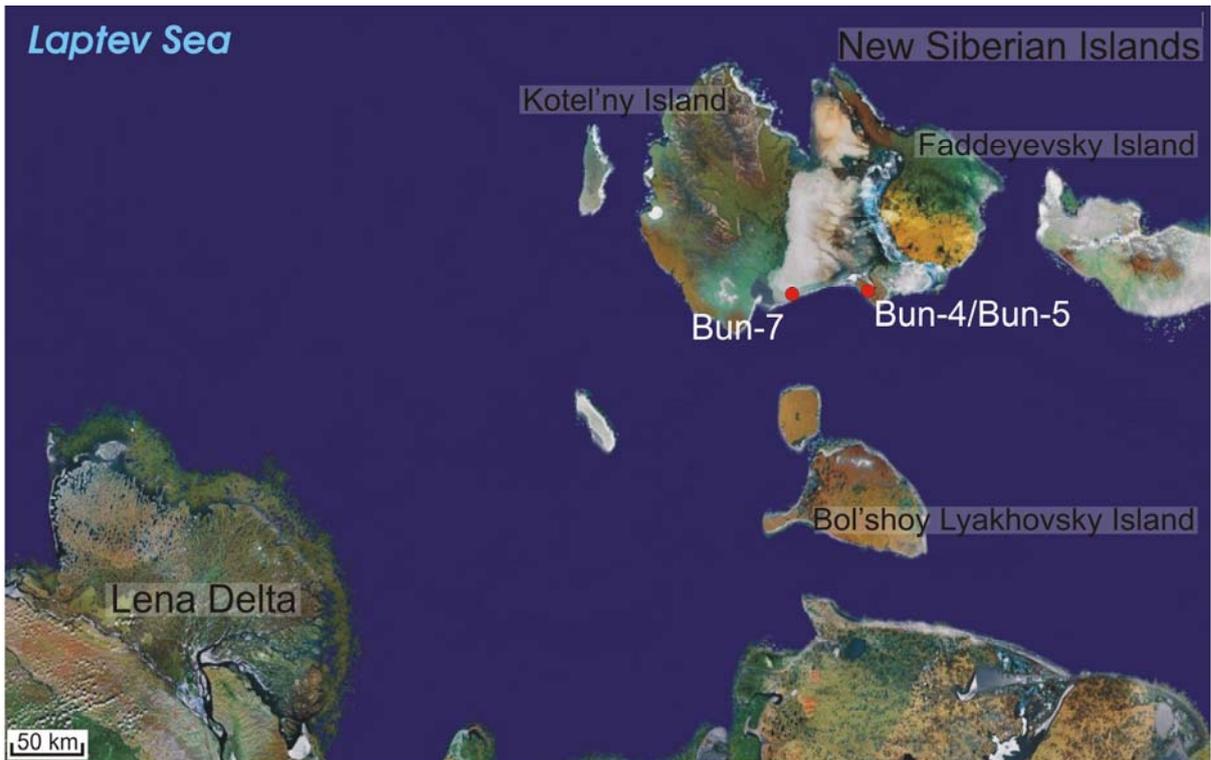
**Tab. 8: OSL-Proben der Turakh-Sektion** (nach: SCHIRRMEISTER et al. 2007)

Profil	Tur-1 & Tur-2, Turakh-Sektion, Lena-Delta Expedition 2005 72° 58,44' N, 123° 47,91' E			
Probe	Höhe m ü.d.M	Tiefe m u. GOF	Lithologie	Kollektor
Tur-OSL-4	2,9	2,5	Fein- & Mittelsand, Torfeinschlüsse	L. Schirrmeister
Tur-OSL-3	2,9	2,5	Fein- & Mittelsand, Organik, gesprenkelt	L. Schirrmeister
Tur-OSL-2	0,9	4,5	Fein- & Mittelsand, leicht wellig gelagert	L. Schirrmeister
Tur-OSL-1	- 2,2	3,7	Fein- & Mittelsand	L. Schirrmeister
Tur-OSL-5	- 3,5	5,0	Mittel- bis Feinsand	L. Schirrmeister
Tur-OSL-6	- 5,0	6,5	Mittelsand, organikreich, Fe-Oxide	L. Schirrmeister
Tur-OSL-7	- 8,2	9,7	Wechsel Mittel- bis Feinsand, Organiklinsen	L. Schirrmeister

### 2.3.5 Bunge-Land (Neusibirische Inseln)

Um methodischen Untersuchungen zur Bestimmung des natürlich akkumulierten OSL-Signals und der einhergehenden Sedimentationsalter unabhängig von den Untersuchungsprofilen im Lena-Delt durchzuführen, wurde ein „Test-Profil“ auf den nordöstlich gelegenen Neusibirischen Inseln ausgewählt, an dem <sup>14</sup>C-Alter parallel zu OSL-Proben vorliegen. Das Teilprofil **Bun-4** liegt bei 74° 52.163' N und 142° 09.651' E auf Bungeland, einer Sandebene ca. 11 – 21 m ü.d.M. zwischen den Inseln Kotelny und Fadeyevsky. Es wurde wie die beiden anderen Teilprofile Bun-5 und 7 während der gemeinsamen russisch-deutschen Expedition „Lenadelta – Neusibirische Inseln 2002“ untersucht (SCHIRRMEISTER et al. 2003b).

Das fast 3 m mächtige Teilprofil Bun-4 liegt auf einem erhöhten kleinen Areal (ca. 25 x 15 km) zwischen 11 – 21 m ü.d.M. Es ist an einem Steilhang eines Erosionstals unterhalb eines ca. 0,5 m mächtigen, stark kryoturbierten Bereichs (**Bun-5**) aufgeschlossen. Bei den Ablagerungen von Bun-4 handelt es sich um gut geschichtete Stillwasserablagerungen eines alten Flussarms. Der untere Teil zeigt Lagen aus Feinsand im Wechsel mit organikreichen Lagen und weist synsedimentäre Störungen auf. Darüber folgen dickere Sand- und organikreiche Lagen. Der Eisgehalt liegt bei 18 – 22 Gew.-% (SCHIRRMEISTER et al. 2003b). Die parallelen Radiokarbonalter liegen in einem von dieser Methode gut bestimmbaren Altersbereich mit 7 und 12 ka BP (GEYH 2005). Die Sedimente sind insbesondere im Bezug auf Korngrößen und Eisgehalt vergleichbar den Sandeinheiten der Profile im Lena-Delta (Abb. 10). Das Teilprofil **Bun-7** (74° 50,352' N; 140° 23,206' E) repräsentiert den Hauptanteil der flachen Sandebene zwischen 2 und 12 m ü.d.M., der episodischen Überflutungen unterliegt. Es ist etwa 0,5 m mächtig und küstennah gelegen. An der Basis stehen schluffige Feinsande bis in Höhe der Permafrost-Front an, die von Feinsanden mit Toneinschlüssen überlagert werden. Das Profil schließen Fein- bis Mittelsande ab, in denen Graswurzeln zu finden sind.



**Abb. 10: Lage- und Profilübersicht der Teilprofile Bun-4, Bun-5 und Bun-7 auf Bunge-Land, Neusibirische Inseln** (Erläuterungen im Text, SCHIRRMEISTER et al. 2003b, Kartengrundlage bearbeitet nach: Google-Maps)

Insgesamt wurden 2 OSL-Proben aus Bun-4 genommen, Bunge-1 bei 3 m uGOF und Bunge-2 bei 0,7 m Tiefe unter der Geländeoberfläche (Tab. 9). Bunge-3 (0,6 m Tiefe) stammt aus dem nach oben anschließenden Teilprofil Bun-5.

**Tab. 9: OSL-Proben von Bungeland** (nach: SCHIRRMEISTER et al. 2003b)

<b>Profil</b>	<b>Bun-4 &amp; Bun-5, Bunge-Land, Lena-Delta Expedition 2003</b> 74° 52.163' N, 142° 09.651' E			
<b>Probe</b>	<b>Höhe</b> m ü.d.M	<b>Tiefe</b> m u. GOF	<b>Lithologie</b>	<b>Kollektor</b>
Bunge-3	11,4	0,6	Feinsand	L. Schirrmeister
Bunge-2	11,3	0,7	Feinsand	L. Schirrmeister
Bunge-1	9,0	3,0	wechselgelagerter Feinsand, organikreich	L. Schirrmeister

<b>Profil</b>	<b>Bun-7, Bunge-Land, Lena-Delta Expedition 2003</b> 74° 50,352' N; 140° 23,206' E			
<b>Probe</b>	<b>Höhe</b> m ü.d.M	<b>Tiefe</b> m u. GOF	<b>Lithologie</b>	<b>Kollektor</b>
Bunge-5	1,1	0,4	schluffiger Feinsand	L. Schirrmeister
Bunge-4	0,9	0,6	Fein- bis Mittelsand, Graswurzeln	L. Schirrmeister

## 3 OSL-METHODIK

### 3.1 Lumineszenz - Grundlagen

#### 3.1.1 Einordnung der OSL-Datierungsmethode

Lumineszenz-Methoden zählen zu den radiometrischen Verfahren der physikalischen Altersbestimmung. Sie nutzen durch ionisierende Strahlung radioaktiver Zerfallsprozesse verursachte Anregungszustände (Strahlenschäden) in nichtleitenden Mineralen (Dosimeter). Generell geeignete Dosimeter sind Quarz und Feldspäte, die fast ubiquitär vorkommen. (GEYH & SCHLEICHER 1990, FUCHS 2001, GEYH 2005).

Grundsätzlich werden die unterschiedlichen Lumineszenz-Techniken nach Art der Stimulation unterschieden. Bei der Thermolumineszenz (TL), wird über Hitzezufuhr stimuliert. Im Falle der optisch stimulierten Lumineszenz (OSL), die aus der TL hervorgegangen ist, erfolgt die Stimulation mit Photonen (Licht). Für Feldspäte eignet sich insbesondere Licht des infraroten Wellenlängenspektrums (IR-OSL) und für Quarze grünes bzw. blaues Licht (AITKEN 1998). Letzteres wird im Folgenden vereinfacht als OSL bezeichnet (u.a. PRESCOTT & ROBERTSON 1997).

Die große Bedeutung der OSL für geomorphologische Fragestellungen besteht in der direkten Datierung von Sedimentationsaltern (vgl. Kap. 3.1.2), weshalb sie zur zeitlichen Einordnung von Sedimentkomplexen für Paläoklimastudien bzw. Rekonstruktion von Paläoumweltbedingungen und zur stratigraphischen Korrelation räumlich getrennter Profile genutzt werden können (KRBETSCHKEK 1995, AITKEN 1998, FUCHS 2001). Angewandt wird sie auf äolische, marine, fluviale, limnische und kolluviale Lockersedimente (MURRAY & OLLEY 2002, WALLINGA 2002, GEYH 2005). In der vorliegenden Arbeit wurden die OSL-Untersuchungen an Quarzen aus periglazialen Sedimentfolgen vorgenommen, die den fluvialen Ablagerungen der Lena zugeordnet werden.

Der datierbare Altersbereich der OSL-Methodik für Quarz reicht zuverlässig 0,01 bis > 100 ka und erprobt bis ca. 800 ka (GEYH 2005). Unter Anwendung modifizierter Verfahren wird sogar eine obere Altersgrenze bis 1000 ka BP beschrieben (HILGERS 2007). Die Bestimmungsgrenze ist dabei individuell v.a. abhängig von probenspezifischen Eigenschaften des Dosimeters und der Intensität der ionisierenden Strahlung (FUCHS 2001).

An den im Lena-Delta untersuchten Profilen stehen die Ergebnisse aus zwei weiteren Datierungsmethoden zur Verfügung (vgl. Kap. 2), die ebenfalls auf Sedimentationsalter abzielen, sich aber unterscheiden im datierten Ereignis, verwendetem Material und methodischen Problemen. Im gegenseitigen Vergleich kann die Validität und Genauigkeit der Datierungsergebnisse abgesichert werden. Radiokarbon-Methode ( $^{14}\text{C}$ ) an organischem Material spielt eine große Rolle als weit verbreitete Standardmethode im Altersbereich von etwa 0,1 – 50 ka BP (AMS max. 70 ka BP nach GEYH & SCHLEICHER 1990). Allerdings muss der genetische Zusammenhang zwischen dem organischem Material und dem Sediment sowie mögliche Kontaminationen beachtet werden (AITKEN 1998). Die  $^{230}\text{Th}/\text{U}$ -Methode kann u.a. für organisches Material mit Altern zwischen > 1 bis 350 ka BP (AMS 500 ka BP) angewandt werden (GEYH & SCHLEICHER 1990, GEYH 2005).

### 3.1.2 Grundprinzip der OSL-Datierung

Das Phänomen der Lumineszenz basiert auf (1) einer ionisierenden Strahlung (Umweltradioaktivität), die (2) ein latentes Signal (Dosis  $D$ ) in bestimmten Mineralen proportional zur Zeit akkumuliert, das (3) bei geeigneter Stimulation als Licht (Lumineszenz) wieder abgegeben wird (KRBETSCHKE 1995, HILGERS 2007). Essentielle Voraussetzungen für die Interpretierbarkeit der Lumineszenz sind nach AITKEN (1998), FUCHS (2001) und GEYH (2005):

- Proportionalität der Lumineszenzintensität (3) zur absorbierten Strahlendosis (2)
- stabile Signalspeicherung
- konstante Rate der ionisierenden Strahlung (1) über Datierungszeitraum

Um die Lumineszenz zur Sedimentdatierung nutzen zu können ist eine Nullstellung der „geomorphologischen Uhr“ notwendig, die im Falle der OSL-Untersuchungen durch Lichtexposition, das sogenannte Bleichen, im Zuge von Transport- und Ablagerungsprozessen geschieht. Nach Abdeckung mit weiterem Sediment wird erneut zeitabhängig das OSL-Signal durch die konstant wirkende ionisierende Strahlung aufgebaut. Das aus diesem akkumulierten Signal nach Probenahme datierte Ereignis repräsentiert demnach die Zeit seit der letzten Lichtexposition bzw. Sedimentation (Abb. 11) (PRESCOTT & ROBERTSON 1997, AITKEN 1998, FUCHS 2001, WALLINGA 2002, HILGERS 2007).

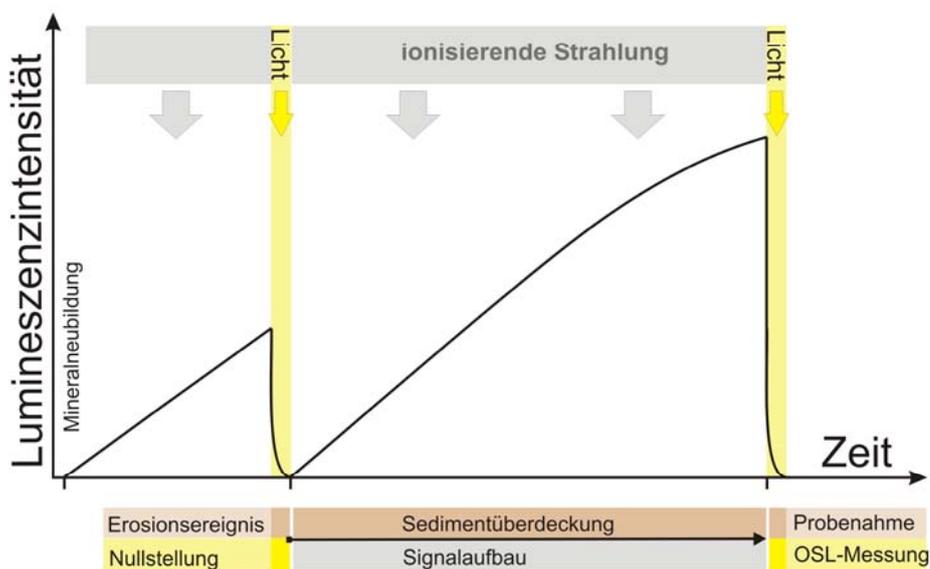


Abb. 11: Prinzip der OSL-Datierung (erstellt nach: AITKEN 1998, FUCHS 2001)

Durch die Proportionalitätsbeziehung kann aus dem gemessenen natürlichen OSL-Signal über den Vergleich mit OSL-Messungen bekannter Labordosen auf die akkumulierte Gesamtdosis seit der letzten Lichtexposition geschlossen werden. Das Alter ( $t$ ) hängt dann ab von der Rate der Dosisabsorption, die aus der Intensität der ionisierenden Strahlung resultiert,

und der Größenordnung der akkumulierten Strahlendosis (GEYH & SCHLEICHER 1990, KRBETSCHKEK 1995). Vereinfacht formuliert dies die Altersgleichung nach AITKEN (1998):

$$t = \frac{PD}{DL} \quad \text{(Gleichung 1)}$$

t ... Zeit (Alter)  
PD ... Paläodosis  
DL ... Dosisleistung

Die Paläodosis (**PD**) steht für die Labordosis, die ein OSL-Signal vergleichbar dem aus der natürlich akkumulierten Dosis (**D**) des letzten Sedimentationszyklus reproduziert (FUCHS 2001). Sie wird angegeben in Gy (AITKEN 1998). Fundamentale Basis ist dabei die Annahme, dass bei gegebenem OSL-Signal D vergleichbar ist mit PD (MURRAY & WINTLE 2002):

$$D = PD \quad \text{(Gleichung 2)}$$

D ... natürlich akkumulierte Gesamtdosis

Die Dosisleistung (**DL**) spiegelt die absorbierte Energiedosis pro Zeiteinheit aus dem natürlichen Strom ionisierender Strahlung wieder, dem die Minerale in Sediment ständig ausgesetzt sind. Sie wird angegeben in mGy/ a (AITKEN 1998, FUCHS 2001). Verantwortlich für diese Strahlenexposition sind hauptsächlich Zerfallsprozesse der Radionuklide im Sediment und zu geringerem Anteil die kosmische Strahlung (KRBETSCHKEK 1995; Kap. 3.2).

Oft wird anstatt Paläodosis synonym Äquivalenzdosis verwendet (AITKEN 1998). Im Folgenden sollen die Begriffe getrennt behandelt werden, um die Ergebnisse der zweistufigen Bestimmung des Laboräquivalents von D für eine Probe zu unterscheiden. Die Äquivalenzdosis (**ED**) bezeichnet die Ergebnisse der Messungen und Berechnungen an einzelnen Aliquots und wird in Kap. 3.3 näher beschrieben. Die ermittelten ED können insbesondere in fluvialen Ablagerungen, wie sie im Lena-Delta vorliegen, Restsignale aus früheren Sedimentationszyklen durch unzureichenden Effektivität der Signalnullstellung enthalten. Ursachen liegen v.a. in kurzen Transportstrecken, hohen Ablagerungsraten, lichtabsorbierendem Transportmedium und Korneigenschaften, wie z.B. Korngröße (u.a. MURRAY et al. 1995, AITKEN 1998, OLLEY et al. 1998, 1999, WALLINGA 2002, FUCHS et al. 2005). Daher soll anhand aller bestimmten ED einer Probe die Paläodosis (**PD**) über statistische Verfahren zur Erkennung und Abgrenzung unzureichender Bleichung gewonnen werden, um möglichst objektiv ein Äquivalent der für das Sedimentationsalter repräsentativen D abzuleiten (Kap. 3.4). Die ermittelten Parameter und Korrekturfaktoren für DL und PD gehen mit Hilfe des Programms ADELE (KULIG 2005) in die Bestimmung des OSL-Alters ein.

### 3.1.3 Modellvorstellungen zur Signalspeicherung

Die Energiezufuhr infolge der Wechselwirkungen mit ionisierender Strahlung wird materialabhängig und zeitabhängig im Dosimeter in Form von potentieller Energie gespeichert und als OSL-Signal schließlich wieder abgegeben (KRBETSCHKEK 1995). Bei andauernder Energiespeicherung nimmt die entsprechende potentielle Lumineszenzintensität unterschiedlich schnell zu (Abb. 12). Nach einem mehr oder weniger linearem Wachstum tritt ein Sättigungszustand ein mit geringem oder gar keinem Wachstum (Zone IV), in der eine Altersbestimmung nicht mehr möglich ist (GEYH 2005).

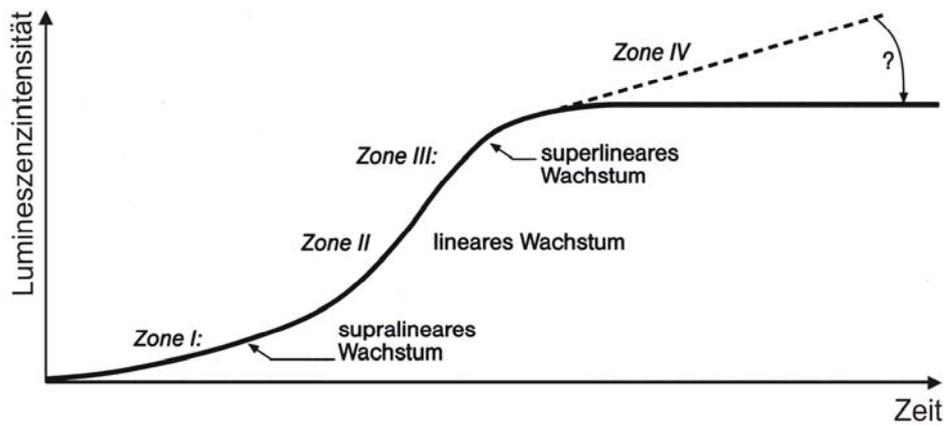
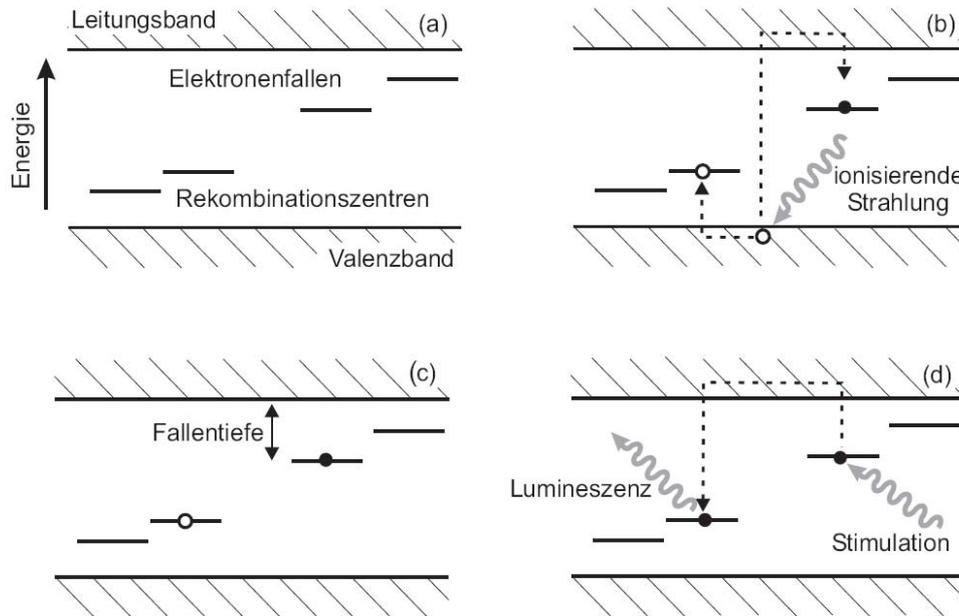


Abb. 12: Wachstum des Lumineszenzsignals (nach: GEYH 2005, KRBETSCHKEK 1995)

Die Signalspeicherung und -abgabe wird für nichtleitende Feststoffe physikalisch anhand des Bändermodells und frei beweglicher Elektronen als Energieträger erklärt. Danach bauen Atome des Kristallgitters bandartige Energieniveaus auf: das vollständig mit Elektronen besetzte Valenzband und das energetisch höhere, elektronenfreie Leitungsband. Zwischen ihnen existiert die Bandlücke, in der ein Elektronenaufenthalt in einem idealen Reinkristall nicht gegeben ist. Im natürlichen Kristall mit Gitterdefekten in Form von Fehlstellen, Zwischengitterplätzen oder Fremdatomen entstehen hingegen diskrete Potentialmulden (Elektronen-Fallen, Haftterme), in denen sich Elektronen aufhalten können. Über dem Valenzband befinden sich die Rekombinationszentren positiver Ladung, die an ein charakteristisches optisches Emissionspektrum gebunden sind (KRBETSCHKEK 1995, FUCHS 2001, vgl. Abb. 13a). Die Anzahl der Fallen wird über Altersspanne der Probe als konstant angenommen und bestimmt damit die maximale Aufnahmekapazität an Elektronen bis Sättigung erreicht ist (AITKEN 1998). Allerdings wurde beobachtet, dass neue Fallen z.B. nach Signalsättigung generiert werden können, die dann zu einem weiteren verlangsamten Wachstum beitragen (GEYH 2005).



**Abb. 13: Das Bändermodell** (aus: FUCHS 2001, Erläuterungen im Text)

Bei der Absorption der Energie aus  $\alpha$ -,  $\beta$ -,  $\gamma$ - und kosmischer Strahlung werden Elektronen in das Leitungsband angehoben und die entstandenen Löcher im Valenzband verbinden sich mit den Rekombinationszentren (Abb. 13b). I.d.R. rekombinieren die angehobenen Elektronen unmittelbar mit den Zentren. Zu einem geringen Anteil werden sie aber in den Fallen unter dem Leitungsband quasi stabil gebunden (KRBETSCHKE 1995, FUCHS 2001, GEYH 2005). Erst durch ausreichend hohen Energieinput (Stimulation) werden diese Elektronen wieder in das Leitungsband angehoben. Die Fallentiefe bestimmt die zur Aktivierung nötige Energie und damit die Stabilität der Signalpeicherung und Eignung für Lumineszenzuntersuchungen (Abb. 13c). Die ins Leitungsband angehobenen Elektronen rekombinieren mit den positiv geladenen Zentren unter Emission von Lichtquanten (GEYH & SCHLEICHER 1990, KRBETSCHKE 1995, AITKEN 1998, FUCHS 2001, vgl. Abb. 13d). Unter Umständen kommt es dabei zum Elektronenwiedereinfang, was zu einer Verfälschung der gemessenen OSL-Signale führt (SMITH & RHODES 1993). Die Aktivierungsenergie der optisch sensitiven Fallen ist v.a. abhängig von der Wellenlänge und Energiedichte des Stimmulationslichts. Bei fortgesetzter Anregung kommt es zur einfachen exponentiellen Abnahme des OSL-Signals. Allgemein gilt, je kürzer die Wellenlänge desto schneller werden Fallen entleert (KRBETSCHKE 1995, AITKEN 1998). Abhängig von der Fallentiefe können Elektronen auch thermisch angeregt werden. Aufgrund der temperaturbedingten Gitterschwingungen wirkt in jedem Festkörper oberhalb des absoluten Nullpunktes ein thermischer Anteil mit und Elektronen können schon bei relativ niedrigen Aktivierungsenergien über thermisch-optische Prozesse entweichen (KRBETSCHKE 1995). Daher ist v.a. in flachen Fallen eine stabile Signalspeicherung nicht gesichert (SMITH & RHODES 1993, AITKEN 1998). Mit der Wahl geeigneter Stimmulations-Wellenlängen und engen Detektionspektren versucht man, nur die zur Datierung geeigneten Fallen zu aktivieren und deren Signal zu messen (FUCHS 2001). Spontanes Ausheilen von Strahlungsschäden (anomalous fading) mit entsprechendem Signalverlust, wie es in Feldspäten auftreten kann, ist bei Quarzen nicht bekannt (KRBETSCHKE 1995, GEYH 2005).

## 3.2. Dosisleistung

### 3.2.1 Natürliche Quellen ionisierender Strahlung

Für den Aufbau des OSL-Signals ist hauptsächlich die  $\alpha$ -,  $\beta$ - und  $\gamma$ -Strahlung aus Umwandlungsprozessen der natürlichen radioaktiven Isotope von Uran ( $^{238}\text{U}$  und  $^{235}\text{U}$ ), Thorium ( $^{232}\text{Th}$ ) und deren Zerfallsglieder, sowie von Kalium ( $^{40}\text{K}$ ) verantwortlich (siehe Anhang, A2). Sie treten quasi ubiquitär im Sediment auf und tragen entsprechend ihrer Konzentration mit einhergehender Strahlungsintensität proportional zur Rate der Energieabsorption im Dosimeter bei, die Radionuklid-Komponente der Dosisleistung bezeichnet wird. Wegen der großen Halbwertszeiten der Mutternuklide ist ihr Gehalt im Sediment im Prinzip über die datierte Zeitspanne konstant (KRBETSCHKE 1995). Ein geringerer, aber nicht zu vernachlässigender Anteil der Dosisleistung (DL) stammt aus kosmischer Strahlung. Während die harte, hochgradig ionisierende Komponente (v.a. Myonen) tief in die Erdkruste vordringt, wird die weiche (v.a. Elektronen und Photonen) und die Neutronen-Komponente in den oberen 0,5 - 1 m absorbiert (KRBETSCHKE 1995, AITKEN 1998).

Die für ein Mineralkorn wirksame DL ergibt sich dann aus den Komponenten der  $\alpha$ -,  $\beta$ - und  $\gamma$ - und der kosmischen Strahlung abhängig von den jeweiligen Reichweiten der Strahlung und der betrachteten Korngröße (Abb. 14). In Quarzkörnern, die eine vernachlässigbare interne Strahlung zeigen, da in ihnen i.d.R. kein Uran, Thorium oder Kalium vorkommt, durchdringen die  $\alpha$ -Teilchen in den Grobkorn-Fractionen (100 – 200  $\mu\text{m}$  bzw. 160 – 200  $\mu\text{m}$ ) nur die äußere Randschicht (ca. 20  $\mu\text{m}$ ). Die lokal hohe Ionisationsdichte innerhalb der kurzen Reichweite, bei der nicht genügend OSL-Zentren für die erzeugten Elektronen zur Verfügung stehen, bedingt Unsicherheiten in der Bestimmung der  $DL_{\alpha}$  (AITKEN 1998, GEYH 2005).

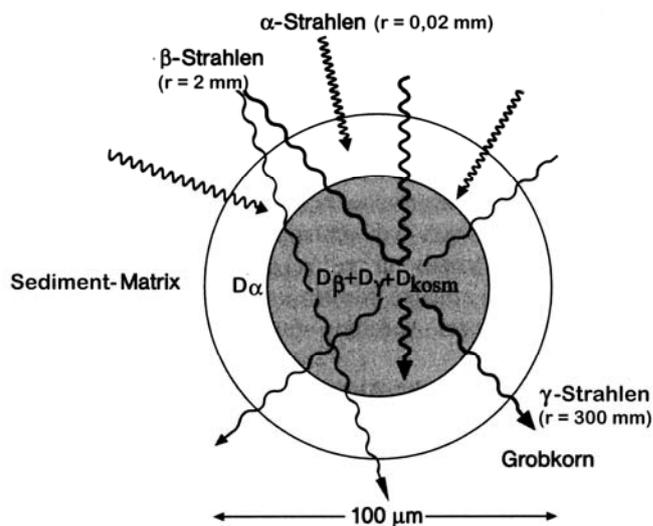


Abb. 14: Darstellung der Mikrodosimetrie von Quarzkörnern der Grobkornfraktion (nach: KRBETSCHKE 1995, GEYH 2005;  $r$  = Reichweite der Strahlungsarten,  $D$  = Komponenten der Energiedosisleistung)

Durch Ätzen der Körner mit HF kann die  $\alpha$ -Komponente weitgehend entfernt werden. Als mögliches Residual wird eine  $\alpha$ -Effektivität von  $0,1 \pm 0,05$  in die Berechnungen einbezogen (OLLEY et al. 1998). Das Kerninnere unterliegt dann v.a. der externen  $\beta$ -,  $\gamma$ - und der kosmischen Strahlung (AITKEN 1998):

$$DL_{Qz} = D_{\beta} + D_{\gamma} + D_{kosm.} \quad (\text{Gleichung 3})$$

$DL_{Qz}$  ... Gesamt-Energiedosisleistung in Quarz ohne  $\alpha$ -Komponente

$D_{\beta}$  ... Energiedosisleistung der  $\beta$ -Strahlung

$D_{\gamma}$  ... Energiedosisleistung der  $\gamma$ -Strahlung

$D_{kosm}$  ... Energiedosisleistung der kosmischen Strahlung

Infolge der Energieabsorption beim Durchdringen von Materie unterliegt die  $\beta$ - und  $\gamma$ -Strahlung je Absorber einer Abschwächung, die als Faktor in die Bestimmung der einzelnen DL-Komponenten mit eingeht. Er berücksichtigt die spezifische Abschwächung gemäß der Korngröße und Durchmesserreduktion durch die Ätzung und ist wegen der geringeren Reichweite v.a. für die  $\beta$ -Komponente in Form eines Gradienten vom Kornrand zum Zentrum hin bedeutsam (KRBETSCHKE 1995, AITKEN 1998, OLLEY et al. 1998).

### 3.2.2 Radionuklide im Sediment

Zur Bestimmung der Komponente der Radionuklide an der Gesamt-DL wird der Gehalt an radioaktiven Nukliden der Zerfallsreihen von  $^{238}\text{U}$  und  $^{232}\text{Th}$  sowie  $^{40}\text{K}$  in parallel zu jeder OSL-Probe genommenen Gamma-Proben gemessen.  $^{235}\text{U}$  wird aus  $^{238}\text{U}$  abgeleitet. Als Verfahren bietet sich die Gammaskopmetrie an, mit der sich die spezifischen Aktivitäten (in Bq / kg) aus den einzelnen Radionukliden ermitteln lassen. Ihr Strahlungsoutput wird über größere Volumen bei gleichmäßiger Verteilung im Sediment als homogen angesehen. Grundsätzlich wird für die Berechnung des DL-Beitrags von radioaktiven Gleichgewichten innerhalb der Zerfallsketten ausgegangen, welche sich gemäß den Zerfallsraten der einzelnen Glieder in geschlossenen Systemen einstellen (AITKEN 1998). Weichen die gemessenen Aktivitäten der Glieder stark voneinander ab (größer als der Fehlerbereich), muss spätestens ab dem Isotop der differenten Aktivität von einem Ungleichgewicht ausgegangen werden. Probleme mit Ungleichgewichten sind vorwiegend von der  $^{238}\text{U}$ -Reihe bekannt, die auf Fraktionierungs-, Mobilisierungs- und Adsorptionsprozessen beruhen. Insbesondere  $^{222}\text{Rn}$  spielt dabei eine bedeutende Rolle, aber auch  $^{234}\text{U}$ ,  $^{230}\text{Th}$  und  $^{226}\text{Ra}$ . Nicht erkannte Ungleichgewichte führen zu fehlerhaften spezifischen Aktivitäten für das Sediment und stellen daher ein wichtiges Problem der dosimetrischen Datierungsmethoden dar (KRBETSCHKE et al. 1994, OLLEY et al. 1998, GEYH 2005). In der  $^{232}\text{Th}$ -Reihe treten Ungleichgewichte weniger signifikant in Erscheinung, was mit den kurzen Halbwertszeiten der Zerfallsglieder zusammenhängt (AITKEN 1998, OLLEY et al. 1998). Wegen der Reduktion

der Strahlungsenergie durch den im Porenraum des Sediments vorhandenen Wassergehalt ist eine Korrektur der in den Mineralkörnern wirksamen DL notwendig (AITKEN 1998):

$$D_{\beta} = D_{\beta t} / 1 + 1,25 * W \quad \text{(Gleichung 4)}$$

$$D_{\gamma} = D_{\gamma t} / 1 + 1,14 * W$$

$D_{\beta,\gamma}$  ... wasserkorrigierte Energiedosisleistung  
 $D_{(\beta,\gamma)t}$  ... Energiedosisleistung im trockenen Sediment  
 $W$  ... Wasserfaktor (Masse Wasser / Trockenmasse Sediment)

Ein möglichst für den Ablagerungszeitraum repräsentativer Wassergehalt wird anhand der Messergebnisse des in situ Wassergehalts und der Sättigung abgeschätzt (KRBETSCHKE 1995). Dabei sollten zusätzlich geologische, geomorphologische und pedologische Indizien im Profil (z.B. Permafrost, Grundwassernähe, Bleich- und Rostflecken) Berücksichtigung finden (AITKEN 1998). Aus der Radionuklidanalyse mit Korrektur über den Wassergehalt kann anschließend mittels Umrechnungsfaktoren die zugehörige Energiedosisleistung (in Gy) für die verwendete Korngröße berechnet werden (KRBETSCHKE 1995). Die Berechnung erfolgte automatisiert mit dem Programm ADELE (KULIG 2005). Fehler werden aus der Bestimmung der Radionuklide und der Abschätzung der Wassergehaltsschwankung einbezogen. Weitere Unsicherheiten können sich aus inhomogener Radionuklidverteilung im Sediment ergeben, in deren Folge die Mineralkörner variierenden Strahlendosen ausgesetzt sind. Diesem Problem versucht man über zusätzliche Feldmessungen und Kontrolle der Nähe zu Schichten differenter Strahlungsleistungen zu begegnen (AITKEN 1998, GEYH 2005).

### 3.2.3 Kosmische Strahlung

Die Wirksamkeit der kosmischen Strahlung wurde anhand der Lageparameter der Probenahmestelle (geographische Länge und Breite, Lage ü.d.M), der Mächtigkeit der Sedimentbedeckung und der nach SCHÖN (1983) abgeleiteten Dichte des Sediments (wassergesättigter Sand: 1,8 – 2,05 g/ cm<sup>3</sup>) ermittelt und in mGy/ ka angegeben. Mit der von PRESCOTT & HUTTON (1988) empirisch ermittelten Formel kann die kosmische DL berechnet werden:

$$D_k = 0,21 * e^{(-0,07*x+0,0005*x^2)} \quad \text{(Gleichung 5)}$$

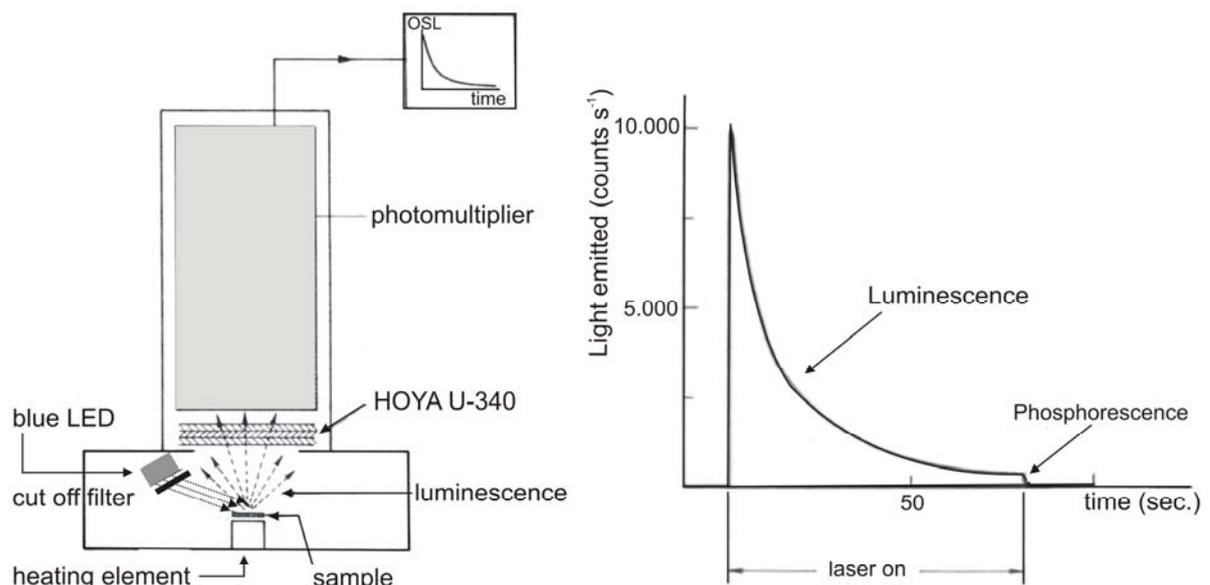
$D_k$  ... kosmische Dosisleistung (mGy / ka)  
 $x$  ... Überdeckungsfaktor (Überdeckung (m) / Dichte (g / cm<sup>3</sup>))  
 0,21 ... Lagefaktor für Gebiete auf Meeresspiegelniveau bei ca. 50° geogr. Breite

Um die vom Lagefaktor 0,21 differierende geographische Breitenlage und Schwankungen der kosmische Strahlungs einzubeziehen, wird als Unsicherheit 10 % angenommen. Zusätzliche Fehler entstehen aus der Unkenntnis der Sedimentationsgeschichte (OLLEY et al. 1998)

### 3.3. Äquivalenzdosis

#### 3.3.1 Messung des OSL-Signals

Die Messung zur Bestimmung der Äquivalenzdosis (ED) an den einzelnen Aliquots erfolgt im Labor mit dem Risø TL/OSL Reader DA 20. Zur Aktivierung der OSL-Emission in Quarzen reichen generell Wellenlängen unter 800 nm aus (FUCHS 2001, RISØ DTU 2008). Für die Wahl einer geeigneten Stimulations-Wellenlänge muss v.a. die gute Trennung zur Wellenlänge der Lumineszenz-Emission beachtet werden, damit gestreutes Stimulationslicht effektiv herausgefiltert werden kann ohne die gewollte Lumineszenz abzuschwächen (AITKEN 1998). Da in Quarz typische Emissionen sich stark um 365 nm (nahes ultraviolett) zentrieren (KRBETSCHKEK et al. 1997), ist die Stimulation mit blauen LEDs (470 nm,  $\sim 50 \text{ mW/cm}^2$ ) in Kombination mit optischen Filtern (GG420), die Überlappungen mit dem Wellenlängenfenster des Detektionssystems unterdrücken, gut geeignet (BØTTER-JENSEN et al. 1999, BANERJEE et al. 2000, GEYH 2005, RISØ DTU 2008). Die Messung der emittierten Photonen erfolgt mittels einer hoch sensiblen Photomultiplier-Röhre, der ein Hoya U-340 Detektionsfilter gegen gestreutes Stimulationslicht vorgeschaltet ist (Abb. 15) (RISØ DTU 2008). Das exponentielle Abklingen der Lumineszenz-Intensität bis auf einen nicht dosisabhängigen konstanten Basiswert (Untergrund-Signal) bei fortgesetzter Stimulation wird als sogenannte Ausleuchtcurve aufgezeichnet (AITKEN 1998, FUCHS 2001).



**Abb. 15: Schematischer Aufbau der Messgeräte und der Aufzeichnung der Ausleuchtcurve**  
(AITKEN 1998, modifiziert nach: BØTTER-JENSEN et al. 1999, RISØ DTU 2008)

Da keine allgemeingültige Beziehung zwischen Dosis und OSL besteht, muss für die Berechnung des Laboräquivalents der natürlich akkumulierten Gesamtdosis (D), die das gemessene Signal erzeugt hat, der probenspezifische Zusammenhang (Proportionalität) von applizierter, bekannter Labor-Dosis einer kalibrierten Strahlungsquelle (<sup>90</sup>Sr/ <sup>90</sup>Y, ca. 5,7 – 5,9

Gy/ min.) zu beobachteter Lumineszenzintensität über weitere OSL-Messungen ermittelt werden (AITKEN 1998, FUCHS 2001). Zu diesem Zweck sind verschiedene Mess-Protokolle vorgestellt worden, die diesen Zusammenhang in Form von Wachstumskurven darstellen. Über den Vergleich des natürlichen OSL-Signals mit der im Labor erzeugten Kurve aus Labordosis zu beobachteter OSL kann die sogenannte Äquivalenzdosis (ED) des jeweiligen Aliquots abgeleitet werden. Dabei haben sich vor allem Messprotokolle an einem Aliquot (single-aliquot) gegenüber Messungen an mehreren Aliquots (multiple-aliquot) bewährt, da hier Inter-Aliquot-Variationen vernachlässigt werden können (u.a. FUCHS 2001, MURRAY & WINTLE 2002). Der Vorteil der Verwendung des regenerative-dose Verfahrens besteht in der Interpolation der ED aus der erzeugten Wachstumskurve gegenüber den größeren Unsicherheiten einer Extrapolation bei additiven Verfahren. Für die OSL-Untersuchungen an Quarz setzt sich zunehmend die Anwendung des single-aliquot regenerative-dose (SAR) Protokolls nach MURRAY & WINTLE (2000) mit integrierter Sensitivitätskontrolle durch (FUCHS 2001, HILGERS et al. 2001, MURRAY & OLLEY 2002, Murray & Wintle 2003, PACKMAN et al. 2007). Die konkreten Mess-Sequenzen des SAR-Protokolls werden im Sequence Editor (SequencePro) festgelegt und an allen Aliquots einer Probe identisch mit dem Risø TL/OSL Reader ausgeführt. Die Bestimmungen der ED wurden vom Auswertungsprogramm ANALYST (DULLER 1994) unterstützt. Zur Einschätzung der Zuverlässigkeit der ED-Bestimmung nach dem SAR-Protokoll wurden Dose-Recovery (DR) – Tests (Kap. 3.3.4) durchgeführt (Murray & Wintle 2003).

### 3.3.2 Single aliquot regenerative (SAR) – Methode

Als Messprotokoll zum Aufbau der Wachstumskurve für die Bestimmung der ED wurde das von MURRAY & WINTLE (2000) für Quarz vorgestellte single-aliquot regenerative-dose (SAR) Protokoll verwendet. Es sieht nach der Messung des **natürlich akkumulierten Signals (N.S.)** am selben Aliquot wiederholte **Regenerationszyklen ( $R_1 - R_n$ )** von künstlicher Bestrahlung ( $D_x$ ) und Messung der resultierenden regenerierten OSL-Signale ( $L_x$ ) vor. Die sich aus den mehrfachen Regenerationszyklen ergebenden Sensitivitätsänderungen werden anhand von **Korrekturzyklen ( $TD_x$ )** mit konstanter Testdosis ( $D_t$ ) aufgezeichnet, die jeder OSL-Messung nachgeschaltet sind (Abb. 16). Am Ende der gesamten Mess-Sequenz wird ein **IR-Kontrollzyklus** aus Bestrahlung – Vorheizen (260°C, 10s) – IR-OSL-Messung (IR-Dioden, 125°C, 50s) angehängt. Da Quarz mit IR-Licht nicht stimuliert werden kann, bildet das gemessene Signal eine eventuelle Feldspatkontamination ab. Vor jeder Messung (natürlich und regeneriert) findet ein Vorheizen (OSL 260°C bzw. Testdosis 220°C für je 10s) statt um Signalkontaminationen aus instabilen OSL-Fallen bzw. Ladungstransfers zu vermeiden. Stimuliert wird mit blauen LEDs und einer Temperatur von 125°C über 50s um Effekt des “Retrapping” (Ladungswiedereinfang in 110°C TL peak trap) zu unterbinden und das Signal vollständig aufzuzeichnen bzw. alle optisch sensitiven Fallen zu leeren.

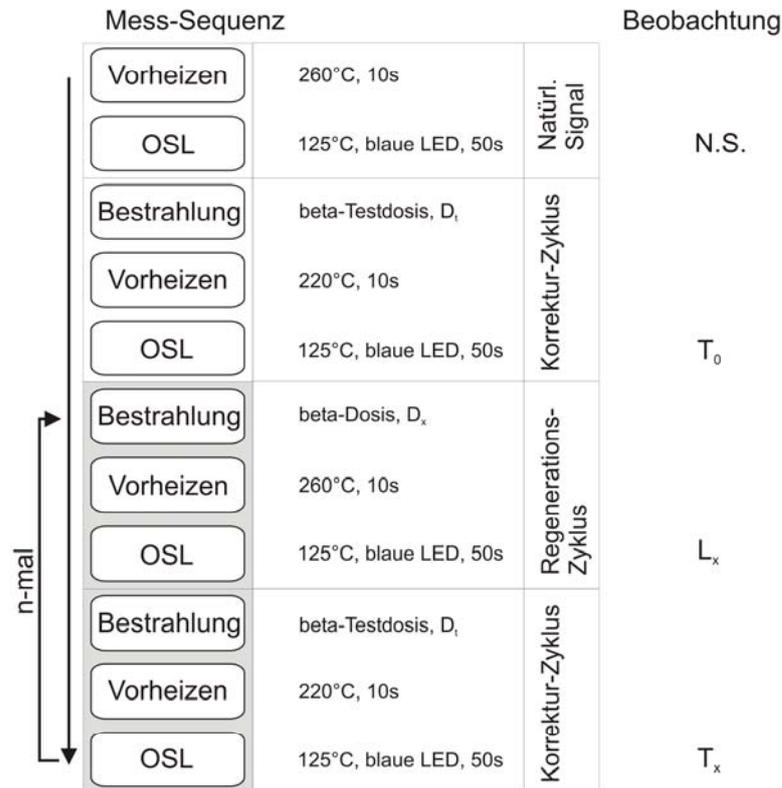


Abb. 16: Generalisierte SAR-Sequenz (nach MURRAY & WINTLE 2000, BANERJEE et al. 2000, FUCHS 2001; geändert)

Als Grundlage für die Berechnung der Wachstumskurve dienten sechs Regenerationszyklen (R<sub>1</sub> – R<sub>6</sub>). Die steigenden Dosen von R<sub>1</sub> – R<sub>3</sub> sollen N.S. möglichst umschließen und die deutlich größere Dosis von R<sub>4</sub> den weiteren Verlauf der Kurve wiedergeben.

$$R_1 < R_2 \approx N.S. < R_3 \ll R_4$$

R<sub>5</sub> ohne applizierte Dosis kontrolliert den Nullpunkt (NP) der Kurve und entsprechend den Erholungseffekt (Recuperation), der u.a. durch das Vorheizen auftreten kann. Inwieweit ein beobachtetes OSL-Signal bei gleicher Regenerationsdosis reproduziert werden kann und die Sensitivitätskontrolle erfolgreich war, wird in R<sub>6</sub> durch Wiederholung von R<sub>2</sub> überprüft (Recycling Ratio = RR). Aus den aufgezeichneten Ausleuchtcurven als Ergebnis der jeweiligen Messzyklen werden die einzelnen OSL- Signale über folgende Korrekturen berechnet:

1. Untergrund-Korrektur:  $L_x = OSL_{ini} - BG$  (Gleichung 6)  
 $T_x = OSL_{ini} - BG$

- L<sub>x</sub>, T<sub>x</sub> ... untergrundkorrigiertes OSL-Signal bzw. Testdosissignal
- OSL<sub>ini</sub> ... initiales OSL-Signal (Integral der ersten 1 – 5 Kanäle (m); 0,2 – 1 s)
- BG ... konstantes Untergrund-Signal (Integral der letzten 200 – 250 Kanäle (n = k\*m))

2. Sensitivitäts-Korrektur: 
$$OSL_{korrr.} = \frac{L_x}{T_x} \quad \text{(Gleichung 7)}$$

$OSL_{korrr.}$  ... sensitivitätskorrigiertes OSL-Signal (natürlich und regeneriert)

$L_x$  ... untergrundkorrigiertes OSL-Signal (natürlich und regeneriert)

$T_x$  ... jeweils subsequentes OSL-Signal der konstanten Testdosis

Aus Zuordnung der korrigierten OSL-Signale ( $L_x/T_x$ ) zu regenerierten Labordosen ( $D_x$ ) des Zykluses ( $R_x$ ) wird die sensitivitätskorrigierte Wachstumskurve aufgebaut und die ED über das korrigierte natürliche Signal abgeleitet (siehe u.a. MURRAY & WINTLE 2000, 2003, MURRAY & OLLEY 2002, BANERJEE et al. 2000, FUCHS 2001, GALBRAITH & ROBERTS 2008).

### 3.3.3 Auswertung der Messergebnisse

Die gesamten gemäß der SAR-Sequenz erhobenen Daten werden als .BIN-Datei in das Programm ANALYST Version 3.04b (DULLER 2001) eingelesen und automatisiert nach den oben beschriebenen Korrekturen (Gleichung 6 und 7) ausgewertet. Mittels Kurvenanpassung (exponentiell bzw. exponentiell + linear) an die berechneten Punkte von regenerierter Dosis zu beobachteter OSL ( $D_x$  ;  $L_x/T_x$ ) wird die Funktion der Wachstumskurve beschrieben. Mit Hilfe dieser Funktion kann dem korrigierten natürlichen Signal ( $N.S./T_0$ ) des jeweiligen Aliquots das Laboräquivalent ED zugeordnet werden.

Um die Eignung der ermittelten ED des betreffenden Aliquots für die weitere Auswertung abzuwägen werden verschiedene OSL-Eigenschaften kontrolliert. Anhand der Ausleuchtkurve kann das N.S. beurteilt werden nach initialer OSL-Intensität gegenüber dem BG, Abklingenrate und Signalfuktuation um das Mittel eines bestimmten Zeitintervalls. Sie gibt Hinweise auf Lumineszenzempfindlichkeit und Signal-Kontaminationen. Die Wachstumskurve aus R1 – R6 kontrolliert die Qualität von: NP ( $R_5 / N.S. * 100$ ), RR ( $R_6 / R_2 * 100$ ), Kurvenanpassung und Testdosis-Korrektur (TDE) (MURRAY & WINTLE 2000, 2002, FUCHS 2001). Mit Hilfe der Variation des Integrals (channel 1-5 entspricht 0,2 – 1s) aus dem  $OSL_{ini}$  berechnet wird, kann eine verbesserte Berechnung der Wachstumskurve erreicht werden. Über den Faktor k wird das BG-Integral angepasst. Unter Umständen erweist sich die Integration des vorhergehenden BG für die Berechnung der Testdosis als hilfreich (DULLER 2001). Folgende Qualitätskriterien wurden für die Eignung eines Aliquots verwendet:

Recycling Ratio (RR)	max. 10 %
Testdosisfehler (TDE)	max. 10 %
ED-Fehler	max. 10 %
ED	> 3 $\sigma$ über BG
Nullpunkt (NP)	max. 5 %

Sind diese Kriterien erfüllt, kann von einem funktionalem Zusammenhang zwischen OSL-Intensität zu erhaltener Dosis ausgegangen werden, der sich in der Wachstumskurve widerspiegelt und die Bestimmung einer für diese Beziehung repräsentativen ED und zugehöriger Fehler ermöglicht. Messtechnisch bedingt (Instrumente, Strahlenquelle) wurde ein systematischer Fehler von 2 % einbezogen (MURRAY & OLLEY 2002). Während der Photonen-zählung ergeben sich statistische Fluktuationen des OSL-Signals, die sich in der Ausleuchtcurve als vertikale Streuung um den Mittelwert des jeweiligen Zeitintervalls der Stimulation zeigen. Über die Zeitachse bleibt diese etwa gleich mit meist nur geringen Variationen zwischen den Aliquots einer Probe (GALBRAITH et al. 1999, BANERJEE et al. 2000, ARNOLD et al. 2007). Diese Variation wird als Standardfehler der korrigierten OSL-Signale ( $se_{OSL}$ ) berechnet nach (GALBRAITH & ROBERTS 2008):

$$se_{OSL} = \sqrt{(se_{L_x})^2 + (se_{T_x})^2} \quad \text{(Gleichung 8)}$$

$se_{OSL}$  ... Standardfehler des sensitivitätskorrigiertes OSL-Signals  
 $se_{L_x}$  ... Standardfehler  $L_x$   
 $se_{T_x}$  ... Standardfehler  $T_x$

$$ED - Fehler = \sum (se_{OSL} + 2\% + K) \quad \text{(Gleichung 9)}$$

2% ... messtechnischer Fehler  
K ... Fehler der Kurvenanpassung

Dieser Signal-Standardfehler geht zusammen mit dem messtechnischen Fehler und dem Fehler der Kurvenanpassungsfunktion gegenüber den OSL-Dosis-Punkten in die Bestimmung des ED-Fehlers ein (BANERJEE et al. 2000, DULLER 2001, ARNOLD et al. 2007). Da an einer Probe zahlreiche Aliquots automatisiert gemessen werden können, ergeben sich pro Probe viele verschiedene ED mit z.T. sehr unterschiedlichen Werten. Für eine objektive Bestimmung der PD als Repräsentant des Sedimentationsalters aus der Menge an ED müssen die nach den Eignungskriterien ausgewählten ED weiteren statistischen Analysen unterzogen werden. Die verwendeten Verfahren werden in Kap. 3.4 vorgestellt.

### 3.3.4 Dose Recovery Test

Zur Kontrolle inwieweit eine bekannte künstliche Dosis erfolgreich mit dem SAR-Messprotokoll ermittelt werden kann, können zusätzlich zu den eigentlichen OSL-Messungen (vgl. Kap. 3.3.2) Dose-Recovery-Tests (DR-Tests) durchgeführt. Nach vollständiger Bleichung werden die Aliquots mit einer künstlichen Dosis ( $D_{DR}$ ) in Höhe der erwarteten natürlichen ED der Probe bestrahlt. Für dieses „natürliche Signal“ bekannter Dosis wird anschließend mit der für die Probe verwendeten SAR-Sequenz gemessen (Murray & Wintle 2003). Das berechnete Ergebnis ( $ED_{DR}$ ) der Sequenz beschreibt in der Abweichung

gegenüber der applizierten Dosis die Genauigkeit der Dosis-Reproduktion. Die Abweichung drückt sich im Verhältnis  $ED_{DR}$  zu  $D_{DR}$  (DR-Ratio) bzw. als mittlere Abweichung aller DR-Tests in der Standardabweichung ( $sd_{DR}$ ) aus (FUCHS 2001, PACKMAN et al. 2007):

$$DR - Ratio = \frac{ED_{DR}}{D_{DR}} \quad (\text{Gleichung 10})$$

$$sd_{DR} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (ED_{DR} - D_{DR})^2} \quad (\text{Gleichung 11})$$

- $ED_{DR}$  ... Äquivalenzdosis der Aliquots  $i = 1 \dots N$
- $D_{DR}$  ... künstliche Labordosis (konstant für  $i = 1 \dots N$ )
- $N$  ... Anzahl der DR-Tests

Schlechte DR-Ratios deutet eine ungeeignete SAR-Sequenz oder hohe Testdosisfehler durch signifikante Sensitivitätsänderungen des OSL-Signals problematischer Proben an (MURRAY & WINTLE 2002, 2003, PACKMAN et al. 2007). Die Standardabweichung der  $ED_{DR}$  gegenüber  $D_{DR}$  aus mehreren DR-Tests lässt auf die probeneigene natürliche Variabilität der OSL-Emission bei ausgangs vollständiger Bleichung schließen. Ihren relativen Anteil gemessen an der  $D_{DR}$  veranschaulicht der Variationskoeffizient  $v_{DR}$  (u.a. FUCHS & LANG 2001, siehe Kap. 3.4.2):

$$v_{DR} = \frac{sd_{DR} * 100}{D_{DR}} \quad (\text{Gleichung 12})$$

## 3.4 Statistische Verfahren zur Bestimmung der Paläodosis

### 3.4.1 ED-Verteilung und Lageparameter

Die ausgewählten ED der Anzahl  $N$  einer Probe repräsentieren zufällige „Ausschnitte“ des zu untersuchenden Sedimentkörpers. Sie resultieren aus dem Mischsignal aller Körner des jeweiligen Aliquots. Die ED-Variation zwischen den Aliquots reflektiert generell die natürliche Lumineszenz-Variabilität, die bei vollständiger Bleichung als relativ gleichverteilt um einen Mittelwert (akkumulierte Dosis der Sedimenteinheit) angenommen wird. Bei unvollständiger Bleichung der einzelnen Quarzkörner während der Sedimentation führen die i.d.R. unterschiedlich großen Restsignale (heterogene Bleichung des Sediments) zu einer positiven Verzerrung der normalverteilten Variabilität, die allgemein in fluvialen Sedimenten ein bedeutendes Problem darstellt (Altersüberschätzungen). Für weitere Verzerrungen der Variationsbreite können v.a. postsedimentäre Umlagerungsprozesse (Kryo-, Bio-Turbation), mikrodosimetrische Unterschiede im Sediment oder Feldspat-Kontaminationen der Quarzkörner eine Rolle spielen (u.a. DULLER 1994, FUCHS & WAGNER 2003, ARNOLD et al. 2007, PACKMAN et al. 2007). Um objektiv zu entscheiden, welche ED das „wahre“ Sedimentationsalter repräsentieren, sind statistische Analysen notwendig, deren Anwendung und Diskussion den Schwerpunkt dieser Arbeit darstellt.

Damit möglichst viele Anteile der in der Probe auftretenden ED-Variation in die Bestimmung der PD einbezogen werden können, wurden die Ergebnisse der zweiten Messreihe (24 Aliquots) soweit vorliegend in die erste integriert (Anpassung der Quellenleistung nach Messdatum und Leistung zum Zeitpunkt der letzten Kalibrierung) und so die Anzahl  $N$  pro Probe erhöht. Erfüllen nur wenige ED die Qualitätskriterien, wurden die Grenzwerte versuchsweise gelockert, um Anhaltspunkte für die restliche Dosisverteilung zu gewinnen. Die schlechteren OSL-Eigenschaften müssen dann aber trotzdem für die Auswertung der betreffenden Probe berücksichtigt. Einen generellen Überblick der vorliegenden ED-Verteilung geben die Zentraltendenz und die assoziierte Streuung (Inter-Aliquot-Variation). Zentraltendenz ist einfach zu bestimmen über das **arithmetische Mittel ( $x_q$ )** (BAHRENBERG 1990):

$$x_q = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N ED_i \quad (\text{Gleichung 13})$$

$ED_i$  ... Äquivalenzdosis des  $i$ -ten geeigneten Aliquots ( $i = 1 \dots N$ )

$N$  ... Anzahl der geeigneten Aliquots

Besonders bei einer asymmetrischen ED-Verteilung mit starken Extremwerten ist  $xq$  wenig geeignet die Zentraltendenz zu beschreiben. Inwieweit eine Asymmetrie vorliegt deutet sich in der Differenz von  $xq$  und dem **Median (md)** an, der robuster gegenüber Extrema ist:

$$N \text{ ungerade} \quad md = ED_{\frac{N+1}{2}} \quad (\text{Gleichung 14})$$

$$N \text{ gerade} \quad md = \frac{1}{2}(ED_{\frac{N}{2}} + ED_{\frac{N}{2}+1})$$

Als Maß für die Streuung wird hier generell die Standardabweichung ( $sd$ ) verwendet. Sie gibt die durchschnittliche Abweichung der ED gegenüber einem zentralen Wert an. Sie misst die Präzision, mit der die Paläodoses (PD) aus den ED der Anzahl  $N$  bestimmt werden kann. In die Altersberechnung geht sie als Fehler der PD ein. Da die Integration der ED-Fehler in die Fehlerberechnung der PD zu extrem hohen und kaum interpretierbaren Fehlern führen würde und sie sich im Wesentlichen innerhalb der ED-Wertemenge überlappen, werden sie generell für die PD-Fehler vernachlässigt (GALBRAITH et al. 1999). Die  $sd$  berechnet sich nach:

$$sd = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (ED_i - xq)^2} \quad (\text{Gleichung 15})$$

Konzentrationen und Extremwerte der ED-Verteilung veranschaulichen Häufigkeitsverteilungen auf der Grundlage von Mittelwerten über konstante Werteintervalle (Histogramme) oder kontinuierlich in Form der Normalverteilungsfunktion. Für die Darstellung von Histogrammen wurde die Anzahl der Klassen ( $N_k$ ) anhand folgender Faustregel vorgenommen (BAHRENBURG 1990):

$$N_k = 1 + 3,32 * \lg N \quad (\text{Gleichung 16})$$

Die Wahrscheinlichkeitsdichte der ED-Verteilung wird als Normalverteilungsfunktion nach Gauß angegeben (CRAMER & NEŠLEHOVÁ 2005):

$$f(ED_i, xq, sd) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}sd} e^{-\left(\frac{(ED_i - xq)^2}{2sd^2}\right)} \quad (\text{Gleichung 17})$$

Nach den Häufigkeitsverteilungen lassen sich charakteristische Typen unterscheiden, die Rückschlüsse auf Variationen in Dosisabsorption und Bleichungsgrad zulassen. In fluvialen Ablagerungen deutet eine positiv gestreckte Häufigkeitsverteilung mit großer Streuung der ED v.a. eine heterogene Bleichung an, wohingegen gut gebleichte Proben eine weit geringere Streuung haben und symmetrischer erscheinen (DULLER 1994, HILGERS et al. 2001, ARNOLD et al. 2007). Polymodale Verteilungen über einen weiten ED-Bereich sprechen für komplexe Wirkungszusammenhänge von heterogener Bleichung, postsedimentäre Umlagerungen und mikrodosimetrische Inhomogenitäten. Der ermittelte Verteilungstyp kann (in Grenzen) als

Kriterium zur Auswahl des geeigneten Altersmodells herangezogen werden (GALBRAITH et al. 1999, ARNOLD et al. 2007).

Auf den zusätzlichen Einfluss der Kornzahl pro Aliquot auf die Streuung weisen OLLEY et al. (1998), FUCHS & WAGNER (2003) und FUCHS et al. (2005) hin. Ausgehend davon, dass die ED eines Aliquots aus dem Mischsignal unterschiedlich gebleichter Körner hervorgeht, gilt: je größer die Kornzahl, desto mehr nähert sich ED dem Mittelwert der gesamten Probe an. Bei Verwendung kleiner Aliquots (200 – 500 Körner) können mit größerer Wahrscheinlichkeit die Komponenten des Mischsignals getrennt gemessen werden. Daraus ergibt sich die größere Streuung der ED aus kleinen Aliquots. Untersuchungen von FUCHS & WAGNER (2003) zur Erkennung unzureichender Bleichung schlagen eine relative Standardabweichung (Variationskoeffizient  $v$ )  $> 10\%$  als Grenzwert für kleine Aliquots vor.

$$v = \frac{sd * 100}{xq} \quad \text{(Gleichung 18)}$$

- $v < 10\%$  → Bleichung ausreichend, Variation v.a. natürl. Ursprungs
- $v > 10\%$  → Bleichung unzureichend

Der Einfluss der Korngröße auf das Ausmaß der Bleichung wurde neben OLLEY et al. (1998) auch von FUCHS et al. (2005) anhand von Restsignalen in Elbeflut-Sedimenten von 2002 untersucht. Die Korngröße hängt danach stark mit der Art des Transports zusammen. Typischerweise wird Schluff in Suspension transportiert. Sand und Kies dagegen i.d.R. tiefer in der Wassersäule (bed loads). Da Schluff aber häufig koaguliert (verklumpt) und die Körner im inneren der Aggregate lichtgeschützt sind, verhält er sich während des Transports ähnlich den Sandkörnern. Bei Fein- und Grobkorn-Fractionen wurden Restsignale gemessen, die bei Feinkorn tendenziell leicht geringer ausfallen evtl. aufgrund längerer Transportstrecken. Für eine endgültige Einschätzung des Bleichungsgrades einer Probe anhand der Streuung sollte der Einfluss weiterer Faktoren auf die ED-Variation wie die probenspezifische Variabilität des DR-Tests, die Mikrodosimetrie im Sediment und postsedimentäre Umlagerungen berücksichtigt werden (HILGERS 2008, persönliche Mitteilung). Das Erkennen und Abgrenzen schlechter Bleichung leistet einen entscheidenden Beitrag zur Bestimmung der PD ohne störende Restsignale aus früheren Sedimentationszyklen. Die Einschätzung des Bleichungsgrades mittels statistischer Methoden soll zu einer für das Sedimentationsalter repräsentativen PD führen.

### 3.4.2 Statistische Methoden

**MURRAY et al. (1995)** fanden in ihren Untersuchungen an jungen fluvialen Ablagerungen (90 – 250 µm) eine generell gute Bleichung mit einem nur kleinen Anteil schlecht gebleichter Quarzkörner vor. Die ED-Häufigkeitsverteilungen waren positiv gestreckt und wiesen einzelne, deutlich abgesetzte obere Extremwerte auf, die schlecht gebleichten Körnern zugeschrieben wurden. Um die „Kontamination“ von xq durch diese Extrema zu kompensieren schlugen sie vor, die *drei höchsten ED* aus der Berechnung des arithmetischen Mittels zu nehmen.

$$PD_M = \frac{1}{N-3} \sum_{i=1}^{N-3} ED_i \quad (\text{Gleichung 19})$$

$$sd_M = \sqrt{\frac{1}{N-3} \sum_{i=1}^{N-3} (ED_i - PD_M)^2} \quad (\text{Gleichung 20})$$

**OLLEY et al. (1998)** untersuchten die ED-Verteilung kleiner Aliquots an Quarzen junger fluvialer Ablagerung. Sie erklären die beobachtete große Reichweite und deutliche Asymmetrie der Häufigkeitsverteilungen mit einer Mischung aus wenigen schlecht und zahlreichen gut gebleichten Körnern. Messungen unterschiedlicher Korngrößen (90 – 212 µm) zeigten, dass die niedrigsten ED der unterschiedlichen Fraktionen etwa im gleichen Abstand zu Null liegen (offset from zero). Mit kleiner werdender Korngröße nimmt von diesem Offset-Punkt generell die Streuung und das arithmetische Mittel zu. Dies deutet an, dass die gröberen Fraktionen besser gebleicht waren, aber alle Fraktionen enthalten auch einen Anteil schlecht gebleichter Körner. Daraus wird abgeleitet, dass der unterste Anteil der ED-Verteilung am besten die seit Sedimentation akkumulierte Dosis repräsentiert. Nach ihren Untersuchungen lieferten die untersten 5 % der Werte (*low5%*) die PD.

$$PD_o = \frac{1}{N_{low5\%}} \sum_{i=1}^{N_{low5\%}} ED_i \quad (\text{Gleichung 21})$$

$$sd_o = \sqrt{\frac{1}{N_{low5\%}} \sum_{i=1}^{N_{low5\%}} (ED_i - PD_o)^2} \quad (\text{Gleichung 22})$$

$N_{low5\%}$  ... 5 % der Anzahl N

i ... 1 bis  $N_{low5\%}$

**GALBRAITH et al. (1999)** stellen für single und multiple grain Aliquots mehrere Altersmodelle vor, die je nach Voraussetzungen angewandt werden können. Die folgenden Darstellungen beschränken sich auf das „*Common Age Modell*“. Es geht von einer relativ gut gebleichten Probe aus, in der alle ED einen allgemeinen Wert (Common Age) mit gleichverteilter Abweichung wiedergeben. Unter diesen Bedingungen ist das *präzisionsgewichtete Mittel* ( $xq_{wi}$ ) geeignet, die akkumulierte Dosis (burial dose D) zu berechnen. Die ED-Verteilung wird über eine Transformation der Werte nach dem natürlichen Logarithmus (LN) bestimmt. Die Wichtung der LN(ED) ergibt sich aus dem relativen ED-Fehler ( $se_i = \text{Fehler} / \text{ED}$ ):

$$LN(PD_G) = \frac{\sum w_i * LN(ED_i)}{\sum w_i} \quad (\text{Gleichung 23})$$

$$LN(sd_G) = \frac{1}{\sqrt{\sum w_i}} \quad (\text{Gleichung 24})$$

i ... Aliquot 1 bis N  
 $w_i$  ... Wichtungsfaktor ( $1 / se_i^2$ )

**FUCHS & LANG (2001)** stellten auf Grundlage von Untersuchungen an Quarzen der Grobkornfraktion (90 – 200  $\mu\text{m}$ ) aus fluvialen Ablagerungen ein Verfahren zum Ausschluss schlechter Bleichung bei kleiner Aliquotszahl vor. Sie nutzen den in mehreren DR-Tests ermittelten Variationskoeffizient ( $v_{DR}$ , Gleichung 11, 12) als Maß für die spezifische Variabilität der Probe. Eine relative sd ( $v$ ) der gesamten Probe größer als  $v_{DR}$  schreiben sie partiell schlechter Bleichung zu. Entsprechend sind die niedrigsten gemessenen ED die am besten gebleichten Aliquots, aus denen das wahre Sedimentationsalter berechnet werden sollte. Mikrodosimetrische Inhomogenitäten des Sediments als Komponente der natürlichen Variation werden als nicht signifikant eingeschätzt. Aus den aufsteigend sortierten ED werden, beginnend mit den zwei niedrigsten Werten, fortschreitend *gleitende Mittelwerte* ( $xq-g_i$ ) gebildet. Die PD entspricht dem  $xq-g_i$  bei dem die relative  $sd_i$  die probenspezifische Variabilität ( $v_{DR}$ ) erstmalig gerade überschritten hat:

$$PD_F = xq - g_i \quad (\text{Gleichung 25})$$

$$sd_F = sd_i = \sqrt{\frac{1}{N_i} \sum (ED_i - PD_F)^2} \quad (\text{Gleichung 26})$$

i ... minimaler Index, bei dem gilt:  $sd_i / (xq - g_i) * 100 > v_{DR}$

Untere Ausreißer lassen sich abgrenzen, wenn  $v_{DR}$  gleich beim ersten gleitenden Mittelwert überschritten wurde. Es sollte anhand der Gesamtverteilung abgeschätzt werden, ob nicht vielleicht zufällig zwei untere Ausreißer nah beieinander liegen und somit eine geringe relative Standardabweichung ergeben.

**LEPPER & MCKEEVER (2002)** liefern mit dem *leading edge model* eine weitere probenspezifische Herangehensweise um den gut gebleichten Dosisanteil zu identifizieren. Sie orientiert sich an der Häufigkeitsverteilung der Gesamtmenge an ED zur Entscheidung, welcher Dosisbereich das Alter repräsentiert. Die ED-Häufigkeitsverteilung wird als Histogramm veranschaulicht. Die Festlegung der Klassenweite nach dem Median der ED-Fehler berücksichtigt die Präzision der einzelnen ED-Bestimmungen. Vereinfacht wird den Klassenmitten die Anzahl an ED zugeordnet.

Da während Erosion und Transport das OSL-Signal der Quarzkörner nicht weiter als bis Null rückgestellt wird, kann ein „Kanten-Effekt“ (edge effect) im aufsteigenden Ast der ED-Verteilung auftreten. Diese Kante wird mit den best-gebleichten Körnern assoziiert. Somit sollte innerhalb der „leading edge“ die für das Alter repräsentative PD liegen und dessen Weite die natürliche Variabilität in etwa widerspiegeln. Auf den aufsteigenden Ast des Histogramms wird die Normalverteilungsfunktion (Gleichung 17) angewandt und die Standardabweichung berechnet. Die zweite Ableitung dieser Funktion ergibt die Paläodosis mit der zugehörigen halbierten Standardabweichung.

$$PD_L = \mu - \sigma \quad \text{(Gleichung 27)}$$

$$sd_L = \frac{2}{\sigma} \quad \text{(Gleichung 28)}$$

$\mu$  ... Mitte der Klasse mit absolut häufigsten ED-Zahl

$\sigma$  ... Standardabweichung für  $ED_i \leq \mu$

Die Fixierung von  $\mu$  der Normalverteilungsfunktion in Höhe des Dosiswertes der absolut häufigsten Klasse zeigte in Untersuchungen von Woda & Fuchs (2008) eine von der Anzahl verwendeter ED (Aliquots) unabhängige, robuste PD. Dabei zeigen Ergebnisse bei wenigen Aliquots zur Anpassung der Normalverteilungsfunktion größere Unsicherheiten für die Bestimmung von bekannten Sedimentationsaltern. Innerhalb der Fehlerbereiche wurden vergleichbare Ergebnisse erzielt wie mit der Methode nach FUCHS & LANG (2001). Es kann daher als alternatives Verfahren bei heterogen gebleichten Material herangezogen werden.

An einem ausgewählten Vergleichsprofil auf Bunge-Land wird getestet, inwieweit die vorgestellten Verfahren methodisch auf die Dosisverteilung der Proben eingehen und wie gut mit ihnen die parallelen  $^{14}\text{C}$ -Alter reproduziert werden können (Kap. 5.1). Die daraus gewonnenen Schlussfolgerungen finden anschließend Berücksichtigung in den Auswertungen der Untersuchungsprofile im Lena-Delta (Kap. 5.2).

## 4 PROBENAHE UND PROBENAUFBEREITUNG

### 4.1 Probennahme

Während der Lena-Delta Expeditionen 1998, 2002 und 2005 wurden an vier Aufschlüssen und einem Bohrkern im Lena-Delta, an denen schon verschiedentliche Studien erfolgten, sowie drei Subprofilen von Bunge-Land insgesamt 19 Proben für OSL-Untersuchungen genommen (Kap. 2.3). Die Probenahme orientierte sich allgemein an den Aufschlussbedingungen und Sedimenteinheiten (SCHWAMBORN et al. 1999). Die Profile wurden gereinigt und beschrieben. Besonderes Augenmerk gilt dem Probenumfeld (Materialzusammensetzung, Homogenität der beprobten Schicht und Nähe zu differenten benachbarten Schichten).

Da das zu messende OSL-Signal lichtsensitiv ist, muss während der Probenahme sowie der anschließenden Aufbereitung (Kap. 4.2) absolut auf den Schutz gegen Lichtexposition geachtet werden. Ebenso muss eine Erwärmung  $> 60^{\circ}\text{C}$  außerhalb der in Mess-Sequenz festgelegten Prozedur wegen möglichem Ladungstransfers bis hin zum Signalverlust vermieden werden.

Erst direkt vor der Probenahme wurde die lichtexponierte Oberfläche der Profilwand (0,5 – 1 m) entfernt und damit der Probenansatzpunkt freigelegt. Für gefrorenes Sediment wurde eine Handbohrmaschine mit speziellem Bohraufsatz verwendet um die Proben in lichtdichte schwarze Plastik-Zylinder (Länge: 14,8 cm,  $\varnothing$  innen: 5,0 cm, V: 291 cm<sup>3</sup>) zu überführen. In ungefrorenem Sediment wurden die Zylinder mit einem Hartgummi-Hammer direkt in die Profilwand geschlagen (KRBETSCHKE et al. 2002).

Die Zylinder samt Proben wurden anschließend ausgegraben, verschlossen und gut abgedichtet um jeglichen Wasserverlust zu vermeiden. Zusätzlichen Lichtschutz gewährleistete das doppelte Einpacken in schwarze Plastikbeutel. Die Beschriftung kennzeichnet die Lokalität, die Nummer der OSL-Probe und um eine Vermischung des Probenmaterials zu vermeiden auch die Bohrlage des Zylinders. Parallel zu den jeweiligen OSL-Proben wurde gesondert Material für die Gammaskopimetrie zur Bestimmung der Radionuklide genommen (Gamma-Proben).

Die Proben wurden in der SAW in Freiberg bzw. im AWI in Potsdam gelagert und letztendlich im Lumineszenzlabor in Freiberg aufbereitet und gemessen. Die Radionuklidanalysen wurden am Institut für Angewandte Physik der TU Bergakademie Freiberg durchgeführt.

## 4.2 Probenaufbereitung

### 4.2.1 Bestimmung des Wassergehalts

Für die Bestimmung des Wassergehalts wurde das von jedem Zylinderende entfernte Probenmaterial (1 – 2 cm) genutzt, welches probenahmebedingt eventuell einer Lichtexposition ausgesetzt war. Der in situ Wassergehalt ( $W_i$ ) wurde ermittelt, indem die frische Probe ( $P_f$ ) gewogen, im Trockenschrank bei 60 °C getrocknet und anschließend erneut gewogen ( $P_{tr}$ ) wurde. Den prozentualen in situ Gehalt gibt  $\Delta_i$  an.

$$W_i = P_f / P_{tr} \quad (\text{Gleichung 29})$$

$$\Delta_i = (P_f - P_{tr}) / P_{tr} * 100 \quad (\text{Gleichung 30})$$

Um die Sättigung ( $W_s$ ) zu ermitteln wurden die trockenen Proben ( $P_{tr}$ ) wieder gewogen. Anschließend wurden sie mit 100 ml destilliertem Wasser aufgefüllt, gut durchmischt und 5 min. bei 2230 rpm zentrifugiert. Das überstehende Wasser wurde abgesaugt und die gesättigte Probe gewogen ( $P_s$ ).

$$W_s = P_s / P_{tr} \quad (\text{Gleichung 31})$$

$$\Delta_s = (P_s - P_{tr}) / P_{tr} * 100 \quad (\text{Gleichung 32})$$

Ein möglichst über den Datierungszeitraum repräsentativer Wassergehalt wird für die Korrektur der DL (Kap. 3.2.3) aus  $\Delta_i$  und  $\Delta_s$  sowie unter Berücksichtigung des Lagerungskontextes abgeschätzt.

#### 4.2.2 Separation der Quarz-Grobkornfraktion

Im sonst abgedunkelten Labor wurden die Proben unter abgeschwächtem Rotlicht (da OSL-Signal hier die geringste Sensitivität zeigt, FUCHS 2001) aufbereitet und selbst diesem möglichst kurz ausgesetzt.

Die OSL-Probe ohne Randbereich wurde vollständig aus dem Zylinder entfernt und im Trockenschrank bei 60° C getrocknet. In einer ersten Siebung wurden die Fraktionen 100 – 200 µm separiert. Die Probe Tur-OSL-6 war sehr organikreich und wurde daher nass gesiebt. Die OLE-Proben aus früheren Untersuchungen (KRBETSCHEK et al. 2002) und die Bunge-Proben lagen in den Fraktionen 160 – 200 µm vor.

Die Entfernung von Karbonaten erfolgte mit HCl (10 %) und die von organischen Bestandteilen mit H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (30 %). Um eine Überhitzung durch eine zu starke Reaktion zu vermeiden, wird vorerst mit ein paar Tropfen angetestet. Allgemein traten eher schwache Reaktionen auf. Nach dem vollständigen Abgeklingen der Reaktion wurde die Probe mit destilliertem Wasser neutral gewaschen (pH-Wert-Kontrolle) und getrocknet.

Zur Trennung von Quarz und Feldspat wurden Flotationen durchgeführt. Dafür wurden je 30 – 35 g der Probe in die Flotationszelle (Fritte) gegeben, mit 0,2 %iger HF versetzt und auf einen pH-Wert zwischen 2,4 – 2,7 (je nach Eichung zuvor) mit H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> bzw. destilliertem H<sub>2</sub>O eingestellt. Als Kollektor diente Dodecylamin (3 ml), das den Feldspat an Blasen geheftet aufsteigen lässt, wo er gesondert aufgefangen werden kann. Die Gaszufuhr durch den Boden der Fritte und die Probe wurde über eine Pumpe geregelt. Da die Flotation je 40 min. beanspruchte, wurde der gesamte Aufbau mit schwarzen Plastiktüten abgedeckt. Gelegentlich wurde die Probe umgerührt und die Pumpeneinstellung überprüft.

Nach dem erneuten neutral Waschen (5 %ige HCl, destilliertes Wasser) und Trocknen der Probe folgten zwei Dichtentrennungen nach der spezifischen Dichte von Quarz.

Die Probe wurde in der ersten Trennung mit Natriummetawolframat der Dichte 2,62 g/ cm<sup>3</sup> für zwei mal 20 min. bei 2500 rpm zentrifugiert, wodurch leichtere Anteile aufschwammen und entfernt werden konnten. Anschließend wurde der gleiche Vorgang mit Natriummetawolframat der Dichte 2,67 g/ cm<sup>3</sup> wiederholt um schwerere Bestandteile (Schwerminerale, eisenummantelte Quarzkörner) absinken zu lassen und zu isolieren. Die nun vorliegenden Quarze der Fraktion 100 – 200 µm wurden wieder neutral gewaschen und getrocknet.

Abschließend folgten zwei Ätzungen um den äußeren Rand der Quarzkörner ( $\alpha$ -DL-Komponente, Kap. 3.2.3) und angewachsene Fremdminerale vollständig zu entfernen. Dafür wurden die Proben in 40 %iger HF (250 ml) über 40 min. gegeben. Danach wurden die Proben neutral gewaschen, für 30 min. mit 37 %iger HCl (250 ml) ruhen gelassen und wieder neutralisiert. Pro Ätzung wurde eine 10 µm Schicht entfernt (Durchmesserreduktion um 20 µm). In einer 2. Siebung wurden die Quarzkörner einheitlich auf die Fraktionen 90 – 160 µm begrenzt (Abb. 17).

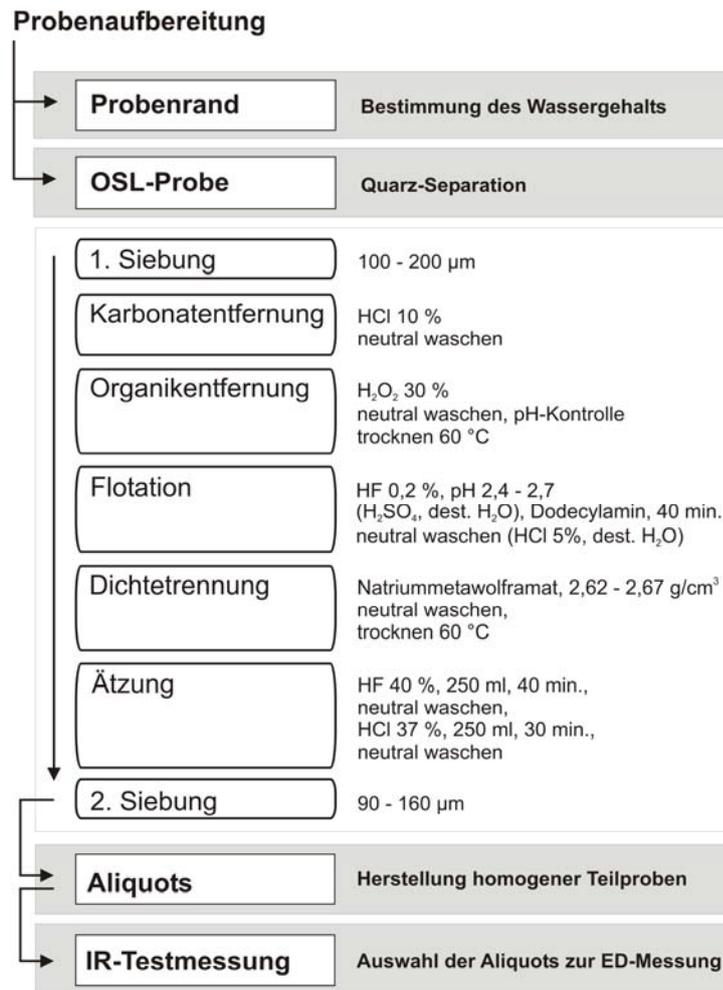


Abb. 17: Schematischer Ablauf der Probenaufbereitung im Lumineszenzlabor der SAW-Freiberg (bei abgeschwächten Rotlicht, nach: STEIN 2007, persönliche Mitteilung)

#### 4.2.3 Herstellung homogener Teilproben

Zur Herstellung der Aliquots, homogener Teile der gesamten Probe, wurden die separierten Quarzkörner mit Silikonspray auf Alutellerchen in einem Durchmesser von 0,4 cm fixiert. Lose Körner wurden entfernt.

IR-Testmessung dienten der Überprüfung des Feldspatgehalts, der bei blauer Stimulation ebenfalls zum Signal beiträgt, wohingegen Quarz gegenüber IR-Licht nicht sensitiv ist. Durch wiederholte Ätzung konnte er weitestgehend entfernt werden.

Aus den Aliquots wurden die mit nicht signifikantem IR-stimuliertem Signal für die eigentliche ED-Bestimmung ausgewählt, je Messvorgang 24 Stück auf dem Probenkarussell des Risø Reader platziert, wie in Kap. 3.3 beschrieben gemessen und statistisch ausgewertet (Kap. 3.4). Konnte mit der ersten SAR-Messreihe nur wenige natürlichen OSL-Signale bestimmt werden, wurde eine zweite Messreihe mit angepasster Sequenz durchgeführt.

## 5 ERGEBNISSE

### 5.1 Ergebnisse zur Bestimmung der Gesamtdosisleistung in den Untersuchungsgebieten

#### 5.1.1 Bunge-Land

Die kosmische DL (D-Rate) beträgt in den Subprofilen Bun-4, 5, und 7 abhängig von der Sedimentüberdeckung (0,4-0,7 m) 192-198 mGy/ ka. Nur die in 3 m Tiefe gelegene Bunge-1 erhielt geringere Dosen von 144 mGy/ ka (Abb. 18).

Zur Bestimmung des Urananteils an der DL in den Subprofilen Bun-4 und 5 wurde über  $^{226}\text{Ra}$  aus  $^{214}\text{Bi}$ / $^{214}\text{Pb}$  spezifische Aktivitäten von 11,6-12,8 Bq/ kg gemessen. Die Zerfallsglieder nach  $^{226}\text{Ra}$  bestimmen generell leicht niedrigere Werte für U als die vorhergehenden. Aus diesem Grund ist ein Radonverlust, bei Bunge-1 und Bunge-2 eventuell eher eine geringe Mobilisierung von  $^{234}\text{U}$  möglich, da hier schon die Bestimmung direkt aus  $^{226}\text{Ra}$  erniedrigte Werte zeigt. Die Fehlerbereiche überlappen sich aber nur bei Bunge-2 nicht mehr, daher muss allgemein nicht von einem signifikanten Ungleichgewicht ausgegangen werden. Die Werte der  $^{232}\text{Th}$ -Reihe liegen bei 15,3-16,3 Bq/ kg, die für Bunge-2 sind erhöht bei 18,7 Bq/ kg. Die U- und Th-Aktivitäten der Proben von Bun-7 sind insgesamt etwas niedriger. Die spezifische Aktivität von  $^{40}\text{K}$  liegt in allen Subprofilen bei ca. 624-635 Bq/ kg (Anhang, A3).

Die beiden relativ oberflächennahen und dabei > 11 m ü.d.M gelegenen Proben Bunge-2 und Bunge-3 haben die geringsten in situ Wassergehalte (9,7 bzw. 11,4 Gew.-%) gegenüber der Sättigung (29,8 bzw. 32,7 Gew.-%). Beide Proben stammen aus dem ungefrorenem Sediment der Auftauschicht, in der das Wasser im Sommer (während Probenahme) in seiner mobilen Phase vorliegt und abfließen bzw. verdunsten kann, während es sich im Winter erneut anreichert. Um diese saisonalen Schwankungen des Wassergehalts und die Schwankungen über die gesamte Sedimentationsperiode zu berücksichtigen, wird eine Unsicherheit des Wassergehalts im Sediment von 10 % einbezogen.

An Bunge-1, Bunge-4 und Bunge-5 wurden in situ Werte von 20-24 Gew.-% gegenüber einer Sättigung von 25-33 Gew.-% gemessen. Die hohen Gehalte, die nur gering von der Sättigung abweichen, begründen sich im gefrorenem Zustand (Wasserspeicherung) und/oder der geringen Lage ü.d.M (nahe Grundwasser, Überflutungsbereich des Meeres). Der Schwankungsbereich beträgt etwa  $\pm 5$  Gew.-%.

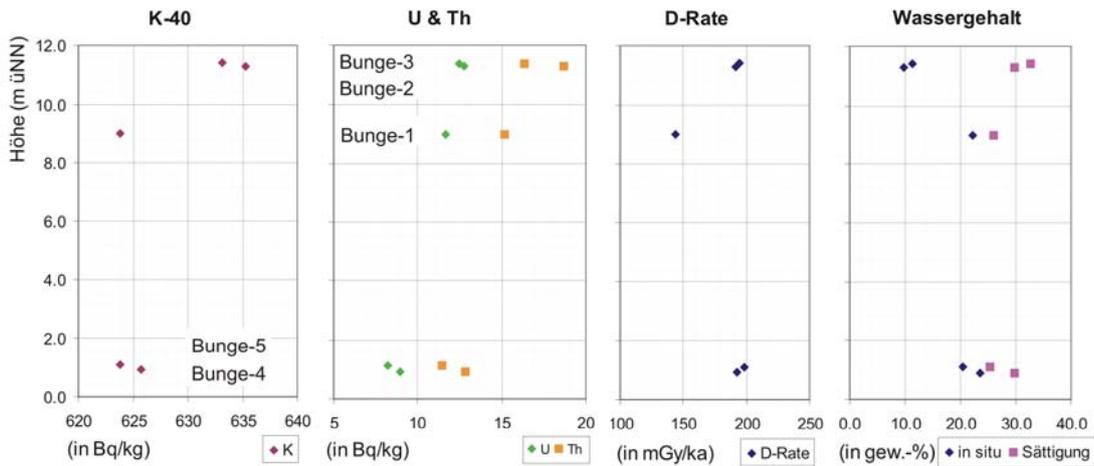


Abb. 18: Ergebnisse der Gammasppektrometrie von Bunge-Land, Neusibirische Inseln (K-40: Kalium-40; U: Uran-238-Reihe; Th: Thorium-232-Reihe, der kosmischen Dosisleistung (D-Rate) und des Wassergehalts)

### 5.1.2 Nagym-Sektion und Kurungnakh-Sektion

Die Ergebnisse der Gammasppektrometrie und der Bestimmungen zum Wassergehalt wurden aus KRBETSCHKEK et al. (2002) übernommen. Die kosmische DL berechnete sich nach den Lageparametern. Die mächtigen Sedimentdecken von 21 bis 29 m schwächen die kosmische DL auf 19 bis 30 mGy/ka ab (Abb. 19).

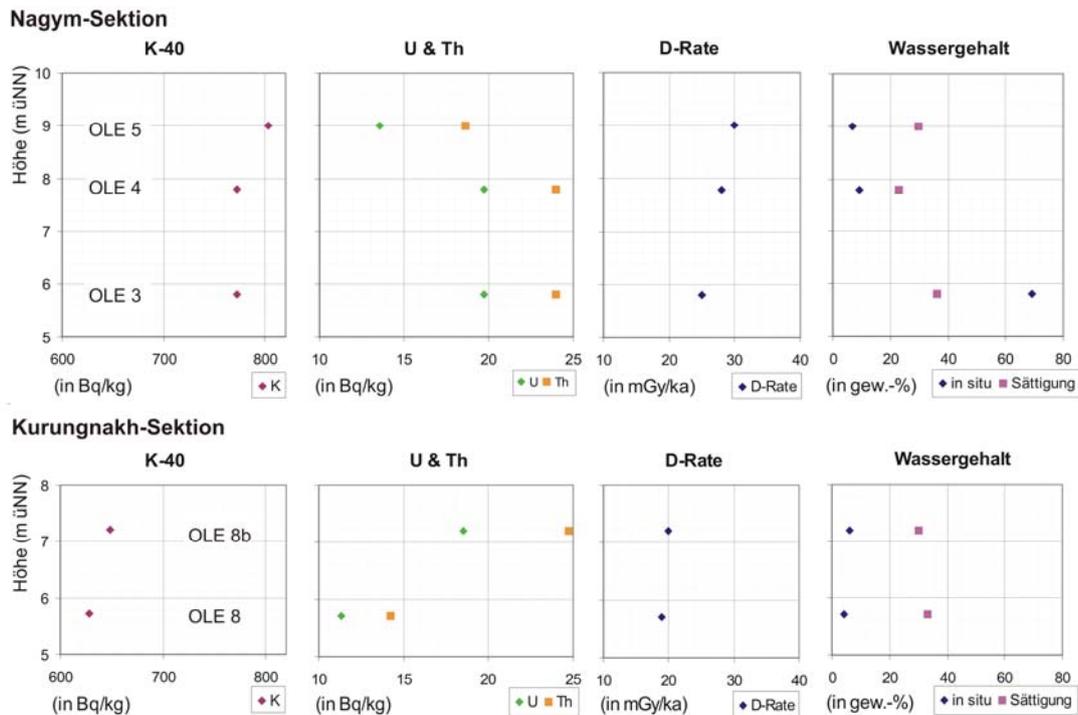
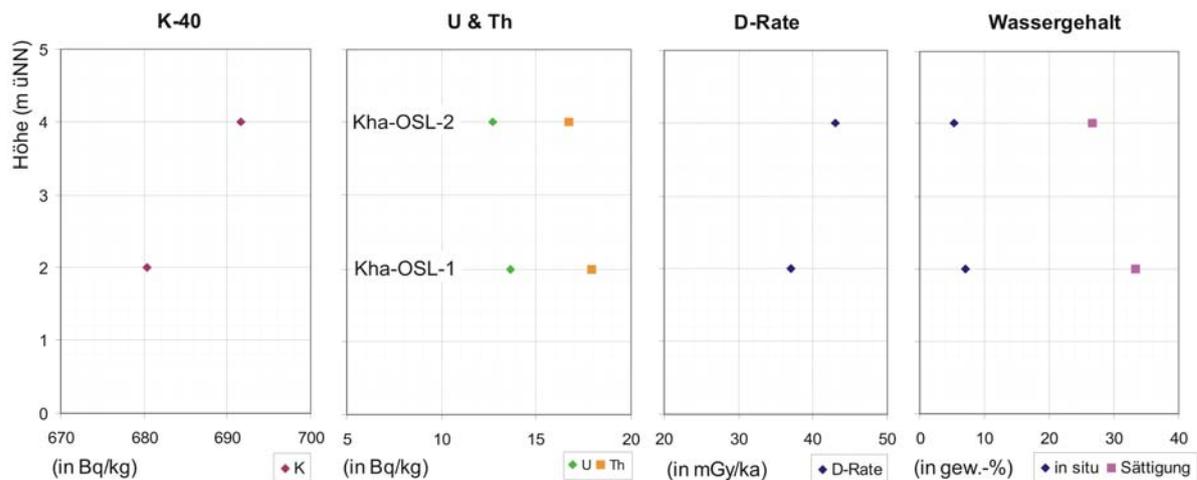


Abb. 19: Ergebnisse der Gammasppektrometrie der Nagym- und Kurungnakh-Sektion (K-40: Kalium-40; U: Uran-238-Reihe; Th: Thorium-232-Reihe, der kosmischen Dosisleistung (D-Rate) und des Wassergehalts)

### 5.1.3 Khardang-Sektion

Auf die DL der beprobten Sedimente von Khardang-Sise hat die kosmische Strahlung wegen der mächtigen Sedimentdecke (18 und 16 m) geringe Auswirkung (37 und 43 mGy/ ka). In der  $^{238}\text{U}$ -Reihe von Kha-OSL-1 treten keine Ungleichgewichte auf, dagegen könnte in Kha-OSL-2 ein Radon-Verlust vorliegen. Die spezifischen Aktivitäten beider wurden mit ca. 13 Bq/ka bestimmt. Die Aktivitäten der  $^{232}\text{Th}$ -Reihe liegen bei etwa 18 bzw. fast 17 Bq/ kg.  $^{40}\text{K}$  wurde mit 680 bzw. 692 Bq/ kg bestimmt. Die in situ Werte der Wassersättigung waren sehr niedrig mit 7,0 und 5,3 Gew.-% gegenüber einer Sättigung von 33,4 und 26,6 Gew.-% (Abb. 20).



**Abb. 20: Ergebnisse der Gammaskopie der Khardang-Sektion** (K-40: Kalium-40; U: Uran-238-Reihe; Th: Thorium-232-Reihe, der kosmischen Dosisleistung (D-Rate) und des Wassergehalts)

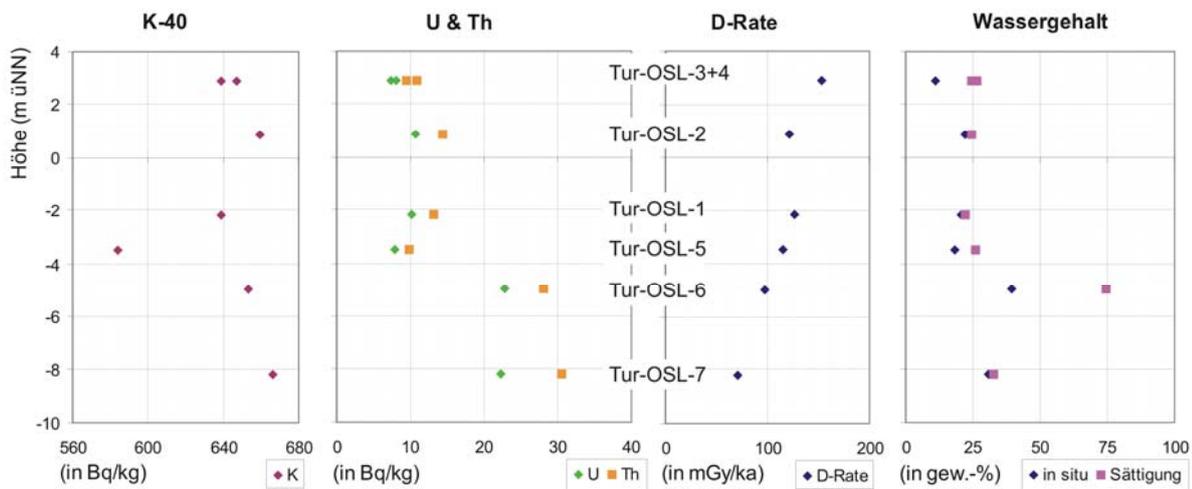
### 5.1.4 Turakh-Sektion

Mit zunehmender Sedimentdecke (2,5-9,8 m) nimmt die kosmische DL, der die Proben ausgesetzt waren, von 153 auf 71 mGy/ ka ab. Dieser Trend wird sowohl in Tur-1 als auch in Tur-2 nachvollzogen (Abb. 21).

Anhand der Radionuklidanalyse der  $^{238}\text{U}$ -Reihe konnten keine radioaktiven Ungleichgewichte festgestellt werden. Nur für Tur-OSL-3 schwanken die Werte über die jeweiligen Fehlerbereiche hinaus. Es konnte aber keine eindeutige An- oder Abreicherungstendenz nachvollzogen werden. Zum Teil niedrige U-Aktivitäten zeigten Tur-OSL-1 bis 5 (7-11 Bq/ kg), wohingegen in den tiefer gelegenen Tur-OSL-6 und 7 deutlich höhere Werte von ca. 22,5 Bq/ kg auftreten. Beide liegen in organikreichen Schichten bzw. Schichten mit organikreichen Einschlüssen, deren pflanzliches Material Uran unter Komplexbildung bindet. Ob dies begründet ist in einer Zufuhr aus den hangenden uranärmeren Schichten, ist nicht geklärt. Die  $^{232}\text{Th}$ -Ergebnisse folgen dem Trend der U-Werte, ihre spezifischen Aktivitäten sind aber generell etwas höher (ca. 9,5 bis 30,5 Bq/ kg). Die Aktivität von  $^{40}\text{K}$  ergab 639-667 Bq/ kg, Tur-OSL-5 liegt niedriger bei 584 Bq/ kg.

Die Proben entstammen sämtlich dem dauernd gefrorenem Bereich unterhalb des active layer.

Die in situ Wassergehalte der Proben Tur-OSL-1,2 und 7 lagen nahe der Sättigung (22 – 33 Gew.-%). In Tur-OSL-4 und 5 liegt der in situ Gehalt deutlich darunter. Für Tur-OSL-3 zeigt der gegenüber der Sättigung erhöhte in situ Wert (26,3 Gew.-%) eine leichte Übersättigung des Sediments an (Profilbereich mit gitterartiger Struktur aus Eisadern). Die organikreiche Tur-OSL-6 zeigte neben hohem in situ Wassergehalt (ca. 40 Gew.-%) eine extrem hohe Sättigung (74,4 %).



**Abb. 21: Ergebnisse der Gammaskpektrometrie der Turakh-Sektion** (K-40: Kalium-40; U: Uran-238-Reihe; Th: Thorium-232-Reihe), der kosmischen Dosisleistung (D-Rate) und des Wassergehalts)

## 5.2 Ergebnisse der statistischen Untersuchungen auf Bunge-Land

### 5.2.1 Vergleichsprofil (Bun-4)

#### Bunge-1

Insgesamt wurde an 44 Aliquots die ED gemessen und an 4 Aliquots DR-Tests durchgeführt. Nach den genannten Kriterien sind 36 ED für OSL-Untersuchungen geeignet (vgl. Anhang, A4 & A5). Die Verteilung der 36 ED (Abb. 22) zeigt eine große Reichweite (Min.:  $17,78 \pm 2,304$  Gy; Max.:  $68,45 \pm 15,996$  Gy) und führt zu einem arithmetischen Mittel ( $x_q$ ) mit hoher Standardabweichung (sd) ( $34,29 \pm 9,689$  Gy,  $v = 28,3$  %). Diese hohe Streuung spricht für eine heterogene Bleichung der Probe. Da  $x_q$  auch die ED schlechter Bleichung einbezieht, ergibt sich eine deutliche Altersüberschätzung von  $> 4100$  a im Vergleich mit dem entsprechenden  $^{14}\text{C}$ -Alter. Die Berechnung des Medians (md) liegt leicht darunter mit  $> 3300$  a zuviel (Tab. 10).

In DR-Tests konnte die applizierte Dosis mit einer DR-Ratio von  $0,97 - 1,01$  ( $v_{\text{DR}} = 2,3$  %) sehr gut mit der angewandten SAR-Sequenz bestimmt werden, was auf eine niedrige natürliche Variabilität mit starkem Zusammenhang von Dosis zu OSL-Signal deutet. Selbst wenn man von einer höheren natürlichen Schwankungsbreite (z.B.  $4 - 8$  %, vgl. FUCHS & LANG 2001) durch inhomogenes Sediment ausgeht, ist die gemessene Variabilität der ED deutlich größer und unterstützt die These einer mindestens partiell schlechten Bleichung.

Durch das Entfernen der drei höchsten Werte, wie es MURRAY et al. (1995) vorschlugen und die hier auch deutliche Extrema darstellen, wurde die Reichweite der ED-Verteilung auf  $17,78 - 43,77$  Gy eingegrenzt, die Streuung ist aber noch immer hoch. Es berechnet sich eine PD die dem md vergleichbar ist bei geringerer  $v$  ( $19,9$  %).

Die niedrigsten 5 % (low5%), die bei OLLEY et al. (1998) den am besten gebleichten Dosisanteil darstellen, entsprechen hier 1,8 Werten ( $N = 36$  ED). Zur Berechnung wurden die zwei niedrigsten ED genutzt, aus denen sich ein  $x_q$  von  $20,15 \pm 2,589$  Gy ( $v = 12,8$  %) ableitet. Da die niedrigste ED auffällig geringere Dosiswerte zeigt, wurde sie als unterer Extremwert (Ausreißer) ausgeschieden ( $5$  % von  $35$   $N = 1,75$ ) und  $x_q$  erneut aus der zweiten und dritten ED mit  $22,89 \pm 0,616$  Gy berechnet. Die sd reduziert sich dabei auf ein Viertel, was für die Interpretation von ED1 als unteren Ausreißer sprechen könnte. Die nach diesem Verfahren ermittelten Alter liegen etwa  $2700$  a bzw.  $1400$  a unter dem parallelen  $^{14}\text{C}$ -Alter. Erst wenn man von drei unteren Ausreißern ausgehen würde, kann das Alter mit einer Unterschätzung von ca.  $100$  a relativ genau reproduziert werden.

Für das „Common Age Model“ nach GALBRAITH et al. (1999) wurden die ED mit dem natürlichen Logarithmus (LN) transformiert. Die sich daraus ergebende Häufigkeitsverteilung zeigte bei 15 Klassen ein recht differenziertes Bild mit polymodaler bzw. leicht rechtsschiefer Verteilung. Dies könnte auf eine Überkompensation durch die LN-Transformation hinweisen. An beiden Enden sind einzelne Klassen mit je einer ED deutlich abgesetzt vom Rest der Werte (Ausreißer?). Das präzisionsgewichtete Mittel  $x_{q_{wi}}$  ergab  $32,34 \pm 0,559$  Gy und ist

vergleichbar mit der PD nach md sowie nach MURRAY et al. (1995). Auffällig ist dagegen die extrem niedrige sd ( $v = 1,7\%$ ). Ohne Transformation liegt die PD leicht höher.

FUCHS & LANG (2001) nutzen die DR-Tests zur Bestimmung der natürlichen Variabilität, deren  $v_{DR}$  der Probe 2,3 % beträgt. Der gleitende Mittelwert überschreitet diesen Grenzwert gleich im ersten Schritt (ED1 – ED2) mit einer relativen sd von 12,8 %. In diesem Fall wird ED1 als unterer Ausreißer betrachtet (FUCHS 2008, persönl. Mitteilung) und die Berechnung mit ED2 beginnend wiederholt. Die abgeleitete PD  $23,72 \pm 1,482$  Gy ( $v = 6,2\%$ ) ergibt dann eine Altersunterschätzung von  $< 1000$  a. Bei der Annahme von mehreren unteren Ausreißern (ED1 – ED3) wurde die PD mit  $26,1 \pm 1,017$  Gy ( $v = 3,9\%$ ) bestimmt, die das  $^{14}\text{C}$ -Alter gut widerspiegelt. Die PD würde sich ebenso erhöhen, nähme man eine größere natürliche Variabilität als die unter Laborbedingungen gemessene  $v_{DR}$  an und sogenannte untere Ausreißer wären weniger relevant.

Die Häufigkeitsverteilung nach LEPPER & MCKEEVER (2002) ergab eine polymodale deutlich rechtsschiefe Kurve, in der die dritte Klasse die absolut meisten ED enthielt. Deren Klassenmitte (28,67 Gy) bildete den zentralen Wert der Normalverteilungsfunktion. Die zugehörige sd wurde erst nur über die Abweichung der Klassenmitten der ersten und zweiten Klasse berechnet. Da diese danach nur auf zwei Werten beruht, wurde zum Vergleich die sd aus allen ED gebildet, die niedriger waren als 28,67 Gy. So konnten 11 ED in die sd einbezogen werden, wodurch sie robuster wird. Nach der zweiten Ableitung der Kurve der Normalverteilung beträgt die PD  $24,32 \pm 2,442$  Gy ( $v = 10\%$ ). Das Alter wird um  $< 700$  a unterschätzt, liegt aber innerhalb des Fehlerbereichs.

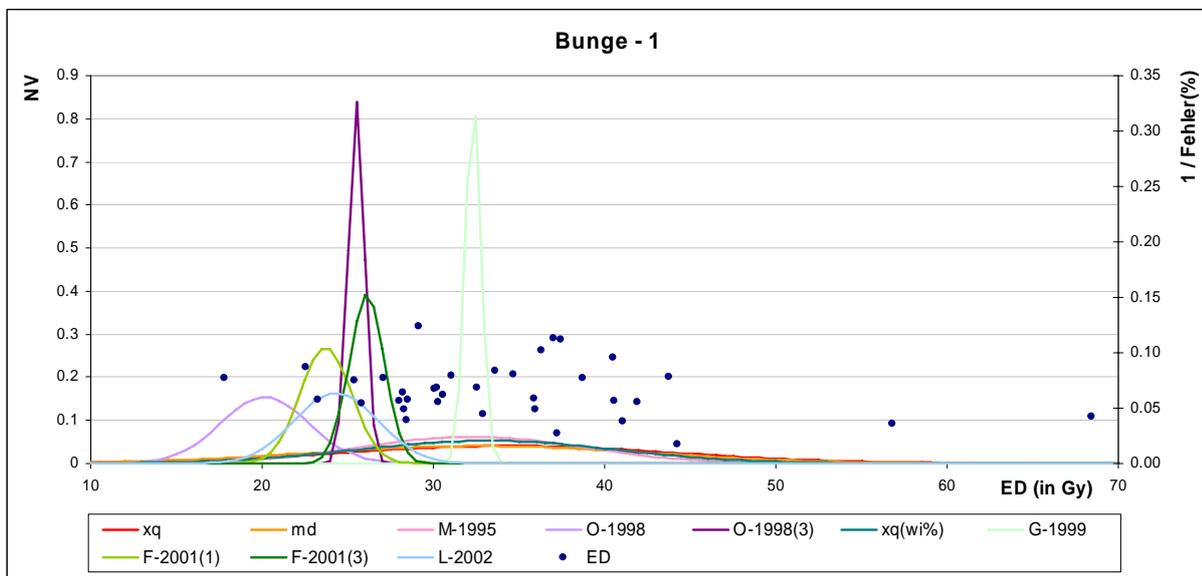


Abb. 22: Darstellung der Normalverteilungsfunktionen (NV) der PD und ihrer sd nach den untersuchten statistischen Verfahren von Bunge-1 (xq: arithmetische Mittel; md: Median; xq(wi%): präzisionsgewichtetes Mittel; M: Murray et al.; O: Olley et al.; G: Galbraith et al.; F: Fuchs & Lang; L: Lepper & McKeever; ED: Äquivalenzdosen zu 1/Fehler(%); (1)-(3): Anzahl unterer Ausreißer)

**Tab. 10: Ergebnisse der statistischen OSL-Analysen von Bunge-1 und ihre Altersdifferenz zum  $^{14}\text{C}$ -Parallelalter bei  $12.405 \pm 55$  a BP** (Erläuterungen im Text, < weniger als, > größer als, ~ etwa)

statistische Methode	PD	±	sd	v (%)	Altersdifferenz gegenüber $^{14}\text{C}$ (in a)	
<i>arithmetisches Mittel</i>	34,29	±	9,689	28,3	+	> 4100
<i>Median</i>	32,72	±	9,807	30,0	+	> 3300
Murray et al. 1995	32,26	±	6,421	19,9	+	< 3200
Olley et al. 1998	20,15	±	2,589	12,8	-	~ 2700
- ohne ED1-ED3	25,49	±	0,476	1,9	-	~ 100
Galbraith et al. 1999						
- präzisionsgewichtetes Mittel	33,10	±	7,547	22,8	+	< 3600
- Common Age Model	32,34	±	0,468	1,4	+	~ 3200
Fuchs & Lang 2001						
- ohne ED1	23,72	±	1,482	6,2	-	< 1000
- ohne ED1 – ED3	26,10	±	1,017	3,4	+	< 200
Lepper & McKeever 2002	24,32	±	2,442	10,0	-	< 700

## Bunge-2

Für Bunge-2 wurden an 24 Aliquots die ED gemessen, von denen 22 geeignet sind. Die ED reichen von minimal 15,32 bis maximal 28,47 Gy. Die Verteilung über den Wertebereich stellt sich relativ gleichmäßig ohne deutliche Extrema dar (Abb. 23). Die relativen ED-Fehler schwanken zwischen 9,3 und 37,6 % unabhängig von der Größe der ED. Die zentrale Tendenz lag mit  $x_q$  bei  $22,35 \pm 3,756$  Gy ( $v = 16,8$  %) und die Streuung ist beinahe nur halb so groß wie bei Bunge-1. Der etwas niedrigere md bei 21,26 Gy gilt als Hinweis für eine positive Streckung der ED-Verteilung. Die PD aus  $x_q$  ergibt ein um fast 2900 a und aus dem md ein fast 2400 a überschätztes Alter (Tab. 11). Selbst mit Rücksicht auf die großen Altersfehler liegen sie noch über dem Parallelalter.

DR-Tests liegen für Bunge-2 selbst nicht vor. Stellvertretend wurden die DR-Test-Ergebnisse von Bunge-3 an 7 Aliquots mit zwei verschiedenen Sequenzen genutzt und im Vergleich zu Bunge-1 abgeschätzt. Problematisch war v.a. der Testdosis-Fehler (bis 20 %) und in der ersten Sequenz auch die RR (10-20 %) sowie der relative Fehler der ED (30 – 50 %). Der hohe Variationskoeffizient der ersten Sequenz ( $v_{\text{DR1}} = 17,7$  %) könnte z.T. in zu niedrig angesetzten Regenerationsdosen der Mess-Sequenz begründet sein. Nach der zweiten angepassten Sequenz ergab  $v_{\text{DR2}} = 7,8$  %.

Ohne die 3 höchsten ED gemäß **MURRAY et al. (1995)** beträgt  $x_q = 21,5 \pm 3,3$  Gy vergleichbar dem Median der gesamten Verteilung. Da die entfernten Werte nicht deutliche Extrema darstellen, wird die ED-Verteilung durch dieses Verfahren nur wenig eingegrenzt und die Standardabweichung bleibt hoch ( $v = 15,3$  %). Selbst wenn PD nur aus den unteren 50 % der ED bestimmt wird, liegt das OSL Alter immer noch fast 1500 a über dem  $^{14}\text{C}$ -

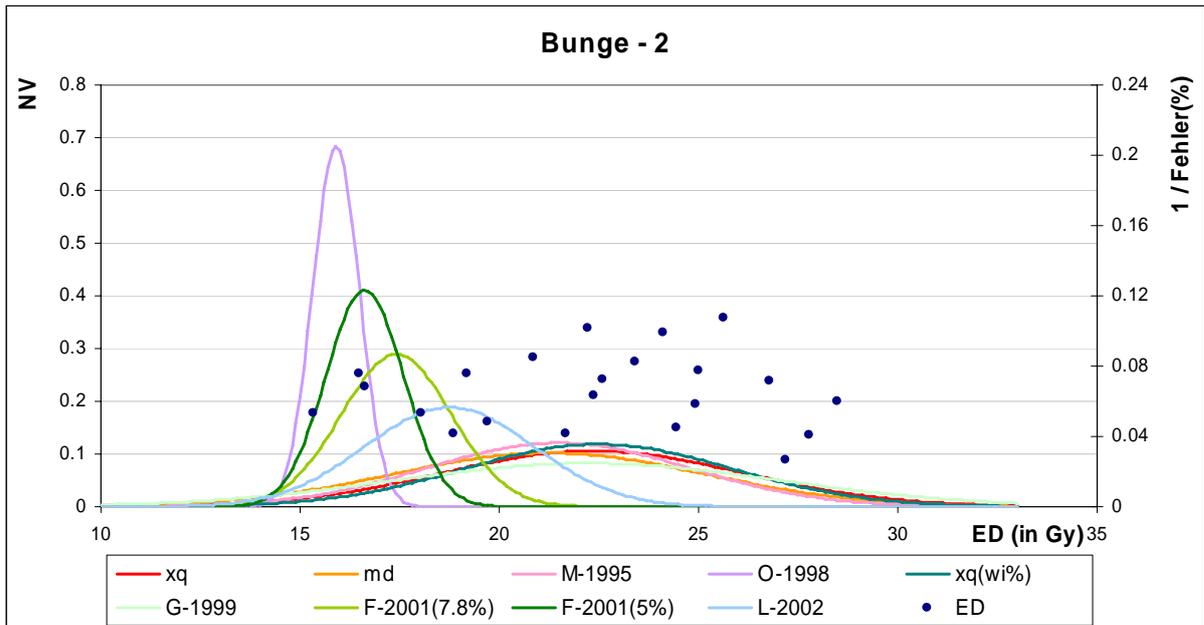
Ergebnis und lässt auf einen weit geringeren Anteil gut gebleichter Kornzusammensetzungen der Aliquots schließen.

Die low5 % nach **OLLEY et al. (1998)** von den insgesamt 22 in die Berechnungen einbezogenen ED wären 1,1 Werte. Würde man also nur den niedrigsten Wert in die Berechnung einbeziehen ergäbe „xq“ 15,32 Gy, wobei die sd nicht bestimmt werden kann. Das Mittel der untersten beiden ED ( $15,9 \pm 0,6$  Gy) ergibt  $v = 3,7$  %, wohingegen  $v$  von ED2 und ED3 ( $16,5 \pm 0,1$  Gy) mit 0,4 % noch niedriger ist, da beide ED dicht beieinander liegen. Nach der ED-Verteilung wären entweder ein oder drei untere Ausreißer wahrscheinlich. Das Alter aus den niedrigsten beiden ED entspricht sehr genau dem  $^{14}\text{C}$ -Alter (10 a Differenz, Altersfehler 750 a).

Die nach **GALBRAITH et al. (1999)** ln-transformierten ED ( $\text{LN}(\text{ED})$ ) zeigen eine zweigipflige linksschiefe, wenig differenzierte Häufigkeitsverteilung mit je zwei maximalen Klassen. Das berechnete fehlergewichtete Mittel liegt bei  $22,2 \pm 4,8$  Gy und ist vergleichbar dem xq. Dabei ist  $v = 21,8$  % höher als bei einfacher Berechnung mittels xq ohne Transformation. Ermittelt man das präzisionsgewichtete Mittel ohne Transformation, ergeben sich ähnliche Werte bei kleinerer sd ( $22,5 \pm 3,4$  Gy). Das Common Age Model überschätzt das Alter im Hinblick auf  $^{14}\text{C}$  um über 2800 a. Der aus der hohen sd resultierende große Altersfehler schließt das  $^{14}\text{C}$ -Alter jedoch nicht mehr mit ein.

Als Grenzwert der natürlichen Variabilität für die Berechnung des gleitenden Mittels nach **FUCHS & LANG (2001)** wurde das Ergebnis der zweiten Mess-Sequenz  $v_{\text{DR}} = 7,8$  % von Bunge-3 genutzt. Ohne jegliche untere Ausreißer errechnet sich  $17,4 \pm 1,4$  Gy (aus 5 ED). Durch die relativ gleichmäßig über den Dosisbereich verteilt liegenden ED und weil  $v_{\text{DR}}$  demgegenüber recht hoch ist, werden viele ED in das Mittel einbezogen. Das Ergebnis ist in Bezug auf das  $^{14}\text{C}$ -Alter fast 700 a zu groß, wobei der Altersfehler das  $^{14}\text{C}$ -Ergebnis noch mit einschließt. Ohne ED1 bzw. ED1 – ED3 wird das Alter um  $> 1000$  bzw.  $> 2000$  a überschätzt. Daher muss angenommen werden, dass die natürliche Variabilität von Bunge-2 niedriger ist, z.B. 5 % (etwa zw. Bunge-1 und Bunge-3). Das Alter ergibt dann nur noch ca. 300 a über  $^{14}\text{C}$  bei einem Alters-Fehler von ca. 860 a ( $16,6 \pm 1,0$  Gy).

Für die Häufigkeitsverteilung nach **LEPPER & MCKEEVER (2002)** wurden hier zwei verschiedene Startpunkte der untersten Klasse gewählt (Differenz 1 Gy). Nach dem Median der ED-Fehler nehmen in beiden Varianten 5 Klassen den gesamten Wertebereich auf. Beide Verteilungen sind linksschief mit dem Maximum in der dritten bis vierten bzw. in der vierten Klasse. In Abhängigkeit davon beträgt die PD  $20,1 \pm 2,8$  Gy bzw.  $18,7 \pm 2,1$  Gy, wobei schon letztere das Alter im Vergleich mit  $^{14}\text{C}$  um über 1200 a überschätzt. Allerdings schließen die Alters-Fehler in dieser Variante das  $^{14}\text{C}$ -Alter gerade noch ein.



**Abb. 23: Darstellung der Normalverteilungsfunktionen (NV) der PD und ihrer sd nach den untersuchten statistischen Verfahren von Bunge-2** (xq: arithmetische Mittel; md: Median; xq(wi%): präzisionsgewichtetes Mittel; M: Murray et al.; O: Olley et al.; G: Galbraith et al.; F: Fuchs & Lang; L: Lepper & McKeever; ED: Äquivalenzdosen zu 1/Fehler(%); (5%), (7.8%): natürliche Variabilität nach DR)

**Tab. 11: Ergebnisse der statistischen OSL-Analysen von Bunge-2 und ihre Altersdifferenz zum  $^{14}\text{C}$ -Parallelalter bei  $7.070 \pm 25$  a BP** (Erläuterungen im Text, < weniger als, > mehr als, ~ etwa)

statistische Methode	PD	±	sd	v (%)	Altersdifferenz gegenüber $^{14}\text{C}$ (in a)	
<i>arithmetisches Mittel</i>	22,35	±	3,756	16,8	+	<2900
<i>Median</i>	21,26	±	3,911	18,4	+	<2400
Murray et al. 1995	21,48	±	3,291	15,3	+	<2500
Olley et al. 1998	15,90	±	0,583	3,7	+	~ 10
Galbraith et al. 1999						
- präzisionsgewichtetes Mittel	22,48	±	3,366	15,0	+	>2900
- Common Age Model	22,21	±	4,837	21,8	+	>2800
Fuchs & Lang 2001						
- $V_{\text{DR}} = 7.8\%$	17,42	±	1,382	7,9	+	~ 700
- $V_{\text{DR}} = 5\%$	16,62	±	0,971	5,8	+	~ 300
Lepper & McKeever 2002	18,74	±	2,117	11,3	+	>1200

### 5.2.2 Auswertung der statistischen Verfahren

Die Verteilungen der ED von Bunge-1 und Bunge-2 zeigen beide eine große Streuung (28,3 % und 16,8 %), die auf heterogene Bleichung deutet. Deutliche Altersüberschätzungen traten bei Methoden auf, die auf allen ED beruhen, wie dem arithmetischen Mittel ( $\bar{x}_q$ ) oder dem Median ( $md$ ), bzw. die den Anteil schlechter Bleichung im Bereich höherer ED unzureichend bestimmen. Mit den Methoden, die am unteren Ende der ED-Verteilung ansetzen und die ED innerhalb einer kleinen  $sd$  einbeziehen ( $v = 1,9 - 10,0$  %), konnten die  $^{14}\text{C}$ -Datierung am genauesten reproduzieren. Aus den 36 bzw. 22 ED scheinen nur 2 – 4 gut gebleicht, die das Radiokarbonalter repräsentieren. Es zeigte sich, dass eine Abschätzung unterer Ausreißer von entscheidender Bedeutung ist, um Altersunterschätzungen zu vermeiden. Solche Ausreißer erscheinen durch postsedimentäre Umlagerungen (z.B. Bio- oder Kryoturbation) oder durch mikrodosimetrische Unterschiede im Sediment möglich. Die Einschätzung gestaltet sich allerdings wegen der geringen Anzahl der ED v.a. in Bunge-2 schwierig, da nicht sicher ist, ob wirklich alle Bereiche der natürlichen Dosisvariabilität im Sediment gemessen werden konnten. Unterstützend haben sich DR-Tests zur Bestimmung der probenspezifischen Variabilität bei gleicher Bleichung und damit auch zur Abgrenzung von Ausreißern bewährt. Im Vergleich zur  $sd$  von  $\bar{x}_q$  können zusätzliche Informationen über den Grad der Bleichung der Gesamtverteilung gewonnen werden. Hier bestätigte sich der von FUCHS & WAGNER (2003) vorgeschlagene Grenzwert von  $v = 10\%$  als kennzeichnend für heterogene Bleichung. Das Verfahren nach OLLEY et al. (1998) konnte aufgrund der geringen Anzahl gemessener und geeigneter Aliquots nur bedingt angewandt werden. Um überhaupt eine Standardabweichung ( $sd$ ) berechnen zu können, wurde die PD jeweils aus den zwei niedrigsten Werten berechnet. Von entscheidender Bedeutung war die Betrachtung möglicher unterer Ausreißer. Hierfür gibt die Methode selbst keine Entscheidungshilfe zur Hand. Überträgt man diejenige nach dem Verfahren von FUCHS & LANG (2001), können die  $^{14}\text{C}$ -Alter gut rekonstruiert werden. Trotz der hier guten Ergebnisse sollte die generelle Anwendung der low5% hinterfragt werden. Die Aussagekraft der  $sd$  ist stark eingeschränkt, da sie abhängt von der Differenz der je zwei in die Berechnung einbezogenen Aliquots und weniger im Zusammenhang zur der Probe natürlich immanenten Variation bei einheitlich guter Bleichung steht. Daher erscheint diese Methode zur Bestimmung einer möglichst probenspezifischen PD nicht geeignet.

Die logarithmische Transformation des *Common Age Models* nach GALBRAITH et al. (1999) geht nicht differenziert auf die wahre ED-Verteilung ein und erzeugte in beiden Proben scheinbar eine Überkompensation der (leicht) positiven Streckung. Die Ergebnisse sind vergleichbar mit der Methode von MURRAY et al. (1995) bzw. dem Median und liegen weit über dem  $^{14}\text{C}$ -Alter. Die Plausibilität der Ergebnisse der Standardabweichung ist fraglich. In Bunge-1 ist sie besonders niedrig und in Bunge-2 besonders hoch. Das Modell ist allerdings nach GALBRAITH et al. (1999) nicht geeignet für Messergebnisse von Aliquots mit so unterschiedlicher Bleichung, wie sie bei den hier betrachteten Proben vorliegen. Vielmehr wird im Modell davon ausgegangen, dass alle Messergebnisse einen allgemeinen Wert (Common Age) repräsentieren, wie sie insbesondere für äolische Proben typisch sind. Die anderen Modelle konnten aus Zeitgründen leider bisher nicht näher betrachtet werden. Die

Berechnungen des *präzisionsgewichteten Mittels* ohne Transformation ergaben ähnliche Altersüberschätzungen. Dabei scheint die Wichtung nach dem Fehler ungeeignet um die repräsentative PD partiell gebleicher Proben darzustellen, da sie vor allem die messtechnische Sicherheit der ED-Bestimmung wiedergibt und weniger im Zusammenhang zur Qualität der Bleichung steht. Es ergeben sich z.T. extrem kleine oder extrem große sd, die auf ein mathematisches Problem deuten, welches wahrscheinlich durch den Logarithmus verursacht wird.

Die Ergebnisse (PD und sd) der Methode nach **FUCHS & LANG (2001)** hängen stark von der nach dem DR-Test berechneten probeneigenen Variabilität ( $v_{DR}$ ) ab und inwieweit diese der natürlichen Variabilität entspricht. Eine Differenz beider Größen ist aufgrund von mikrodosimetrischen Inhomogenitäten oder postsedimentären Umlagerungen im Sediment möglich (HILGERS 2008, persönliche Mitteilung). Für eine natürliche Variabilität zwischen 3 – 5 % ließen sich für beide Proben gute Übereinstimmungen mit dem  $^{14}C$ -Alter ermitteln. In Bunge-2 liegt sie wahrscheinlich noch niedriger als angenommen. Problematisch sind sehr große  $v_{DR}$ , die fast so groß oder größer als der relative sd der gemessenen ED sind. In diesen Fällen werden (fast) alle ED für die Bestimmung der PD verwendet, die sich so dem xq annähert. Untere Ausreißer können mathematisch objektiv abgegrenzt werden, wenn  $v_{DR}$  gleich beim ersten gleitenden Mittelwert überschritten wird. Es sollte aber trotzdem kontrolliert werden, ob nicht vielleicht zufällig 2 untere Ausreißer nah beieinander liegen und somit die Ausreißerzahl unterschätzt wird. Diese Abschätzung scheint bei wenigen ED besonders schwierig und wenn die Verteilung sehr gleichmäßig gestreckt vorliegt ohne sichtbare Konzentration von Werten.

Die nach **LEPPER & MCKEEVER (2002)** bestimmten Häufigkeitsverteilungen sind für Bunge-1 rechts- und für Bunge-2 linksschief, die das aus der leading edge resultierende Alter leicht unter- bzw. stärker überschätzen. Der Altersfehler von Bunge-1 schließt das  $^{14}C$ -Alter mit ein. In Bunge-2 scheint die leading edge dagegen nicht nur die gut gebleichten ED zu umfassen sondern vielmehr bei dieser linksschiefen Verteilung fast alle ED für die Berechnung zu berücksichtigen, wodurch sich eine relativ hohe sd ergibt. Von der Existenz einer leading edge kann danach in linksschiefen Häufigkeitsverteilungen nicht gesprochen werden. Generelle methodische Unsicherheiten ergeben sich aus der Klasseneinteilung. Bei sehr niedrigen oder sehr hohen ED-Fehlern im Hinblick auf die Reichweite aller ED kann die Klassenweite nach dem Median der Fehler zu klein bzw. zu groß sein um ein differenziertes Bild der Häufigkeitsverteilung darzustellen. Dies ist von besonderer Bedeutung, wenn insgesamt nur wenige ED vorliegen, die den Klassen zugeordnet werden, oder die ED sehr gleichmäßig über einen großen Bereich gestreut sind und sich keine echten Maxima ergeben. Ebenso fehlen objektive Kriterien zum Startpunkt der ersten Klasse. Vergleichende Berechnungen haben gezeigt, dass mit verschiedenen Startpunkten z.T. unterschiedlich gut zu beurteilende Histogramme zustande kommen. Zusätzlich könnte eine Ausreißerbetrachtung die Ergebnisse verbessern, insbesondere wenn wie bei Bunge-1 deutliche unteren Extrema vorhanden sind.

Grundlage der Berechnungen aller angewandten Methoden ist die ED-Verteilung und die abgeleitete Interpretation des gut gebleichten Anteils, aus dem einheitlich über das

arithmetische Mittel ( $x_q$ ) und die Standardabweichung ( $sd$ ) die PD bestimmt wurde. Dadurch ist eine gewisse Vergleichbarkeit der Methoden gewährleistet.

Auf die in den Proben beobachtete schlechte Bleichung reagierten die Methoden nach OLLEY et al. (1998), FUCHS & LANG (2001) und bedingt auch LEPPER & MCKEEVER (2002) gut, wobei nur die letzten beiden probenspezifisch auf die ermittelte ED-Verteilung eingehen und daher bei der Analyse der folgenden Proben besondere Beachtung finden sollen. Je nach Verteilung der ED zeigen diese die genannten unterschiedlichen Vor- und Nachteile, die als Entscheidungsgrundlage für die Auswahl des geeigneten statistischen Verfahrens zur Bestimmung der PD dienen. Die Anwendung eines statischen Auswahlverfahrens erweist sich als ungünstig, da jede Probe sehr individuelle Messergebnisse zeigen kann. Als statistische Parameter der ED-Verteilung werden Maße der Zentraltendenz ( $x_q$ ,  $md$ ) und Streuung ( $sd$ , Häufigkeits- bzw. Normalverteilungsfunktion) berücksichtigt. Im Vergleich mit den anderen Verfahren kann die Sicherheit der einzelnen Methoden vergrößert werden, die daher weiterhin für die zu untersuchenden Proben zusätzlich dargestellt werden. Hilfreich erwiesen sich auch die DR-Tests und relative  $sd$  gegenüber  $x_q$  zur Abschätzung der Bleichung.

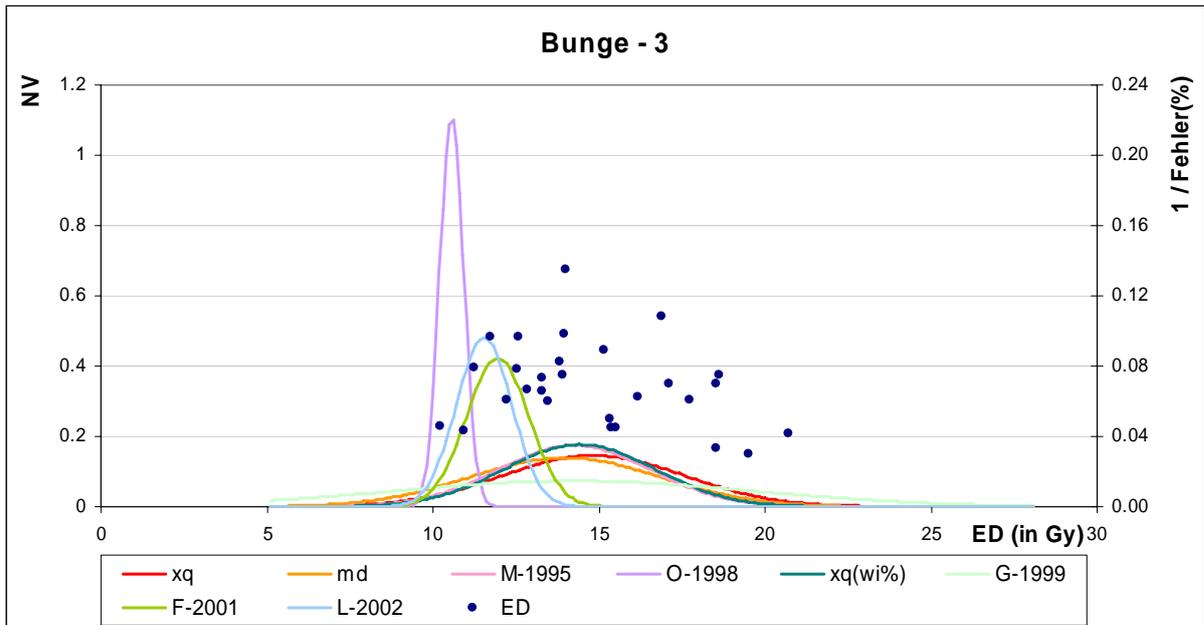
### 5.2.3 Übertragen der Ergebnisse auf Bun-5 und Bun-7

#### Bunge-3

Für einzelne ED lagen die Fehler durchschnittlich bei 16,4 % und die Testdosisfehler bei bis zu 20 %. Die RR und NP zeigten allgemein aber recht gute Ergebnisse. Insgesamt konnten 28 ED von 31 gemessenen in Berechnung einbezogen werden. Die Streuung der ED liegt bei 18,4 %, wobei keine Ausreißer ins Auge fallen. Median liegt leicht unter dem  $x_q$  von 14,8 Gy.

Die DR-Tests ergaben eine schlechte Reproduzierbarkeit der applizierten Dosis mit  $v_{DR}$  von 17,7 % bzw. in einer zweiten nach der erwarteten Höhe des natürlichen Siganls angepassten Messreihe mit erhöhten Labordosen eine  $v_{DR}$  von 7,8 % . Letztere wird daraus folgend als repräsentativ für die Variabilität der Probe angesehen und geschlussfolgert, dass die Gesamtverteilung eine heterogene Bleichung widerspiegelt. Daher erscheinen die Methoden, die auf den unteren Dosisbereich abzielen, geeignet um die PD zu bestimmen, deren Ergebnisse eng beieinander liegen (Abb. 24).

Die Größenordnung der relativen  $sd$  bei der Berechnung des gleitenden Mittels zeigt eine Variabilität, die lange kleiner bleibt als  $v_{DR}$  und schließt daher fast die gesamten unteren 50 % der ED für die Berechnung der PD mit ein. Untere Extremwerte können nicht erkannt werden. Die PD ermittelt sich mit  $12,0 \pm 0,9$  Gy. Das Ergebnis deckt sich gut mit der Berechnung nach LEPPER & MCKEEVER 2002, für die sich die mäßigen Ergebnisse der DR-Tests weniger relevant darstellen. Mit der Häufigkeitsverteilung lässt sich gut die leichte Konzentration der Werte zwischen 13 und 14 Gy abbilden und eine leading edge kann abgeleitet werden. Aus der resultierenden PD von  $12,4 \pm 1,0$  Gy wird das Alter mit  $5.565 \pm 718$  a BP bestimmt.



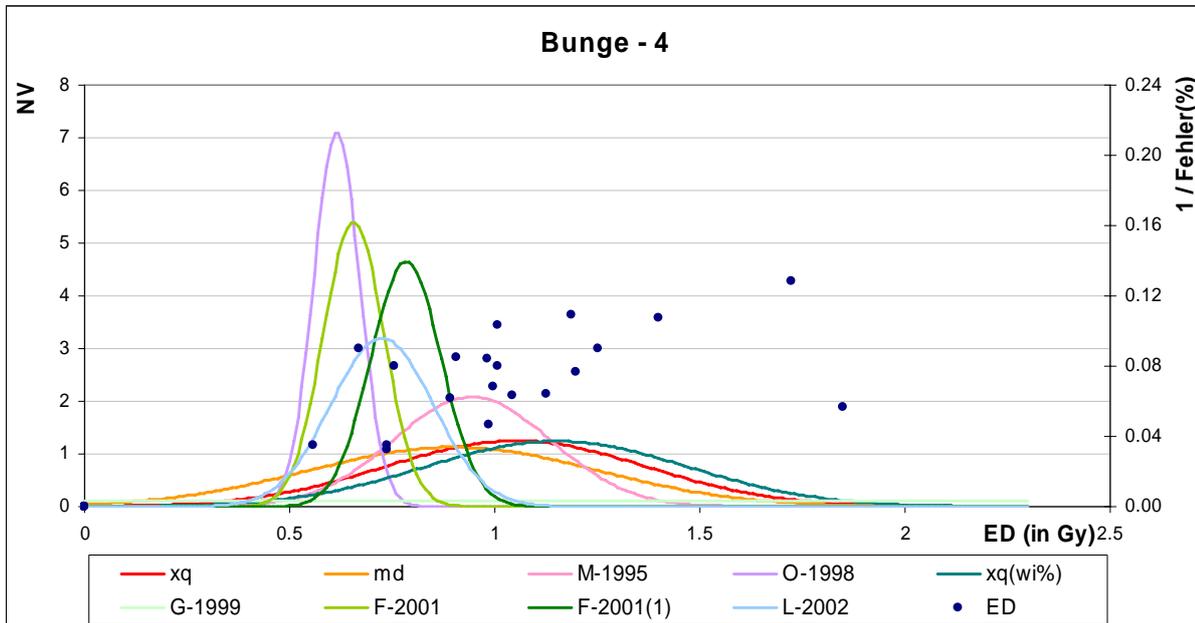
**Abb. 24: Darstellung der Normalverteilungsfunktionen (NV) der PD und ihrer sd nach den untersuchten statistischen Verfahren von Bunge-3** (xq: arithmetische Mittel; md: Median; xq(wi%): präzisionsgewichtetes Mittel; M: Murray et al.; O: Olley et al.; G: Galbraith et al.; F: Fuchs & Lang; L: Lepper & McKeever; ED: Äquivalenzdosen zu 1/Fehler(%))

## Bunge-4

Die allgemein sehr niedrigen ED (0,56 – 1,85 Gy) zeigen in den Ausleuchkurven relativ große vertikale Signal-Fluktuationen mit hohem BG. In den Wachstumskurven lagen NP und RR häufig > 5 % bzw. > 10 %, was die Anzahl (N) der nach genannten Kriterien geeigneten ED deutlich einschränkte (N = 4; zwischen 0,74 – 1.25 Gy) und generell für keine gute Bestimmbarkeit der Probe spricht. Die DR-Tests zeigen eine sehr hohe Variabilität an ( $v_{DR} = 52,8 \%$ ). Werden für NP  $\leq 10 \%$  und RR  $\leq 32 \%$  festgelegt, können 20 ED in die Statistik eingehen (Abb. 25). Dabei wird ein ähnlicher Wertebereich abgedeckt, an dessen Rändern einzelne Extrema hinzukommen. Die ED-Verteilung wird dabei stärker im höheren Bereich gestreckt. Die Streuung der 20 ED liegt bei 30 % und kann, obwohl sie noch unter der  $v_{DR}$  liegt, auf schlechte Bleichung deuten. Danach sollten die Methoden des unteren Dosisbereichs bevorzugt werden. Doch es muss wegen den genannten Eigenschaften eine relativ große sd akzeptiert werden.

Die low5% nach OLLEY et al. (1998) fußen auf den niedrigsten zwei ED (eigentlich: 5% von N = 1). Die geringe sd erscheint gegenüber den allgemein schlechten Wachstumskurven kaum realistisch. Für FUCHS & LANG (2001) wurde eine natürliche Variabilität von 10 % angenommen (vgl. Bunge-1 und Bunge-3 sowie DR-Test) und spiegelt sich auch in der relativen sd des gleitenden Mittels wieder. ED1 bzw. ED1 und ED2 können wegen der Abschätzung von  $v_{DR}$  nicht sicher als untere Ausreißer ausgeklammert werden. Vergleichbare Ergebnisse liefert das Verfahren nach LEPPER & MCKEEVER (2002) mit einer PD von  $0,8 \pm 0,113$  Gy (14,2 %), die zwischen den beiden Maxima der ermittelten Häufigkeitsverteilung liegt. Sie zeigt für diese Probe die robusteste Methodik um das Alter zu bestimmen. Dies liegt

leicht oberhalb der niedrigsten nach strengeren Kriterien gewonnenen ED und ergibt ein Alter von  $390 \pm 59$  a BP.



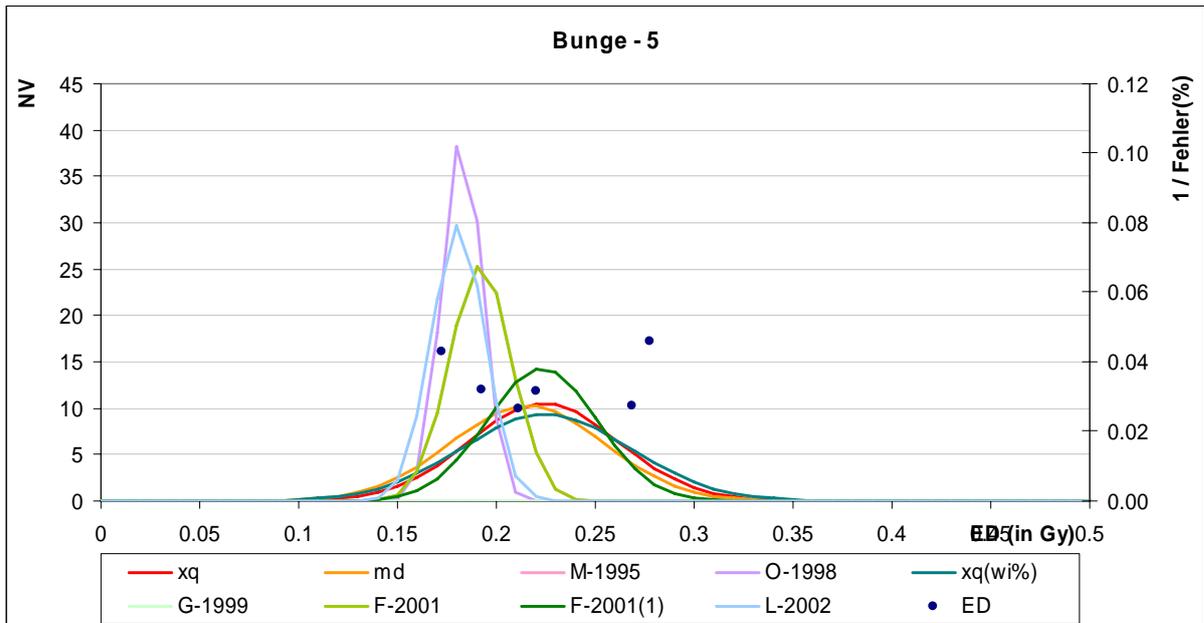
**Abb. 25: Darstellung der Normalverteilungsfunktionen (NV) der PD und ihrer sd nach den untersuchten statistischen Verfahren von Bunge-4** (xq: arithmetische Mittel; md: Median; xq(wi%): präzisionsgewichtetes Mittel; M: Murray et al.; O: Olley et al.; G: Galbraith et al.; F: Fuchs & Lang; L: Lepper & McKeever; ED: Äquivalenzdosen zu 1/Fehler(%); (1): Anzahl unterer Ausreißer)

### Bunge-5

Extrem niedrige Signale, deren initiale Intensität sich meist wenig von dem relativ hohen BG-Rauschen abhebt. Einige Aliquots zeigen nur ein Rauschen. Nur eine ED ( $0,17 \pm 0,04$  Gy) konnte aus einer gut die Dosis-Signal-Punkte wiedergebenden Wachstumskurve bestimmt werden, die den ED-Auswahlkriterien genügte. Ein wenn auch schlechtes Signal konnte aus weiteren fünf Aliquots ermittelt werden (Abb. 26), deren ED bei  $0,17 - 0,28$  Gy lagen. Die NP betragen meist zwischen  $20 - 30$  % (max.  $86$  %) und die RR i.d.R. zwischen  $10 - 30$  %. Gegenüber dem xq schwankten die ED mit  $17$  %. Aus den 5 DR-Tests konnten nur zwei Signale bestimmt werden, bei den anderen war nur ein Rauschen bzw. ein extrem hoher BG detektierbar. Die bestimmten  $ED_{DR}$  weichen um  $20$  bzw.  $30$  % von der zuvor applizierten Dosis ab.

Wegen der wenigen ED ist der Aufbau einer Häufigkeitsverteilung für das Verfahren nach LEPPER & MCKEEVER (2002) wenig aussagekräftig, trotzdem konnte ein Maximum um  $0,2$  Gy festgestellt werden. Für die Anwendung der Methode von FUCHS & LANG (2001) sind die DR-Tests zu schlecht. Nimmt man eine natürliche Variabilität von  $8$  % an, werden die unteren  $50$  % der ED-Verteilung ( $N = 3$ ) in der Berechnung berücksichtigt und es ergibt sich ein leicht höherer Wert als aus der einzigen geeigneten ED und kann auch mit MURRAY et al. (1995) verglichen werden ( $N - 3$ ).

Da zu wenig Informationen über die tatsächliche Dosisverteilung der Probe vorliegen, kann nur vermutet werden, dass die drei Methoden am unteren Dosisende das wahre Alter widerspiegeln. Sinnvoller ist hier aber die Angabe eines Maximalalters aus dem  $xq$  ( $0,22 \pm 0,038$  Gy), welches dem  $md$ , dem präzisionsgewichteten Mittel und dem Verfahren nach FUCHS & LANG (2001) mit einem unteren Ausreißer gleicht. Daraus folgt ein Alter von  $< 107 \pm 22$  a BP.



**Abb. 26: Darstellung der Normalverteilungsfunktionen (NV) aus PD und ihrer sd nach den untersuchten statistischen Verfahren von Bunge-5** ( $xq$ : arithmetische Mittel;  $md$ : Median;  $xq(wi\%)$ : präzisionsgewichtetes Mittel; M: Murray et al.; O: Olley et al.; G: Galbraith et al.; F: Fuchs & Lang; L: Lepper & McKeever; ED: Äquivalenzdosen zu  $1/Fehler(\%)$ ; (1): Anzahl unterer Ausreißer)

### 5.3. Bestimmung der Paläodosen der Profile im Lena-Delta

#### 5.3.1 Ergebnisse der Nagym-Sektion

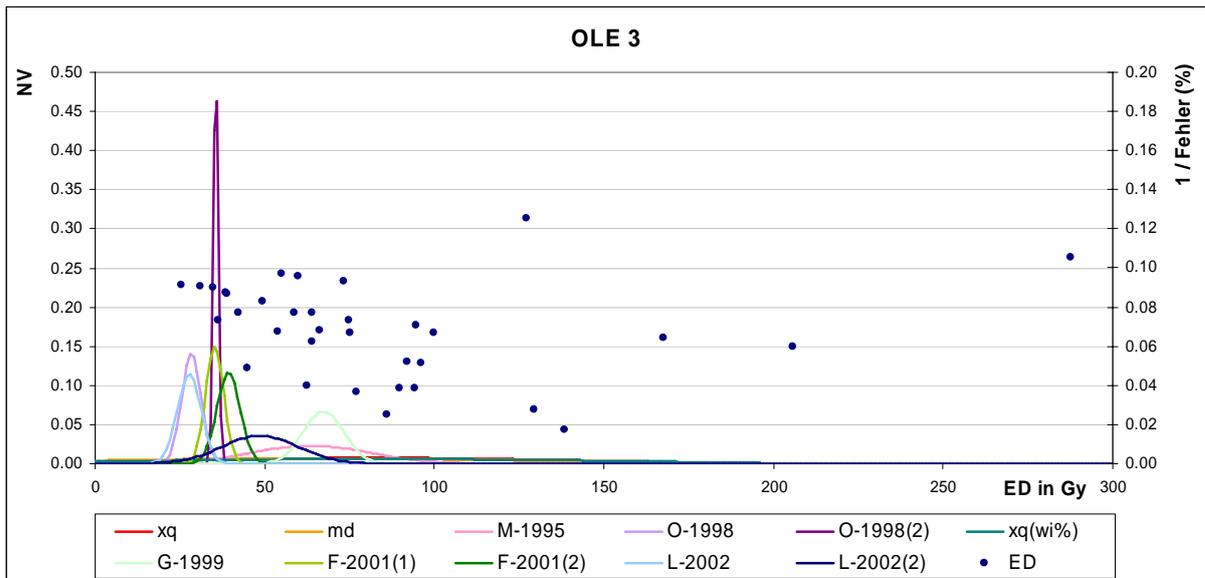
##### OLE 3

Die 34 ausgewählten ED (von 40 gesamt) zeigen eine sehr große Streckung ( $v = 64 \%$ ),  $x_q$  von 83,3 Gy mit deutlichen oberen Extrema und einer Konzentration der ED zwischen 25 und 100 Gy. Zur Veranschaulichung dieses Zusammenhangs wurde für MURRAY et al. (1995) anstatt der höchsten drei ED alle ED  $> 100$  Gy (6 Werte) aus der Berechnung ausgeschlossen. Die abgeleitete PD (63,9 Gy) ist vergleichbar dem Median und die relative sd reduziert sich um mehr als die Hälfte, wodurch sich die ED-Verteilung auf den besser gebleichten Anteil einengen lässt. Die Streuung liegt aber immer noch weit über einer als natürlich anzunehmenden Variabilität. Der DR-Test ermittelte eine  $v_{DR}$  von 6,6%. Um einer vermutlich leicht höheren natürlichen Variabilität im Sediment Rechnung zu tragen, wurden 8 % angenommen.

Die PD aus den low5% ohne zwei untere Ausreißer ( $35,54 \pm 0,69$  Gy) und nach FUCHS & LANG (2001) ohne einen unteren Ausreißer sind recht ähnlich. Dabei gibt die sd der letzteren Methode die probenspezifische Variabilität nach  $v_{DR}$  wieder. Nach der sd des gleitenden Mittels im Vergleich zur natürlichen Variabilität (6,6 bzw. 8,0 %) sind mindestens ein unterer Ausreißer möglich, wahrscheinlicher sind aber zwei. Auf dieser Grundlage wurde die PD ohne zwei Ausreißer und einer natürlichen Variabilität von 8 % bei  $39,3 \pm 3,4$  Gy bestimmt.

Problematisch war die Anwendung der Methode nach LEPPER & MCKEEVER (2002), da der Median der ED-Fehler sehr klein ist und sich bei dieser großer Streuung demnach 27 Klassen ergeben würden. Entsprechend undifferenziert ist die Häufigkeitsverteilung mit wenig Werten pro Klasse und drei gleichwertigen Maxima (PD bei  $27,7 \pm 3,5$  Gy aus unterstem Maximum dargestellt). Bei zweifachem Median und ohne ED1 und 2 konnte eine unimodale positiv gestreckte Verteilung aufgebaut werden, deren PD von 48,6 in der Abb. 27 zum Vergleich zusätzlich dargestellt ist. Die relative sd liegt dann bei 23 %.

Die PD der Methoden, die im unteren Dosisbereich ansetzen, ergeben Werte von ca. 30 – 50 Gy. Am besten scheint sich bei dieser Verteilung die Berechnung nach FUCHS & LANG (2001) zu eignen mit der PD von  $39,3 \pm 3,4$  Gy. Gemäß der ermittelten DL wurde die Probe auf  $20.293 \pm 3.249$  a BP datiert.



**Abb. 27: Darstellung der Normalverteilungsfunktionen (NV) aus PD und ihrer sd nach den untersuchten statistischen Verfahren von OLE 3 (xq: arithmetische Mittel; md: Median; xq(wi%): präzisionsgewichtetes Mittel; M: Murray et al.; O: Olley et al.; G: Galbraith et al.; F: Fuchs & Lang; L: Lepper & McKeever; ED: Äquivalenzdosen zu 1/Fehler(%); (1)-(2): Anzahl unterer Ausreißer)**

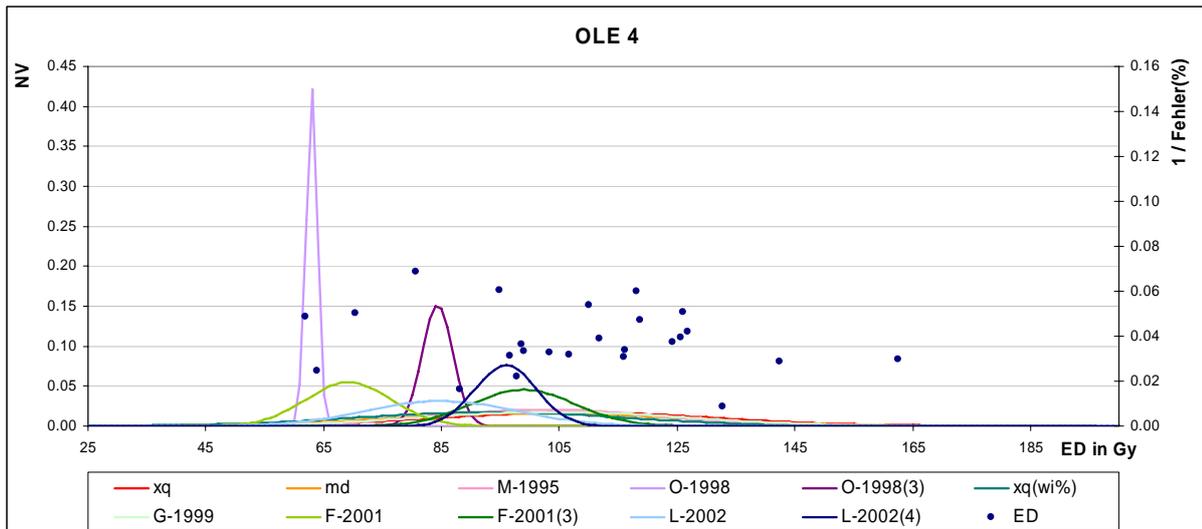
#### OLE 4

Die 25 ED streuen mit 21,7 % um das arithmetische Mittel bei 107,7 Gy. Der Median und ähnlich auch die PD nach MURRAY et al. (1995) liegen nur leicht darunter, was auf keine markante positive Streckung ohne einseitig abgesetzte Extrema deutet. Es treten vielmehr beidseitig der leichten zentralen Konzentration vereinzelt Ausreißer auf.

Die low5% aus zwei ED befinden sich zu sehr im Bereich möglicher unterer Ausreißer, deren Anzahl in dieser Verteilung schwierig abzuschätzen ist. Die Methode ist hier daher besonders unsicher. Aus fünf DR-Tests ließ sich die  $v_{DR}$  mit 8,3 % bestimmen, die etwa der natürlichen Variabilität der Probe entsprechen dürfte. Die untersten beiden ED liegen relativ nah beieinander und das gleitende Mittel überschreitet  $v_{DR}$  genau bei Einbeziehung der dritten ED. Die sd des gleitenden Mittels spricht für drei oder gar vier untere Ausreißer, da zwischen diesen Ausreißern größere Sprünge der ED vorliegen (Abb. 28). Die folgenden ED liegen deutlich dichter zusammen. Die PD mit 3 Ausreißern liegt bei  $98,9 \pm 8,8$  Gy und ist etwa vergleichbar mit LEPPER & MCKEEVER (2002) bei vier Ausreißern und Klassenweite aus Median des ED-Fehlers dividiert durch zwei. Die Häufigkeitsverteilung zur Bestimmung der leading edge gestaltete sich problematisch, da wegen den allgemein hohen ED-Fehlern ( $\approx 35$  %) nur vier Klassen gebildet werden, wobei die mittleren zwei Klassen Maxima gleicher absoluter Häufigkeit darstellen. Es berechnet sich eine breite sd bei einer PD am unteren Bereich der ED-Konzentration. Bei kleinerer Klassenweite (Median dividiert 1,5) tragen die relative weit gestreuten unteren ED zu einer wenig ausgebildeten leading edge durch eine linksschiefe Häufigkeitsverteilung bei. Da alle Klassen bis zur absolut häufigsten einbezogen werden, erhöht sich die sd und überschätzt ziemlich wahrscheinlich den gut gebleichten Anteil der ED-Verteilung, was insgesamt keine guten Ergebnisse (vgl. Bunge-Proben)

verspricht. Erst nach Entfernen der untersten vier ED wird die linksschiefe Verteilung aufgehoben. Mit dem Median der Fehler dividiert durch zwei als Klassenweite, lässt sich eine PD von  $96,0 \pm 5,2$  Gy bestimmen.

Die PD der Methoden des unteren Dosisbereichs liegen bei drei bis vier Ausreißern zwischen 84,3 und 98,9 Gy. Da weniger Probleme bei der Berechnung nach FUCHS & LANG (2001) auftreten, wurde danach das Alter ohne ED1 – ED3 auf  $36.312 \pm 5.214$  a BP bestimmt.



**Abb. 28 : Darstellung der Normalverteilungsfunktionen (NV) aus PD und ihrer sd nach den untersuchten statistischen Verfahren von OLE 4** (xq: arithmetische Mittel; md: Median; xq(wi%): präzisionsgewichtetes Mittel; M: Murray et al.; O: Olley et al.; G: Galbraith et al.; F: Fuchs & Lang; L: Lepper & McKeever; ED: Äquivalenzdosen zu 1/Fehler(%); (1)-(4): Anzahl unterer Ausreißer)

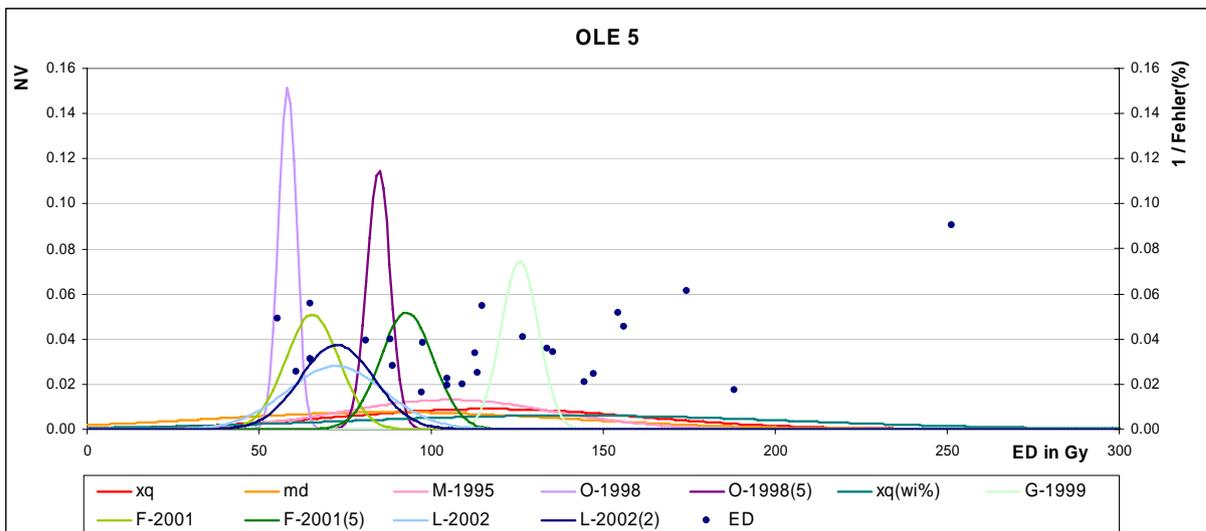
## OLE 5

Die Bestimmung der ED aus der Wachstumskurve unterlag häufig einem hohen Fehler in der Kurvenanpassung, vor allem dann, wenn der BG der Ausleuchtcurve erhöht war. Der erlaubte Testdosisfehler wurde auf 20 % erhöht, da sonst nur 13 Aliquots geeignet wären. Es wurde aber ein ähnlicher Dosisbereich abgedeckt, wenn auch nun auffällig positiv gestreckt. Zum Teil konnte dem Testdosisfehler begegnet werden, indem der vorhergehende BG für die Testdosisbestimmung genutzt wurde. So wurden 26 ED ermittelt, deren  $RR \leq 10\%$  und  $NP \leq 5\%$  beträgt. Das arithmetische Mittel liegt bei 116,8 Gy mit einer Streuung von 37,9 %. Der Median ist deutlich tiefer (88,2 Gy). Der DR-Test ergab  $v_{DR} = 8,3\%$ , zeigte aber ähnliche Probleme, wie bei der Bestimmung der ED. Insgesamt ist eine stark heterogene Bleichung anzunehmen.

Im niedrigen Dosisbereich liegt eine Gruppe von fünf ED, die sich von der restlichen Verteilung abgrenzen. Die low5% und das gleitende Mittel bis einschließlich  $v_{DR}$  bestimmen die PD anhand dieser ED-Gruppe (Abb. 29). Dabei wird die Berechnung des gleitenden Mittels, egal ob kein oder bis zu drei untere Ausreißer stets von der großen Differenz zwischen ED5 und 6 eingegrenzt. Ohne Ausreißer lässt sich die PD mit  $65,5 \pm 7,8$  Gy für

diese Gruppe bestimmen, mit drei Ausreißern  $70,5 \pm 7,6$  Gy. Um die problematischen Testdosisfehler und schlechte Kurvenanpassung zu berücksichtigen, müsste man die natürliche Variabilität der Probe eventuell etwas höher ansetzen. Das Problem der objektiven Abgrenzung der richtigen Menge an Ausreißern wird bei der Berechnung der PD ( $72,2 \pm 14,3$  Gy) nach der leading edge umgangen, resultiert aber zusammen mit den generell großen ED-Fehlern, die eine große Klassenweite vorgeben, in einer hohen sd. In dieser sd finden über die ED-Fehler die Testdosis- und die Kurvenanpassungsprobleme Berücksichtigung. Bezieht man nur etwa die Hälfte dieser Gruppe mit ein (ohne ED1 und 2), fokussiert sich die PD auf den gleichen Dosisbereich. So wird der geringe Einfluss von Ausreißern auf die absolute Höhe der PD in dieser Berechnung unterstrichen, der sich nur in der Größe der sd auswirkt.

Die PD der angewandten statistischen Methoden im niedrigen Dosisbereich schwankt zwischen 58,2 und 92,9 Gy. Wegen den genannten Unsicherheiten wird das Alter nach der leading edge ohne Ausreißer mit  $28.269 \pm 6.635$  a BP bestimmt.



**Abb. 29:** Darstellung der Normalverteilungsfunktionen (NV) aus PD und ihrer sd nach den untersuchten statistischen Verfahren von OLE 5 (xq: arithmetische Mittel; md: Median; xq(wi%): präzisionsgewichtetes Mittel; M: Murray et al.; O: Olley et al.; G: Galbraith et al.; F: Fuchs & Lang; L: Lepper & McKeever; ED: Äquivalenzdosen zu 1/Fehler(%); (1)-(5): Anzahl unterer Ausreißer)

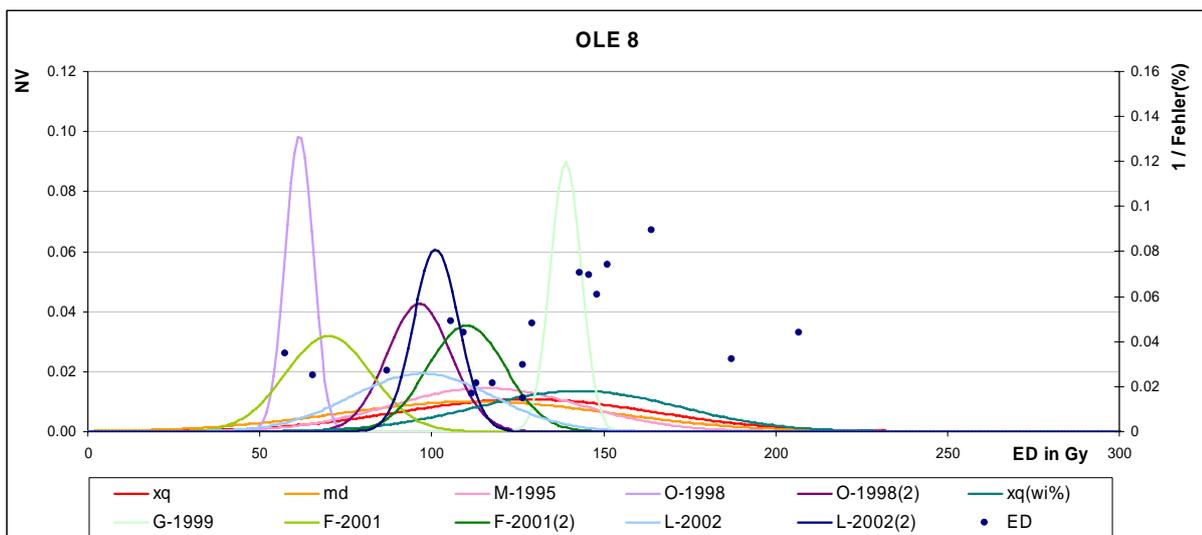
### 5.3.2 Ergebnisse der Kurungnakh-Sektion

#### OLE 8

Die Messungen dieser Probe zeigten hohe OSL-Signale, so dass die erste Mess-Sequenz etwas zu niedrig angesetzt war um die ED zu bestimmen. Zum Teil lagen die ED nahe dem Sättigungsbereich oder oberhalb des Bestimmungsbereichs der Wachstumskurven, hatten hohe Testdosisfehler, RR und NP. Es konnten 18 geeignete ED von insgesamt 40 gemessenen ermittelt werden (Abb. 30). Das arithmetische Mittel beträgt  $127,6 \pm 36,9$  Gy ( $v = 28,9$  %).

Der Median zeigt eine positive Streckung der ED-Verteilung an. Die DR-Tests sprechen für eine probenspezifische Variabilität von 10,2 %.

Da die ED-Verteilung für zwei untere Ausreißer spricht, wurden diese aus den Berechnungen ausgeschlossen. Für die Methoden des unteren Dosisbereichs ergeben sich dann gut vergleichbare Ergebnisse zwischen 96,3 – 110,1 Gy. Die Berechnungen nach FUCHS & LANG (2001) mit zwei Ausreißern decken gegenüber den anderen beiden Methoden sicherer den niedrigen Dosisbereich ab. Daher wurde mittels dieser Methode das Alter auf  $53.504 \pm 8.747$  a BP bestimmt.

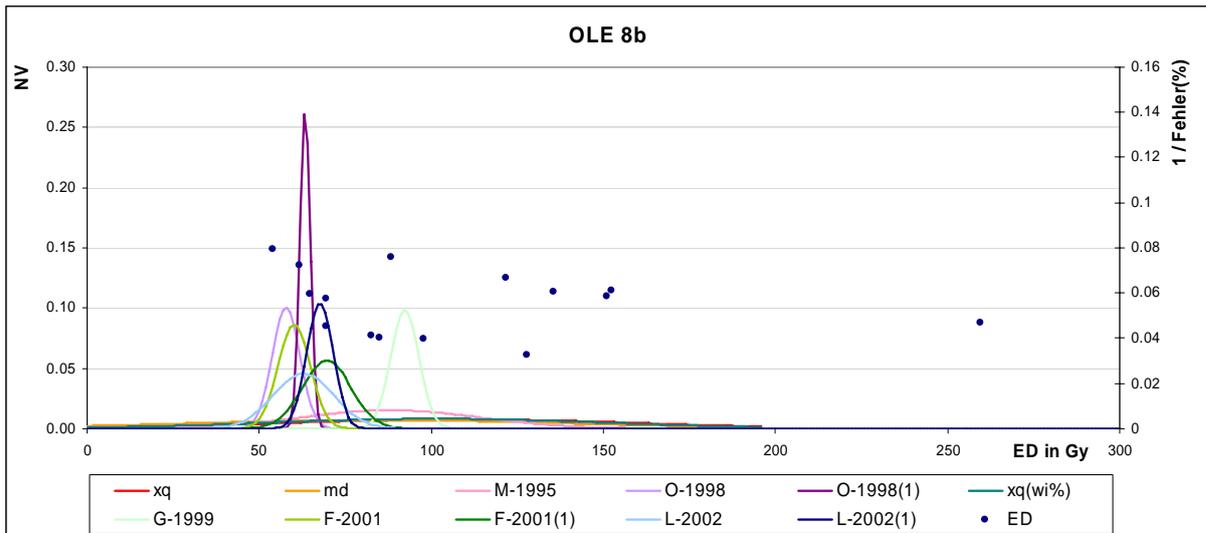


**Abb. 30: Darstellung der Normalverteilungsfunktionen (NV) aus PD und ihrer sd nach den untersuchten statistischen Verfahren von OLE 8** (xq: arithmetische Mittel; md: Median; xq(wi%): präzisionsgewichtetes Mittel; M: Murray et al.; O: Olley et al.; G: Galbraith et al.; F: Fuchs & Lang; L: Lepper & McKeever; ED: Äquivalenzdosen zu 1/Fehler(%); (2): Anzahl unterer Ausreißer)

## OLE 8b

Für OLE 8b konnten nur 15 ED für die weiteren Berechnungen ausgewählt werden, da vor allem der Testdosisfehler oder z.T. auch RR und NP zu hoch waren. Die ED-Verteilung ist weit gestreut mit einem arithmetischen Mittel bei 108,1 Gy mit einer relativen sd von 47,6 %, die stark beeinflusst ist von dem einem extrem hohen Wert. Der Median liegt weit niedriger bei 85,0 Gy. Die DR-Tests ermittelten die  $v_{DR}$  von 6,4 %.

Die PD-Bestimmungen mittels des untersten Dosisbereichs, die den gut gebleichten Anteil der ED repräsentieren, zeigten sehr gute Übereinstimmungen bei 57,8 – 69,6 Gy (Abb. 31). Anhand der sd des gleitenden Mittelwertes wurde im Vergleich zu  $v_{DR}$  ein möglicher unterer Ausreißer festgestellt. Da nach LEPPER & MCKEEVER (2002) die sd ohne ED1 etwas niedrig erscheint im Vergleich zu den nur 15 ED, die Informationen über die Dosis-Verteilung im Sediment geben, wird das Verfahren nach FUCHS & LANG (2001) bevorzugt, um ein etwas breiteres Spektrum abzudecken. Das Alter ohne ED1 berechnete sich mit  $30.113 \pm 5.096$  a BP.



**Abb. 31: Darstellung der Normalverteilungsfunktionen (NV) aus PD und ihrer sd nach den untersuchten statistischen Verfahren von OLE 8b** (xq: arithmetische Mittel; md: Median; xq(wi%): präzisionsgewichtetes Mittel; M: Murray et al.; O: Olley et al.; G: Galbraith et al.; F: Fuchs & Lang; L: Lepper & McKeever; ED: Äquivalenzdosen zu 1/Fehler(%); (1): Anzahl unterer Ausreißer)

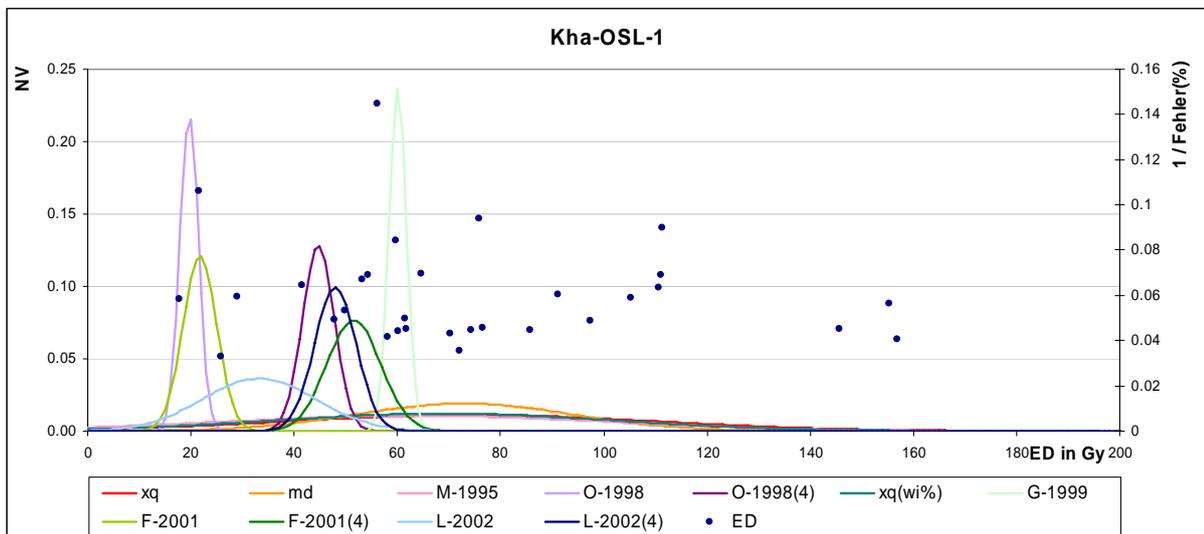
### 5.3.3 Ergebnisse der Khardang-Sektion

#### Kha-OSL-1

Von gemessenen 40 Aliquots konnten 31 Werte ausgewählt werden, deren durchschnittliche ED-Fehler durch Messung und Berechnung lag bei 18,3 %. Die ED-Verteilung zeigt eine große Streuung von 48 % um das arithmetische Mittel bei 74,3 Gy (Abb. 32). Der deutlich niedrigere Median (63,2 Gy) gibt eine positive Streckung der Verteilung wieder. An beiden Enden der Verteilung zeigt sich eine kleine Gruppe abgesetzt liegender ED. Die 3 oberen Extrema entsprechen dem Ansatz nach MURRAY et al. (1995), da die Streuung aber noch immer 40 % ergäbe, wird hier wahrscheinlich der schlecht gebleichte Anteil weit unterschätzt. Die DR-Tests sprechen für eine OSL-Variabilität der Probe von 9,6 % und unterstützen die Vermutung der schlechten Bleichung.

Am unteren Ende der Verteilung liegt eine Gruppe von vier besonders niedrigen ED, deren Interpretation bedeutenden Einfluss auf die Berechnung der PD anhand des niedrigen Dosisbereichs hat. Die Methode der low5% verdeutlicht mit den stark unterschiedlichen PD bei 19,7 bzw. bei 44,7 Gy dieses Problem, gibt aber keine Informationen zum Umgang mit ihm. Das gleitende Mittel zeigt zwischen den 4 Werten relativ hohe sd von ca. 8 % und einen großen Sprung zwischen den Werten ED4 und ED5 mit einer relativen sd von 17,7 %. Aus diesem Grund können die unteren vier Werte als Ausreißer ausgeschieden werden. Die Bestimmungen der PD der verschiedenen Methoden zeigen dann gute Übereinstimmungen im angenommen repräsentativen untersten Dosisbereich. Für LEPPER & MCKEEVER (2002) kann danach eine Häufigkeitsverteilung mit ausgeprägter leading edge aufgebaut werden, die sich aber auf wenige Klassen bzw. ED stützt. Die maximale Klasse liegt dabei etwa bei der gleichen Dosis wie ohne Ausreißerbetrachtung. Es resultiert eine deutlich geringere sd und die

PD beträgt  $47,7 \pm 4,0$  Gy. Die Unsicherheiten der Bestimmung der Häufigkeitsverteilung treten bei FUCHS & LANG (2001) nicht auf. Das gleitende Mittel wird hier gut aus ED5 – 10 auf  $51,6 \pm 5,2$  Gy bestimmt. Das Alter der Probe wird demnach auf  $23.408 \pm 3.316$  a BP datiert.



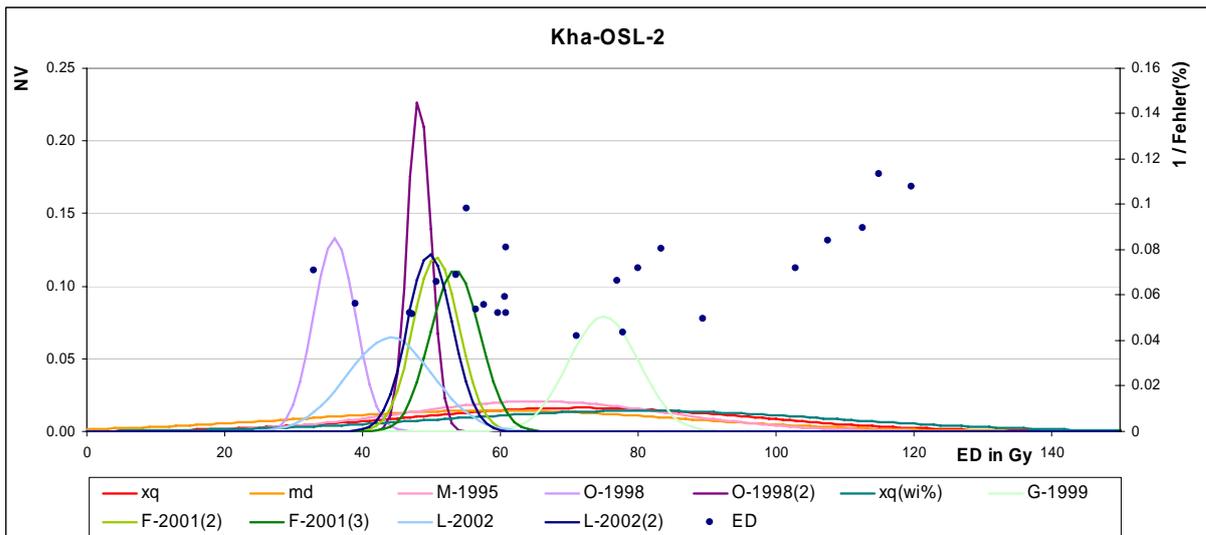
**Abb. 32: Darstellung der Normalverteilungsfunktionen (NV) aus PD und ihrer sd nach den untersuchten statistischen Verfahren von Kha-OSL-1** (xq: arithmetische Mittel; md: Median; xq(wi%): präzisionsgewichtetes Mittel; M: Murray et al.; O: Olley et al.; G: Galbraith et al.; F: Fuchs & Lang; L: Lepper & McKeever; ED: Äquivalenzdosen zu 1/Fehler(%); (4): Anzahl unterer Ausreißer)

## Kha-OSL-2

Bei den Berechnungen der ED traten häufig hohe Fehler im Testdosis-Signal (bis 20 %) und der RR (bis 44 %) auf. Die NP konnten dagegen gut wiedergegeben werden. 24 geeignete ED wurden mit einem relativ niedrigen durchschnittlichen Fehler von 15,7 % ermittelt. Das arithmetische Mittel liegt bei 71,6 Gy bei einer relativen sd von 34,3 %. Der wiederum niedrigere Median (58,8 Gy) weist auf eine Beeinflussung des xq durch obere Extrema hin, die in der ED-Verteilung als eine Gruppe von fünf ED zu erkennen sind. Das Verfahren nach MURRAY et al. (1995) erfasst diese Gruppe nicht vollständig, die PD liegt über dem Median und die weiterhin sehr breite Streuung (29,4 %) zeigt sich in der Abb. 33 als flache Kurve wenig konzentrierter Werte. Aus den Ergebnissen der DR-Tests ergab sich dagegen eine probenspezifische Variabilität  $v_{DR}$  von 6,4 %.

Die Methode der low5% verdeutlicht wiederum den Einfluss unterer Extrema. Für die Vergleichsberechnung ohne die nach der ED-Verteilung wahrscheinlichen zwei unteren Ausreißer wurde N auf drei Werte angehoben, da ED3 und 4 sehr nah beieinander liegen und sich aus ihnen eine unrealistische sd weit unter  $v_{DR}$  ergäbe. Die PD liegen bei 36,0 bzw. unter Ausschluss der Ausreißer bei 48,3 Gy. Das gleitende Mittel gibt ohne und mit einem Ausreißer eine relative sd von ca. 9 % wieder, die im Hinblick auf die  $v_{DR}$  zwei Ausreißer bestimmt. Auf Grundlage dieser Annahme zeigen die Methoden am unteren Dosisrand sehr

gute Vergleichbarkeit mit PD zwischen 48,3 und 50,7 Gy. Relativ unempfindlich gegenüber den möglichen Ausreißern verhält sich die Methode nach LEPPER & MCKEEVER (2002), nach der eine robuste Häufigkeitsverteilung mit markanter leading edge aufgebaut werden konnte. Die PD liegt bei  $44,0 \pm 6,2$  Gy bzw.  $49,8 \pm 3,3$  Gy. Die PD der leading edge ohne die zwei unteren Ausreißer scheint im Vergleich zu den anderen Methoden (Abb.) den als gut gebleicht ermittelten Anteil der ED-Verteilung wiederzugeben. Aus ihr wurde das Alter von  $21.926 \pm 2.166$  a BP berechnet.



**Abb. 33:** Darstellung der Normalverteilungsfunktionen (NV) aus PD und ihrer sd nach den untersuchten statistischen Verfahren von Kha-OSL-2 (xq: arithmetische Mittel; md: Median; xq(wi%): präzisionsgewichtetes Mittel; M: Murray et al.; O: Olley et al.; G: Galbraith et al.; F: Fuchs & Lang; L: Lepper & McKeever; ED: Äquivalenzdosen zu 1/Fehler(%); (2)-(3): Anzahl unterer Ausreißer)

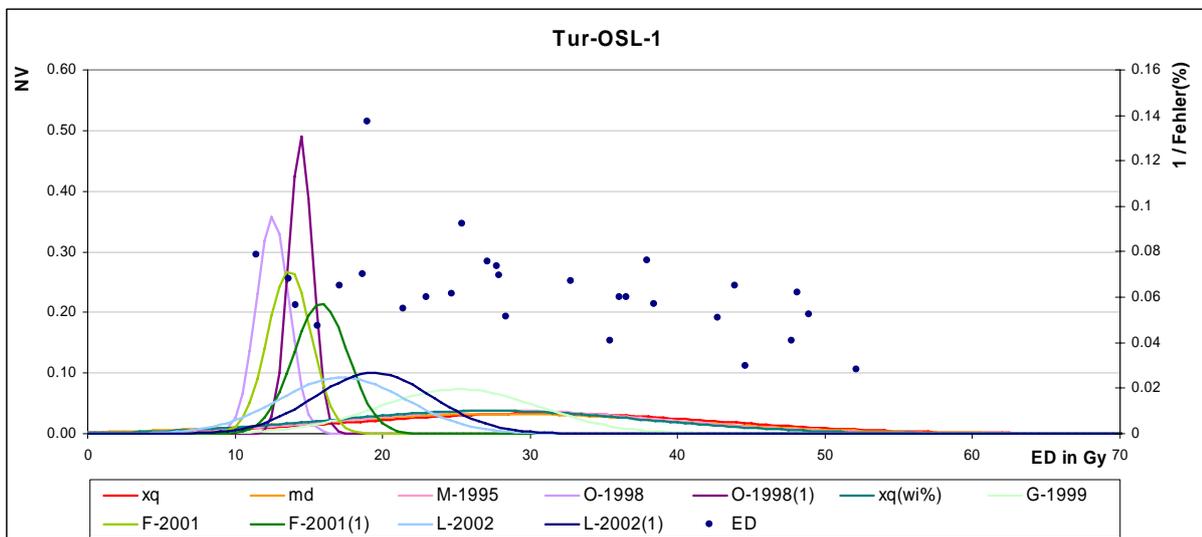
### 5.3.4 Ergebnisse der Turakh-Sektion

#### Tur-OSL-1

In die Berechnungen der PD konnten 28 geeignete ED aus 40 gemessenen einbezogen werden (Abb. 34). Probleme traten z.T. beim Testdosisfehler oder dem NP auf. Nur einzelne Ausleuchtcurven zeigten einen erhöhten BG. Die Wachstumskurven spiegelten generell die Messergebnisse mit relativ geringem Fehler der Kurvenanpassung wieder. Die Streuung um das arithmetische Mittel von 30,7 Gy beträgt 38,8 %. Der Median liegt wenig darunter (28,2 Gy) und deutet nur eine leichte Schiefe der ED-Verteilung an. Markante Extremwerte oder Konzentrationen von ED treten nicht in Erscheinung. Die ED sich ziemlich gleichmäßig über den Bereich von 11 – 53 Gy verstreut. DR-Tests wiesen einen Variationskoeffizienten von 9,0 % auf.

Die statistischen Methoden beziehen sich vor allem auf das unterste Drittel der ED-Verteilung und zeigen daher sehr ähnliche Ergebnisse zwischen 10 und 20 Gy. Die low5% ergaben 12,6 bzw. ohne einen Ausreißer 14,4 Gy. Letztere wurde wiederum wegen der sonst unrealistisch

niedrigen sd zu Vergleichszwecken aus drei ED bestimmt, anstatt der generell verwendeten zwei Werte. Wegen der relativ gleichmäßigen Verteilung der ED über den Dosisbereich überschreitet die sd des gleitenden Mittels nach FUCHS & LANG (2001) die  $v_{DR}$  schon nach wenigen Werten, unabhängig von der Anzahl der angenommenen Ausreißer. Es konnte maximal ein unterer Ausreißer objektiv ausgeschieden werden, nach dem sich die PD von  $15,8 \pm 1,9$  Gy berechnet. Die Häufigkeitsverteilung nach LEPPER & MCKEEVER (2002) zeigte zwar keine echte leading edge, spiegelt aber gut die gleichmäßige Streuung ohne echtes Häufigkeitsmaximum der ED wieder. Bezieht man die Vermutung von einem unteren Ausreißer ein, berechnet sich die PD mit  $19,41 \pm 4,0$  Gy. Über die sd werden die Ergebnisse der anderen Methoden weitgehend eingeschlossen. Daher erscheint diese Methode repräsentativ um das Sedimentationsalter bei  $9.387 \pm 1.950$  a BP zu bestimmen.

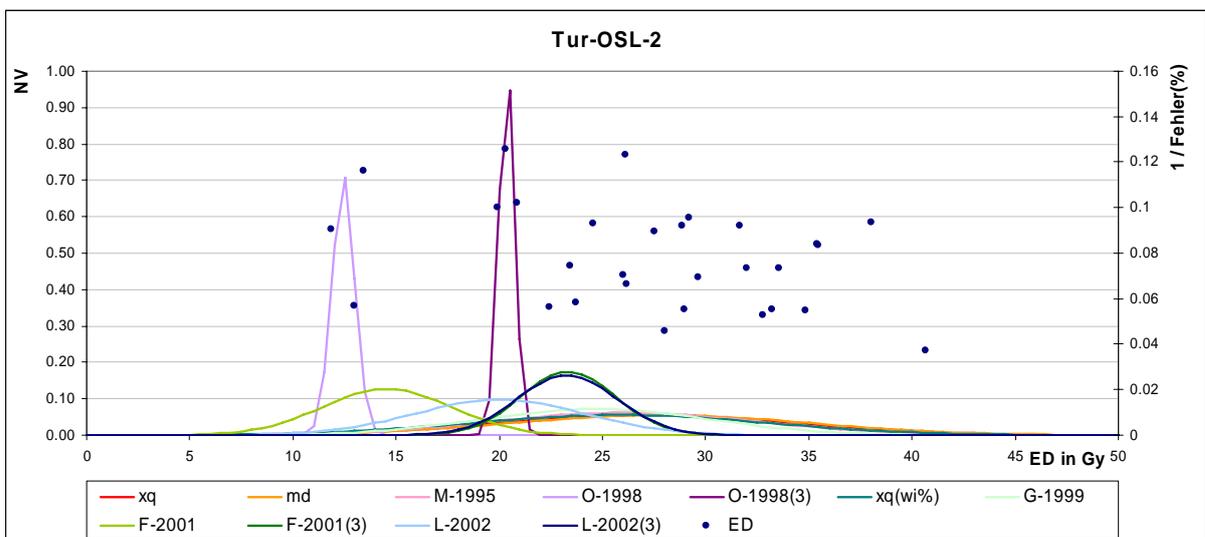


**Abb. 34: Darstellung der Normalverteilungsfunktionen (NV) aus PD und ihrer sd nach den untersuchten statistischen Verfahren von Tur-OSL-1** (xq: arithmetische Mittel; md: Median; xq(wi%): präzisionsgewichtetes Mittel; M: Murray et al.; O: Olley et al.; G: Galbraith et al.; F: Fuchs & Lang; L: Lepper & McKeever; ED: Äquivalenzdosen zu 1/Fehler(%); (1): Anzahl unterer Ausreißer)

## Tur-OSL-2

In die statistischen Berechnungen zur Bestimmung der PD gingen 29 ED von 40 gemessenen ein. Probleme bereitete erneut die Testdosis, die z.T durch das Einbeziehen des vorhergehenden BG ausgeglichen werden konnten, oder ein leicht erhöhter NP. Generell konnten die ED mit einem relativ niedrigen Fehler von 13,9 % bestimmt werden. Das arithmetische Mittel der ED-Verteilung liegt bei 27,3 Gy und streut mit einer relativen sd von 26,2 %. Markant erscheinen drei besonders niedrige ED zwischen 11,8 und 13,4 Gy. Die restlichen ED verteilen sich abgesehen davon gleichmäßig über den Bereich von 19,9 bis 40,6 Gy. Das Mittel der schlechteren Ergebnisse der DR-Tests der ersten Messung gegenüber denen der zweiten kann die probenspezifische Variabilität mit 9,7 % beschreiben.

Die Methode der low5% wurde beispielhaft zur Kennzeichnung der unteren Kante dieser beiden Bereiche der ED-Verteilung in Abb. 35 dargestellt. Die Abweichung vom gleitenden Mittel nach FUCHS & LANG (2001) zeigt einen markanten Sprung zwischen ED3 und 4, aus dem eine sd von ca. 20 % resultiert. Auch im Hinblick auf die Methode nach Lepper & McKeever 2002 können 3 untere Ausreißer vermutet werden, wonach sich sehr gut vergleichbare PD beider Verfahren von  $23,4 \pm 2,3$  Gy bzw.  $23,3 \pm 2,4$  Gy ergeben. In der Häufigkeitsverteilung nach LEPPER & MCKEEVER (2002) strecken diese 3 Werte die ansonsten recht gut ausgebildete leading edge und bedingen die große sd. Das Alter wird nach FUCHS & LANG (2001) auf  $11.119 \pm 1.144$  a BP bestimmt.



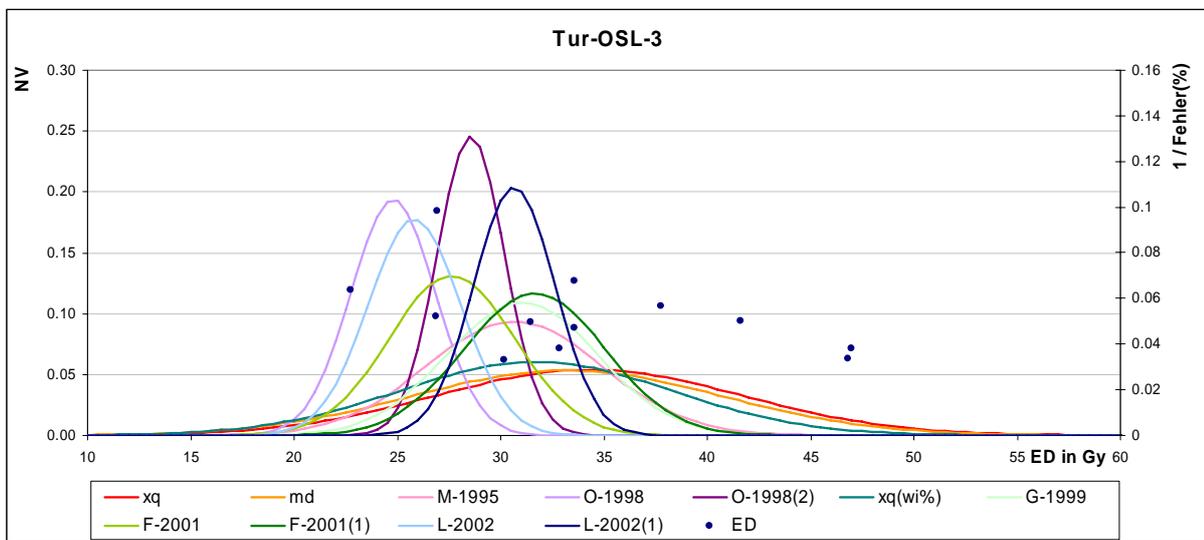
**Abb. 35 : Darstellung der Normalverteilungsfunktionen (NV) aus PD und ihrer sd nach den untersuchten statistischen Verfahren von Tur-OSL-2 (xq: arithmetische Mittel; md: Median; xq(wi%): präzisionsgewichtetes Mittel; M: Murray et al.; O: Olley et al.; G: Galbraith et al.; F: Fuchs & Lang; L: Lepper & McKeever; ED: Äquivalenzdosen zu 1/Fehler(%); (3): Anzahl unterer Ausreißer)**

### Tur-OSL-3

Für diese Probe liegt nur eine Messreihe mit 20 Aliquots vor, aus der 12 ED als geeignet für weitere Analysen gelten können. Einige Aliquots zeigten niedrige Signale mit demgegenüber hohem BG. Die größten Probleme ergaben sich beim NP und z.T auch bei der RR. Nur untergeordnet traten Testdosisfehler auf. Die Bestimmung der ED erfolgte mit einem durchschnittlichen Fehler von 20,9 %. Die ED streuen um das arithmetische Mittel von 34,3 Gy mit 21,6 %, wodurch eine heterogene Bleichung angezeigt wird. Der ähnlich große Median (33,2 Gy) spricht für eine fast symmetrische ED-Verteilung. Aufgrund der wenigen ED sind Extremwerte schwierig abzugrenzen. Aus den DR-Tests wurde die Variabilität  $v_{DR}$  von 9,9 % berechnet. Anhand dieses Grenzwertes kann durch das gleitende Mittel kein unterer Auserreißer eindeutig ausgewiesen werden.

Die angewandten statistischen Methoden decken hauptsächlich die untere Hälfte der Werteverteilung zwischen 22 und 34 Gy ab (Abb. 36). Im Vergleich zur tiefer gelegenen und

damit theoretisch älteren Probe Tur-OSL-2, können, wenn überhaupt, nur die niedrigsten ED annähern gut gebleicht sein. Die sd der low5% ( $24,8 \pm 2,1$  Gy), berechnet aus ED1 und 2, gibt methodisch bedingt höchstens zufällig die natürliche Variabilität der Probe wieder. Bedingt durch die  $v_{DR}$  führt die Berechnung der gleitenden Mittels zu einer relativ hohen PD bei  $27,6 \pm 3,0$  Gy, was knapp über dem  $x_q$  von Tur-OSL-2 liegt. Daher wird die Methode nach LEPPER & MCKEEVER (2002) bevorzugt. Deren Häufigkeitsverteilung zeigt eine markante leading edge und berechnet eine PD von  $25,8 \pm 2,2$  Gy. Das Alter wurde danach auf  $12.941 \pm 1.407$  a BP bestimmt. Die Sicherheit dieses Alters erscheint im Hinblick auf die wenigen einbezogenen ED und auch im Vergleich zu der parallel vorliegenden Tur-OSL-4 fraglich.



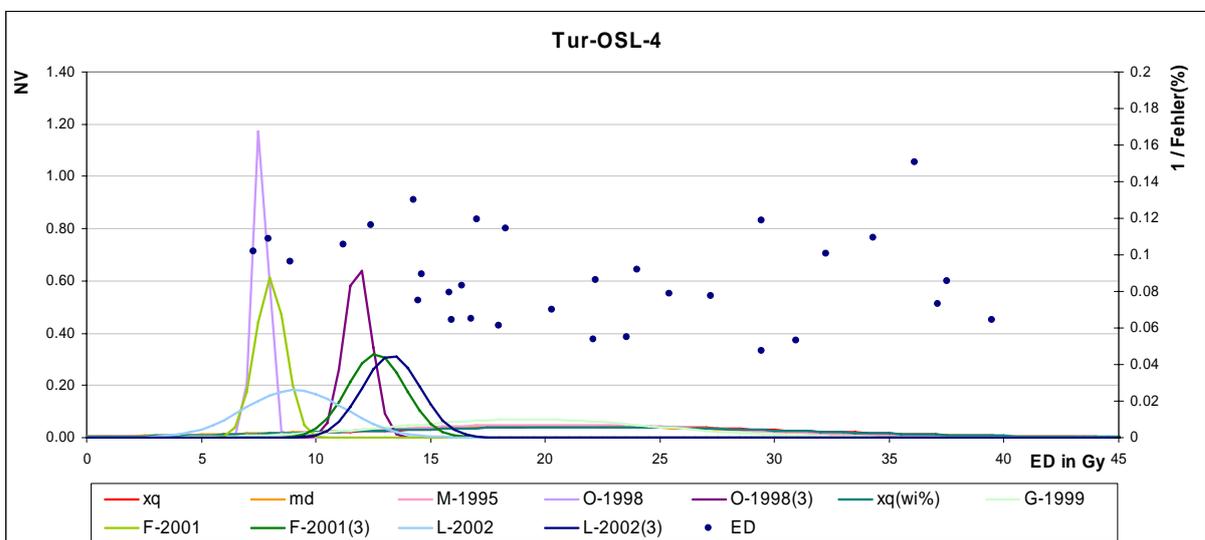
**Abb. 36: Darstellung der Normalverteilungsfunktionen (NV) aus PD und ihrer sd nach den untersuchten statistischen Verfahren von Tur-OSL-3** ( $x_q$ : arithmetische Mittel; md: Median;  $x_q(wi\%)$ : präzisionsgewichtetes Mittel; M: Murray et al.; O: Olley et al.; G: Galbraith et al.; F: Fuchs & Lang; L: Lepper & McKeever; ED: Äquivalenzdosen zu 1/Fehler(%); (1): Anzahl unterer Ausreißer)

## Tur-OSL-4

Aus den gemessenen 40 Aliquots wurden 31 geeignete ED ermittelt. Die Wachstumskurven konnten für einzelne Aliquots nicht bestimmt werden und relativ häufig lag der NP hoch. Da die ED bis zu einem NP von 10 % einen vergleichbaren Dosisbereich abdecken, konnten diese mit in die Berechnung einbezogen werden. Der durchschnittliche ED-Fehler liegt dann immer noch recht niedrig bei 12,3 %. Wegen der sehr gleichmäßigen, großen Streuung mit ED einer Reichweite von 7 – 40 Gy weist das arithmetische Mittel bei 22,0 Gy eine sd von 41,9 % auf. Dieses  $x_q$  liegt noch knapp unterhalb der niedrigsten gemessenen ED von Tur-OSL-3, die parallel im selben Profil genommen wurde. Da beide Proben theoretisch die gleiche Dosis repräsentieren sollten, kann für diese Probe von einer weit besseren Bleichung des niedrigen Dosisbereichs ausgegangen werden und es werden sogar untere Ausreißer möglich (Abb. 37). Potentielle Ausreißer stellt die Gruppe der niedrigsten drei ED. Weitere wären sehr spekulativ. Anhand der DR-Tests wurde die probenspezifische Variabilität  $v_{DR}$  mit

7,9 % bestimmt, die nach dem gleitenden Mittel genau diese drei unteren Ausreißer als wahrscheinlich nahelegt.

Die Methoden des unteren Dosisbereichs zeigen bei der selben Ausreißerzahl vergleichbare PD, bei den angenommenen drei im Bereich von 11,8 – 13,3 Gy. Die low5% geben wieder nur die Untergrenze des als gut gebleicht vermuteten Teil der ED-Verteilung wieder. Das Verfahren nach LEPPER & MCKEEVER (2002) zeigte sich ungünstig wegen der geringen ED-Fehler und der einhergehend hohen Anzahl von Klassen für das gesamte ED-Dosisspektrum. Ohne die drei Ausreißer konnte eine etwas differenziertere Häufigkeitsverteilung mit einer mäßigen leading edge ermittelt werden, aus der die PD von  $13,28 \pm 1,3$  Gy hervorgeht. Die Methode nach FUCHS & LANG (2001) konnte ohne Probleme eine PD von  $12,6 \pm 1,2$  Gy ermitteln. Da diese PD gut von den anderen beiden Methoden unterstützt wird, errechnet sich aus ihr ein für die Probe repräsentativ erscheinendes Alter von  $6.330 \pm 748$  a BP.



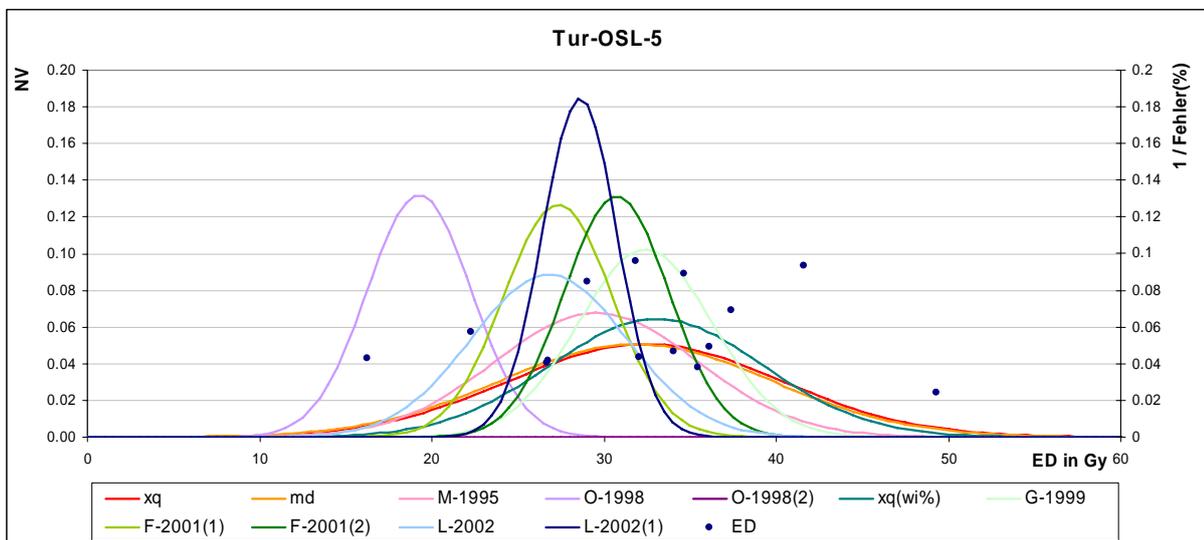
**Abb. 37: Darstellung der Normalverteilungsfunktionen (NV) aus PD und ihrer sd nach den untersuchten statistischen Verfahren von Tur-OSL-4** (xq: arithmetische Mittel; md: Median; xq(wi%): präzisionsgewichtetes Mittel; M: Murray et al.; O: Olley et al.; G: Galbraith et al.; F: Fuchs & Lang; L: Lepper & McKeever; ED: Äquivalenzdosen zu 1/Fehler(%); (3): Anzahl unterer Ausreißer)

## Tur-OSL-5

Die Messungen an insgesamt 20 Aliquots zeigen häufig Ausleuchtcurven mit hohem BG gegenüber einem relativ niedrigen OSL-Signal. In den Wachstumskurven treten generell hohe NP sowie teilweise hohe RR und Testdosisfehler auf. Durch die Akzeptanz eines NP bis 10 % und einer RR bis 20 % wurden 14 geeignete ED ausgeschieden, die einen durchschnittlichen Fehler von 20 % haben. Die Reichweite der ED beträgt 16,3 – 49,3 Gy (Abb. 38). Eine leichte ED-Konzentration tritt im Zentrum der Dosisverteilung auf, die nach dem ähnlichen xq und md bei 32 - 33 Gy relativ symmetrisch ist. Über Extrema an beiden Enden der Verteilung kann wegen den wenigen geeigneten ED nur spekuliert werden. Die relative sd von 24,3 %

gegenüber der  $v_{DR}$  von 7,5 % spricht für eine heterogene Bleichung und damit für die Bestimmung der PD anhand des unteren Bereichs der ED-Verteilung.

Geht man wie gewohnt vor (vgl. Proben weiter oben), vermutet man anhand des gleitenden Mittels und der  $v_{DR}$  ein bis zwei untere Ausreißer für die statistischen Berechnungen, deren PD zur Übersicht dargestellt werden. Die Ergebnisse tendieren stark in Richtung  $x_q$ , übereinstimmend mit der leichten Konzentration an ED. Die niedrigen  $sd$  scheinen aber die statistische Sicherheit, mit der die PD aus dieser Verteilung mit wenigen Werten ermittelt werden können, zu überschätzen. Wegen der symmetrischen Verteilung um die leichte Konzentration erscheint hier die Anwendung des Common Age Models nach GALBRAITH et al. (1999) zur Bestimmung der PD mit  $32,4 \pm 3,9$  Gy geeignet. Aber um der anzunehmenden heterogenen Bleichung Rechnung zu tragen, kann für diese PD nur ein Maximalalter von  $< 17.618$  a BP angegeben werden.

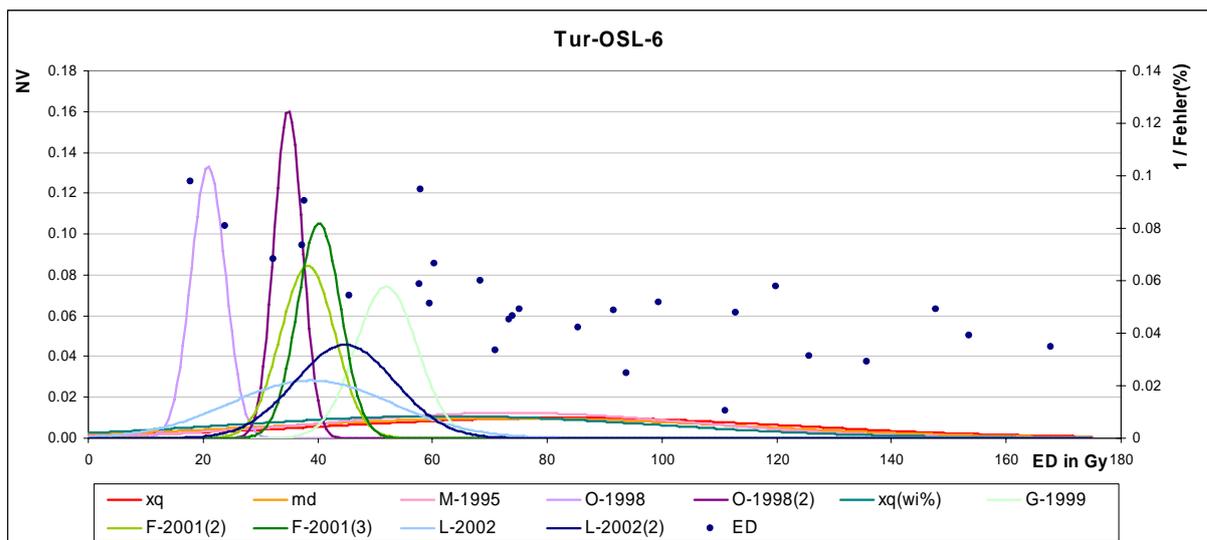


**Abb. 38: Darstellung der Normalverteilungsfunktionen (NV) aus PD und ihrer  $sd$  nach den untersuchten statistischen Verfahren von Tur-OSL-5** ( $x_q$ : arithmetische Mittel;  $md$ : Median;  $x_q(wi\%)$ : präzisionsgewichtetes Mittel; M: Murray et al.; O: Olley et al.; G: Galbraith et al.; F: Fuchs & Lang; L: Lepper & McKeever; ED: Äquivalenzdosen zu 1/Fehler(%); (1)-(2): Anzahl unterer Ausreißer)

## Tur-OSL-6

Da die erste Mess-Sequenz zu niedrig angesetzt war, konnten mit ihr nur 7 geeignete ED bestimmt werden. Aus der zweiten gingen dagegen alle 20 ED in die weiteren Analysen ein. Der durchschnittliche ED-Fehler beträgt 23,4 %. Bei niedrigen OSL-Signalen wich die Ausleuchtcurve stärker von den Achsen ab. Die Verteilung der ED nimmt ein extrem großes Dosispektrum von 17,9 bis 167,8 Gy ein (Abb. 39). Entsprechend streut  $x_q$  von 82,8 Gy mit  $v$  von 48,3 %. Der niedrigere Median von 73,5 Gy deutet auf eine asymmetrische, positiv gestreckte Verteilung und die Ergebnisse der DR-Tests auf eine Variabilität der Probe von 7,4 %. Insgesamt kann also von heterogener Bleichung ausgegangen werden und die für das Alter repräsentative PD sollte am unteren Ende der Dosisverteilung zu finden sein.

Die low5% kennzeichnen mit der PD von  $20,9 \pm 3,0$  Gy erneut den niedrigsten anzunehmenden Anteil gut gebleichter Aliquots. Zu methodischen Vergleichszwecken wurden die zwei wahrscheinlichen Ausreißer aus den Berechnungen nach FUCHS & LANG (2001) übernommen. Das abgeleitete Mittel berechnet schon im ersten Schritt  $v$  bei 14,3 % und ohne ED1 etwas darüber. Ohne die danach ausgeschiedenen zwei Ausreißer ermittelt sich die PD von  $38,2 \pm 4,7$  Gy. Die folgenden ED zeigen relative hohe sd gegenüber dem gleitenden Mittel, so dass unabhängig von der Annahme weiterer möglicher Ausreißer  $v_{DR}$  nach wenigen ED überschritten wird. Somit wird jeweils nur ein kleiner Bereich des weiten Gesamtspektrums abdeckt. Mit der Methode nach Lepper & McKeever (2002) wird die leichte ED-Konzentration bei etwa 70 Gy als Maximum der leading edge wiedergegeben. Durch die verstreut liegenden niedrigeren ED resultiert ein gestreckter Anstieg der Häufigkeitsklassen. Ohne die zwei vermuteten Ausreißer verdeutlicht sich die leading edge und die PD kann mit  $44,74 \pm 8,7$  Gy relativ zuverlässig bestimmt werden. Daraus ließ sich das Alter der Probe auf  $24.228 \pm 5.574$  a BP berechnen.



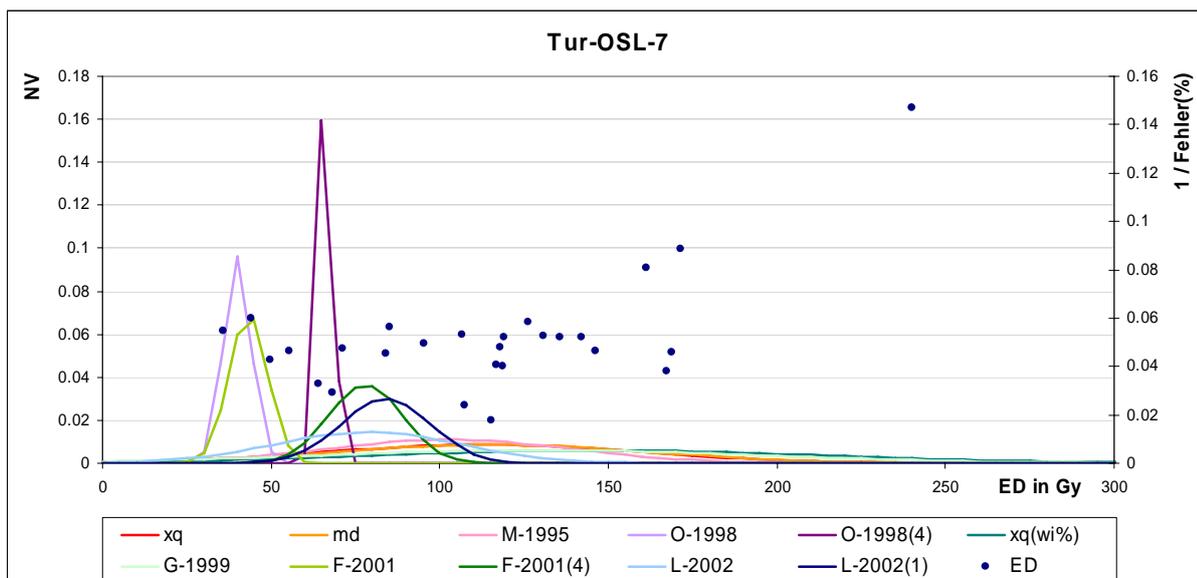
**Abb. 39 :** Darstellung der Normalverteilungsfunktionen (NV) aus PD und ihrer sd nach den untersuchten statistischen Verfahren von Tur-OSL-6 (xq: arithmetische Mittel; md: Median; xq(wi%): präzisionsgewichtetes Mittel; M: Murray et al.; O: Olley et al.; G: Galbraith et al.; F: Fuchs & Lang; L: Lepper & McKeever; ED: Äquivalenzdosen zu 1/Fehler(%); (2)-(3): Anzahl unterer Ausreißer)

## Tur-OSL-7

Von den 40 gemessenen Aliquots konnten 27 ED in die statistische Auswertung einbezogen werden. Einige OSL-Signale lagen oberhalb der Wachstumskurve, so dass für sie keine ED bestimmt werden konnte. NP und RR zeigten allgemein gute Ergebnisse, nur die Kurvenanpassung an die Dosispunkte der Wachstumskurve bedingte z.T. erhöhte ED-Fehler ( $\varnothing$  22,5 %). Die Verteilung der ED stellt sich relativ gleichmäßig dar, in der nur die höchste ED als oberer Extremwert heraussticht. Das xq beträgt 112,8 Gy mit einer relativen sd von 40,8 %. Bedingt durch die leichte ED-Konzentration im etwas höheren Dosisbereich liegt der

Median leicht über  $x_q$ . Nach den pauschal zugrunde gelegten drei oberen Extrema bei MURRAY et al. (1995) ergibt sich immer noch eine Abweichung vom Mittel von 35,5 %. Im Hinblick auf die  $v_{DR}$  von 12,6 % kann von heterogener Bleichung und der „wahren“ PD im unteren Dosispektrum ausgegangen werden. Von den acht DR-Tests konnten nur drei  $ED_{DR}$  wegen hohen Testdosisfehlern und schlechten Wachstumskurven berechnet werden. Diese Probleme traten in den OSL-Berechnungen nicht so stark auf. Die hohe  $v_{DR}$  macht die Beurteilung von unteren Ausreißern schwierig, die wie erwähnt große Bedeutung für die statistischen Methoden des unteren Dosisbereichs auf die Bestimmung der PD haben. Anhand der ED-Verteilung erscheinen ein bis vier untere Ausreißer zwischen 35,8 und 55,4 Gy möglich. Diese Werte liegen in dem Dosisbereich, der für die Berechnung der PD von Tur-OSL-6 als repräsentativ bestimmt und daher genutzt wurde. Konsequentermaßen müssen also diese vier niedrigsten ED die PD von Tur-OSL-7 unterschätzen.

Die PD der low5% ergeben je nach Ausreißerbetrachtung, in Abb. 40 beispielhaft ein und vier, zwischen 40,0 und 66,2 Gy. Das gleitende Mittel übersteigt trotz der relativ hohen  $sd$  zwischen den niedrigsten fünf ED die oben beschriebene schlechte  $v_{DR}$  nicht. Die relativen  $sd$  sind ab der fünftniedrigsten ED geringer (3 – 10 %), was die Annahme von vier Ausreißern zu stützen scheint. Die PD errechnet sich danach mit  $78,0 \pm 10,9$  Gy. Das Maximum der Häufigkeitsverteilung nach LEPPER & MCKEEVER (2002) orientiert sich an der leichten ED-Konzentration zwischen 110 und 140 Gy. Wegen der weiten Streuung unterhalb dieses Bereichs resultiert eine negativ gestreckte Verteilung ohne markante leading edge. Erst ohne die vier wahrscheinlichen Ausreißer tritt sie deutlich in Erscheinung und die PD kann mit  $84,0 \pm 13,2$  Gy bestimmt werden. Aufgrund der schlechten DR-Ergebnisse wird die PD der leading edge zur Altersbestimmung genutzt und daraus  $36,621 \pm 5.852$  a BP ermittelt.



**Abb. 40:** Darstellung der Normalverteilungsfunktionen (NV) aus PD und ihrer  $sd$  nach den untersuchten statistischen Verfahren von Tur-OSL-7 ( $x_q$ : arithmetische Mittel;  $md$ : Median;  $x_q(wi\%)$ : präzisionsgewichtetes Mittel; M: Murray et al.; O: Olley et al.; G: Galbraith et al.; F: Fuchs & Lang; L: Lepper & McKeever; ED: Äquivalenzdosen zu  $1/Fehler(\%)$ ; (1)-(4): Anzahl unterer Ausreißer)

## 6 INTERPRETATION UND DISKUSSION

### 6.1 Geochronologische Interpretation der Profile

#### 6.1.1 Profile von Bunge-Land

Die zwei Aufschlüsse auf Bunge-Land können anhand der OSL-Alter eindeutig voneinander unterschieden werden. Der Aufschluss mit Bun-4 und 5 im höher anstehenden südöstlichen Bereich (high terrace) wurde auf Grundlage von  $^{14}\text{C}$ -Altern (SCHIRRMEISTER 2008, persönl. Mitteilung) statistisch untersucht und daraus spätpleistozäne bis mittelholozäne Alter zwischen ca. 12.600 und 5.500 a BP abgeleitet (Abb. 41). Die heterogene Bleichung während des Sedimentationprozesses spiegelt sich in den großen Streuungen der Dosisverteilung gegenüber deutlich niedrigeren  $v_{\text{DR}}$  wieder. Die statistischen Methoden nach FUCHS & LANG (2001) sowie Lepper & McKeever (2002) konnten gut den ausreichend gebleichten Dosisbereich erfassen und stimmen unter Berücksichtigung der  $sd$  mit den  $^{14}\text{C}$ -Altern überein. Die unabhängig von  $^{14}\text{C}$ -Datierungen untersuchte Bunge-3 verhält sich recht ähnlich wie Bunge-2. Beide Proben liegen im active layer. Allerdings kann hier das Alter wegen der schlechten  $v_{\text{DR}}$  der ersten DR-Sequenz sicherer mit der PD aus dem Verfahren nach LEPPER & MCKEEVER (2002) ermittelt werden. Das hohe Alter nahe der Profilloberfläche spricht dafür, dass hier innerhalb der letzten 5.500 a etwa 0,5 m sedimentiert wurden. Im Vergleich zum unteren Profilbereich von fast 3 m, die in einer ähnlichen Zeitspanne abgelagert wurde, zeichnet sich ein Übergang von Sedimentations- zu Erosionsbedingungen ab. Entweder wurden die jüngeren Sedimente verlangsamt bis gar nicht mehr abgelagert, oder sie sind anschließend wieder abgetragen worden. In diesem obersten Bereich tritt starke Kryoturbation auf. Nimmt man an, dass die aufgetretene hohe Streuung in Bunge-3 nicht durch schlechte Bleichung sondern durch Sedimentvermischung im Zuge der Kryoturbation zustande kommt,

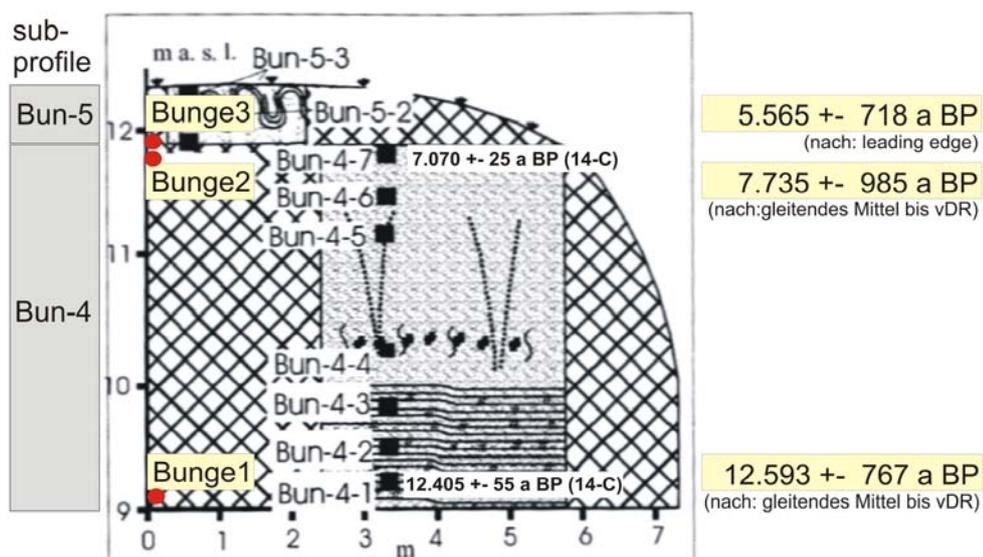


Abb. 41: OSL-Alter der Subprofile Bun-4 und Bun-5 von Bunge-Land, Neusibirische Inseln (SCHIRRMEISTER et al. 2003b)

muss das Alter wegen der Kontamination mit jüngerem Material noch höher eingeschätzt werden.

Das küstennah gelegene Profil Bun-7 der flachen Sandebene, die den Hauptteil von Bungeland ausmacht und zum großen Teil episodischen Überflutungen unterliegt, waren wesentlich jünger (Abb. 42). Generell konnten aber nur wenige ED bestimmt bzw. in die statistische Auswertung einbezogen werden. Die niedrigen OSL-Signale mit hohen BG, NP, RR und TDE werden als Resultat des jungen Sedimentationsalters gedeutet, in dessen Dosisbereich sich v.a. bei Bunge-5 noch kein eindeutiges Signal messen lässt. Auffällig waren aber auch die schlechte Reproduzierbarkeit in den DR-Tests. Sie könnten Hinweis geben, dass in diesem Subprofil Quarze eines anderen Ursprungsgebietes vorliegen bzw. erst wenige Sedimentationszyklen „erlebt“ und damit eine geringe Lumineszenzsensitivität besitzen (KRBETSCHKE 2007, persönl. Mitteilung).

Der untere, gefrorene, schluffig, feinsandige Bereich (Eisgehalt 34 Gew.-%) wurde mit  $390 \pm 59$  a BP datiert. Für die Basis des oberen, ungefrorenen, fein- bis mittelkörnigen Sandes konnte wegen der geringen statistischen Grundlage nur mittels dem xq ein Maximalalter von  $< 170$  a BP bestimmt werden.

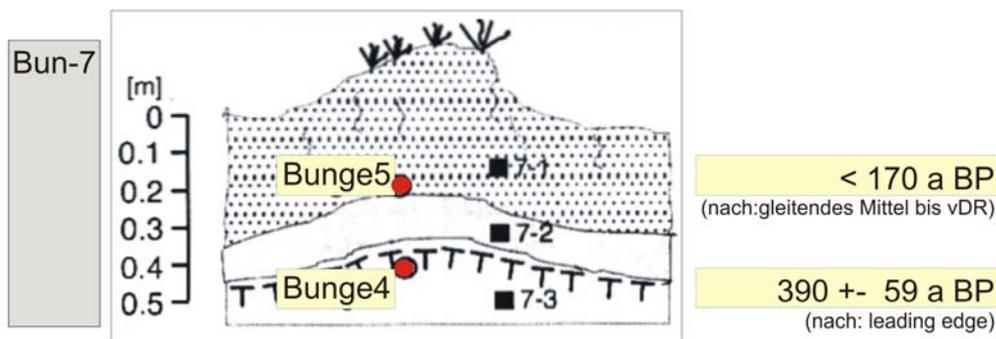


Abb. 42: OSL-Alter des Subprofils Bun-7 von Bunge-Land, Neusibirische Inseln (SCHIRRMESTER et al. 2003b)

## 6.1.2 Profile der dritten Terrasse

### Nagym-Sektion

Die Proben OLE3 – 5 der Nagym-Sektion zeigten durchweg sehr hohe relative sd von 22 – 64 % gegenüber dem xq und zeigen auch im Hinblick auf die  $v_{DR}$  eine heterogene Bleichung an. Daher wurde die dem Alter repräsentative PD aus dem niedrigen Dosispektrum abgeleitet, woraus sich OSL-Alter zwischen etwa 20 und 40 ka BP berechneten. Allgemein gut reagiert die Methode nach FUCHS & LANG (2001) auf die individuellen Dosisverteilungen. Wegen der schlechten DR-Ergebnisse wurde für OLE5 das Verfahren nach LEPPER & MCKEEVER (2002) bevorzugt. Eine Altersinversion tritt bei OLE3 auf (Abb. 43), für die die meisten ED in die statistische Auswertung einfließen konnten und daher die größte Sicherheit anzunehmen wäre. Das Alter von  $20.293 \pm 3.249$  a BP liegt fast 23.000 a unter dem aus xq und noch deutlicher

unter dem zuvor datierten IR-OSL-Alter, dessen Fehler aber ebenfalls für eine große Streuung spricht. Genau für diese Probe wurde ein extrem hoher in situ Wassergehalt festgestellt, der dem doppelten der Sättigung und damit einer starken Übersättigung entspricht, der so in keiner weiteren Probe auftrat. Eventuell könnte hier die Bestimmung der Radionuklide im trockenen Sediment die Konzentration von Strahlungsquellen pro Volumeneinheit überschätzen und die Akkumulation der gleichen ermittelten PD hätte dann eigentlich mehr Zeit gebraucht. In der Dosisverteilung von OLE4 wird wegen der hohen  $v_{DR}$  für das gleitende Mittel ein relativ großer Anteil der ED in die Berechnungen einbezogen. Danach beträgt das Alter im obersten Bereich der wellig gelagerten Sande  $36.312 \pm 5.214$  a BP und liegt etwa 3.200 a unter dem des xq. OLE5 bestimmt das Alter der oberen geschichteten Sande mit  $28.269 \pm 6.635$  a BP.

Das IR-OSL-Alter von OLE6 im obersten Bereich der sandigen Ablagerungen mit  $55 \pm 9$  ka widerspricht den jüngeren OSL-Altern ebenso wie die  $^{14}C$ -Datierungen der Basis des IC und des gesamten Profils. Es ist daher zu diskutieren, ob die Sande gemäß den OSL-Altern ins Kargin-Interstadial (22 – 50 ka) gestellt werden können. Die zahlreichen  $^{14}C$ -Alter ordnen dagegen den IC dieser Periode zu. Eine Berechnung der PD aus xq würde den Datierungsergebnissen der IR-OSL- und Radiokarbonmethode eher entsprechen. Doch die großen Standardabweichungen können dann kaum die nach  $v_{DR}$  abgeschätzte natürliche Variabilität wiedergeben. Nimmt man die älteren Datierungen als Grundlage, ist nicht geklärt woher die niedrigen OSL-Signalanteile in allen Proben kommen können.

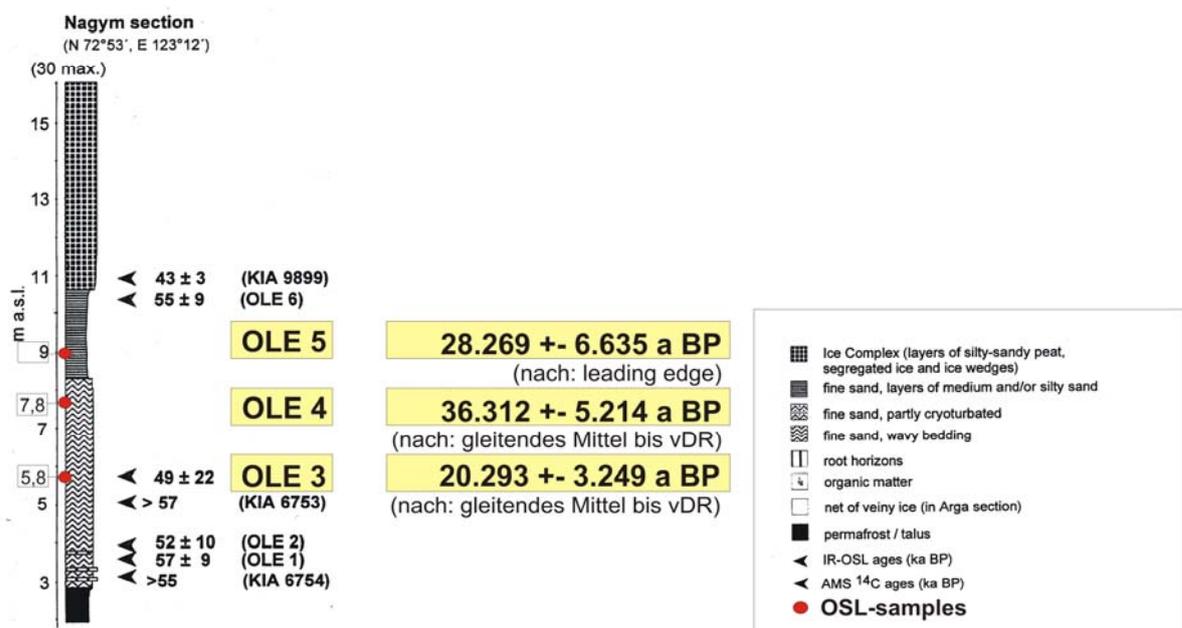


Abb. 43: OSL-Alter der Nagym-Sektion (KRBETSCHKE et al. 2002)

## Kurungnakh-Sektion

Durch die generell hohen Testdosisfehler, NP und RR konnten für die statistischen Auswertungen nur jeweils wenige ED einbezogen werden. Wegen den hohen sd gegenüber xq von 28,9 bzw. 47,6 % wird eine heterogene Bleichung beider Proben vorausgesetzt und die Bestimmung der PD anhand des unteren ED-Spektrums durchgeführt. Entsprechend der individuellen Dosisverteilung konnte die Methode nach FUCHS & LANG (2001) am besten angewandt werden. Die ermittelten OSL-Alter zwischen 30 und 54 ka entsprechen in etwa dem Kargin-Interstadial (Abb. 44). OLE8 datiert den unteren Profilbereich mit z.T. kryoturbaten Feinsanden auf  $53.504 \pm 8.747$  a BP, wobei der Fehler noch das Alter nach xq mit abdeckt. Die nur ca. 1,5 m höher gelegene OLE8b zeigte ein deutlich jüngeres Alter von  $30.113 \pm 5.096$  a BP. Hier ist das Alter aus xq um 16.700 a größer.

Beide OSL-Alter sind auch unter Berücksichtigung der Fehlerbereiche wesentlich jünger als die IR-OSL-Datierungen und widersprechen v.a. der Datierung von OLE10. OLE7 muss hingegen dem OSL-Alter von OLE8 keineswegs entgegenstehen. Im Vergleich zu den IR-OSL-Bestimmungen sind die  $^{14}\text{C}$ -Alter jedoch wiederum jünger, was durch die Bestimmungsgrenze bedingt sein kann. Die  $^{14}\text{C}$ -Alter rangieren zwar am Rande der methodischen Bestimmungsgrenze und zeigen zwischen IC und Sandeinheit eine Altersinversion, sind aber generell im Profilbereich über den OSL-Proben älter diese. Nur die Profilbasis wird jünger datiert. Sicherer konnte der die Sande überlagernde IC an zahlreichen Proben zwischen 50 und 17 ka BP bestimmt werden. Die OSL-Alter der liegenden Sande sollten demnach theoretisch älter sein als 50 bzw. 43 ka.

Parallelen ergeben sich zwischen dem OSL-Alter von OLE8 und den IR-OSL-Altern von OLE1 – 2, die die Sande der Profilbasis der Nagym-Sektion auf ca. 55 ka datieren. Ebenso sind die OSL-Ergebnisse von OLE8b im mittleren Bereich der Sande vergleichbar mit OLE4 und 5 zwischen 28 - 36 ka in der Nagym-Sektion. In sich sind die OSL-Alter konsistent. Unterschiede zeigen sich in der hier nach OLE7 älteren Profilbasis (88 ka BP) und der Datierung von ca. 30 ka BP mehr im mittleren Profilbereich, über dem hangend noch eine deutlich mächtigere Sandsequenz folgt, als dies in der Nagym-Sektion über der ähnlich alt datierten Schicht der Fall ist. Für weitere Interpretationen wären mehr OSL-Untersuchungen im oberen Bereich der Sandsequenz notwendig.

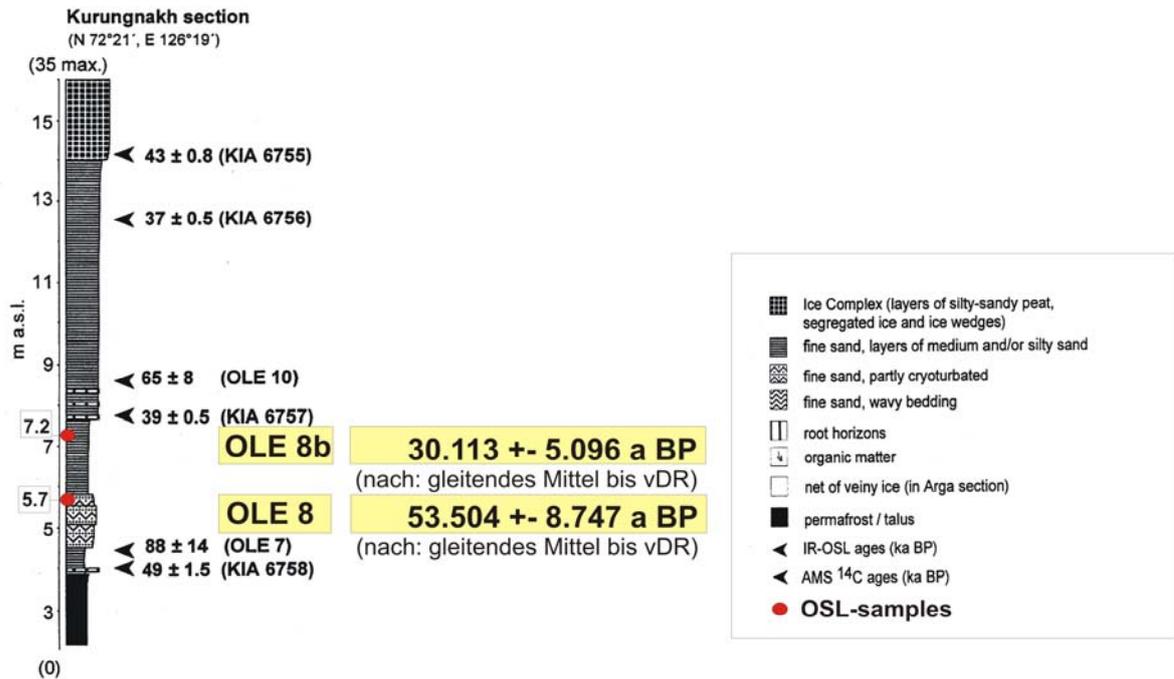


Abb. 44: OSL-Alter der Kurungnakh-Sektion (KRBETSCHKEK et al. 2002)

### Khاردang-Sektion

Die hohen relativen sd der beiden OSL-Proben von über 30 bis fast 50 % gegenüber einer probenspezifischen Variabilität von 6 – 10 % weisen auf eine heterogene Bleichung während der Ablagerung hin. Demnach ist von einem hohen Anteil schlecht gebleichter Körner auszugehen und nur die niedrigen ED können das Sedimentationsalter widerspiegeln. Die Methode nach FUCHS & LANG (2001) errechnet für Kha-OSL-1 (2 m ü.d.M) ein Alter von  $23.408 \pm 3.316$  a BP, wobei 4 untere Ausreißer statistisch abgegrenzt werden können und auch im Hinblick auf Kha-OSL-2 als wahrscheinlich erscheinen. Kha-OSL-2 (4 m ü.NN) ist nur wenig jünger mit  $21.926 \pm 2.166$  a BP nach LEPPER & MCKEEVER (2002) ohne die zwei niedrigsten Werte. Die Fehlerbereiche beider Proben überlappen sich. Interpretiert man relative hohe Ablagerungsraten (etwa 2 m in 1500 a) aus der geringen Altersdifferenz, kann daraus auch die heterogene Bleichung erklärt werden.

Im Vergleich zu zahlreichen <sup>14</sup>C-Datierungen von Kha-2 etwa 500 m entfernt vom untersuchten Profil Kha-1 sind die OSL-Alter auffallend niedrig. Direkte Übertragung der Radiokarbonalter erweist sich aber wegen den stratigraphischen Unsicherheiten (Abb. 45) als schwierig. Da die Basis der Sandsequenz nicht aufgeschlossen ist, kann die Lagebeziehung beider Proben zu den Einheiten am Olenyok-Kanal (Nagym-, Kurungnakh-Sektion) nicht sicher eingeschätzt werden. Die Alter sind um mindestens 10 ka jünger (abgesehen von OLE3) und könnten in der OSL-Chronologie den obersten Abschnitt der Sande unter dem IC dem ausgehenden Kargin-Interstadial zuordnen. Die <sup>14</sup>C-Ergebnisse der hangenden IC-Basis sprechen allerdings wieder für Alter von 50 – 44 ka (vgl. Nagym- und Kurungnakh-Sektion), was dem frühen Kargin entspricht.

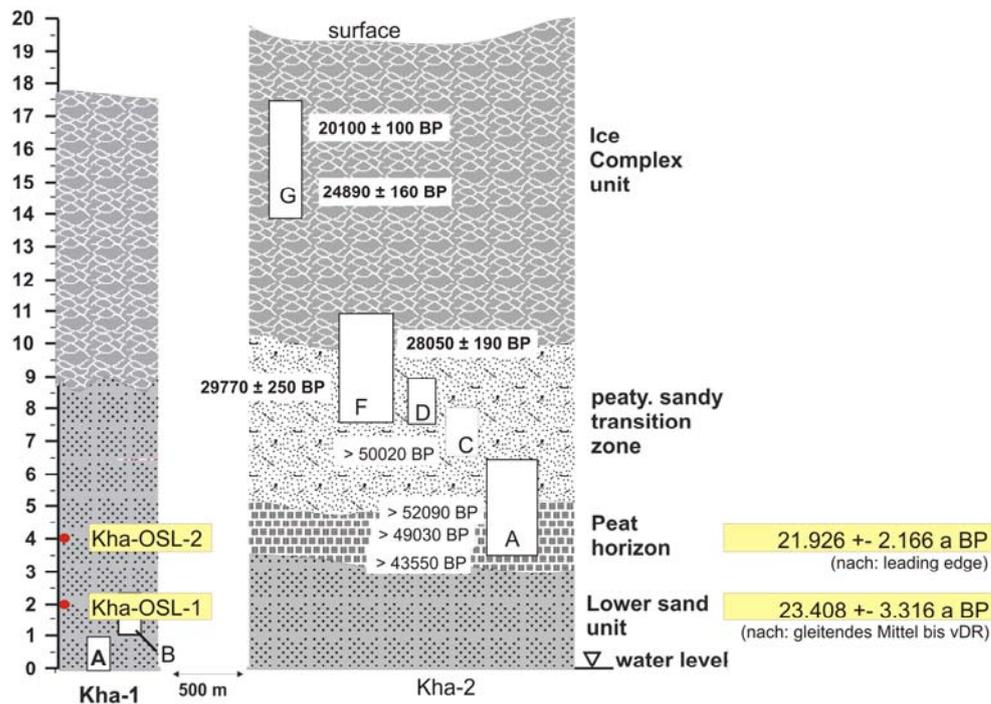


Abb. 46: OSL-Alter des Profils Kha-1 der Khardang-Sektion (SCHIRRMESTER et al. 2007)

### 6.1.3 Profile der zweiten Terrasse

#### Turakh-Sektion

Die beiden Profile Tur-1 und Tur-2 können gut stratigraphisch kombiniert werden über eine Referenzschicht etwa in Höhe des Wasserspiegels bei Tur-2 bzw. bei Tur-1 leicht versetzt mit 0,5 bis 1 m ü.d.M., die aus kreuzgeschichteten Fein- und Mittelsanden mit massiver Kryostruktur aufgebaut ist (vgl. Kap. 2.3.4).

Die OSL-Alter zeigen insgesamt steigende Alter mit zunehmender Tiefe von 6 – 37 ka BP (Abb. 47). Da relative sd zwischen 22 und 48 % auftraten, wurden zur statistischen Auswertung die Methoden nach FUCHS & LANG (2001) sowie LEPPER & MCKEEVER (2002) angewandt. Nur für Tur-OSL-5 erschien wegen den wenigen geeigneten ED und der symmetrischen Verteilung das Common Age Model nach GALBRAITH et al. (1999) besser geeignet um zumindest ein Maximalalter anzugeben. Markant ist die große Altersdifferenz zwischen den parallel genommenen Proben Tur-OSL-3 und 4 in Tur-1 bei ca. 2,5 m Tiefe. Da Tur-OSL-3 aus nur 13 geeigneten ED berechnet werden konnte, die mit einer Streuung von 21,6 % einen geringeren Anteil des Dosisspektrums von Tur-OSL-4 ( $v = 41,9\%$  aus  $N = 31$ ) abdecken, muss angenommen werden, dass keine gut gebleichten Aliquots gemessen werden konnten und daher das Alter überschätzt wird. Diese beiden OSL-Alter umschließen etwa das  $^{14}\text{C}$ -Alter in vergleichbarer Lage. 6 ka BP liegt dabei schon im Zeitfenster, für das allgemein der Beginn der Thermokarstprozesse auf der zweiten Terrasse angenommen wird. Für Tur-

OSL-2 unterhalb der Referenzschicht in Tur-1 zeigten die 29 in die Analyse einbezogenen ED ein Alter bei 11 ka BP.

Die stratigraphisch nur wenig niedriger gelegene Tur-OSL-1 des Bohrkerns Tur-2 wurde zwar jünger datiert (9 ka BP), allerdings überlappen sich die Fehlerbereiche der Alter und es kann daher nicht von einer Altersinversion gesprochen werden. Die liegenden OSL-Proben decken in chronologischer Folge die Altersspanne von 18 ka bis 37 ka BP ab, dabei ließen sich v.a. die beiden letzteren Proben relative gut bestimmen.

Im Vergleich zu vorliegenden  $^{14}\text{C}$ -Datierungen zeigen die OSL-Ergebnisse etwa halb so hohe Alter, wodurch sich v.a. im höheren Altersbereich Differenzen von über 20 ka ergeben. IR-OSL-Datierungen vom Nikolaysee (Arga Sise) hatten Alter von ca. 12 – 14 ka bei ca 23 – 27 m ü.d.M. Diese Alter sind vergleichbar mit den Proben Tur-OSL-1 bis 4 von Turakh Sise bei leichter Tendenz zu jüngeren Altern bzw. liegen zwischen den Datierungen von Tur-OSL-1 und Tur-OSL-5. Daher wird angenommen, dass sie vor allem mit dem oberen bis mittleren Profilabschnitt auf Turakh Sise parallel gesetzt werden können und dem Sartan-Glazial (10 – 22 ka BP) entstammen. Der untere Profilbereich auf Turakh Sise kann dagegen nach den OSL-Datierungen von 24 – 37 ka BP dem späten Kargin zugerechnet werden. Da die Profilbasis nicht erbohrt wurde, kann nicht abgeschätzt werden, inwieweit sich die Sandsequenzen im Liegenden der zweiten Terrasse fortsetzen.

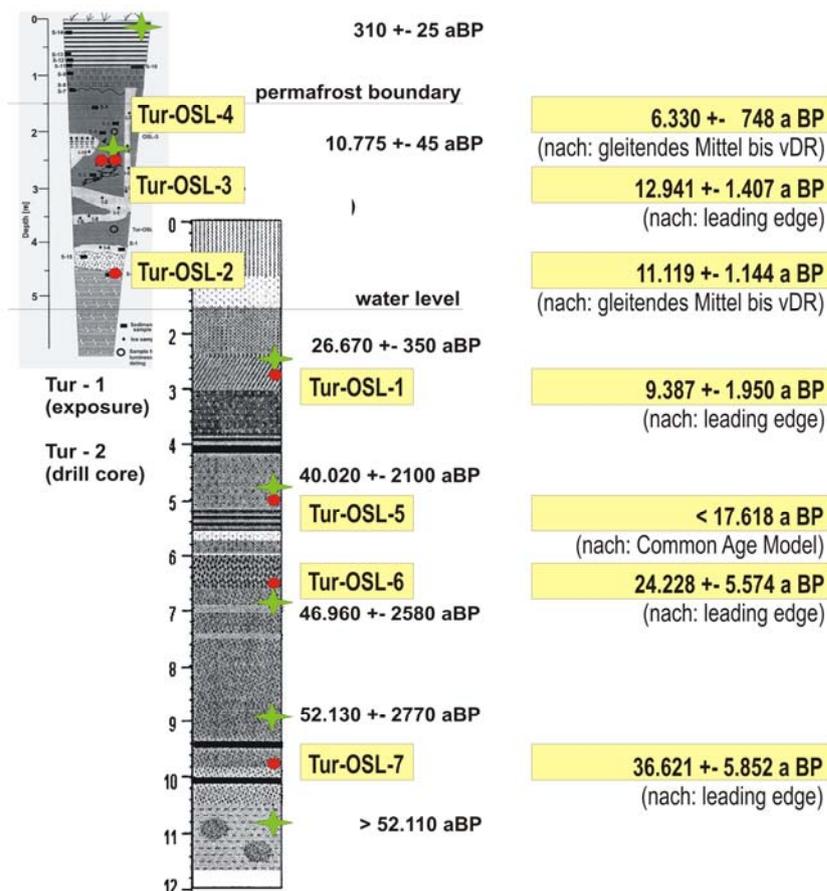


Abb. 47: OSL-Alter der Profile Tur-1 und Tur-2, Turakh-Sektion (SCHIRRMESTER et al. 2007)

### 6.1.4 Vergleich der OSL-Alter der zweiten und dritten Terrasse

Unabhängig von den wesentlich älteren  $^{14}\text{C}$ -Datierungen und z.T. auch IR-OSL-Altern zeigen die OSL-Alter untereinander konsistente Chronologien innerhalb der Profile und sind auch zwischen den Profilen für ähnliche stratigraphische Einheiten der Größenordnung nach vergleichbar. Die liegenden Sande der dritten Terrasse wurden danach zwischen 54 und 30 ka abgelagert und der mittlere bis obere Bereich der Sande unter dem IC etwa zwischen 30 und < 20 ka. Danach sind die Sandsequenzen der dritten Terrasse insgesamt ins Kargin-Interstadial zu stellen. Für eine genauere Bestimmung des Beginns der Sedimentation müssten aber entweder die IR-OSL-Alter von der Nagym- und Kurungnakh-Sektion übertragen oder neue OSL-Untersuchungen durchgeführt werden. Der mittlere bis obere Abschnitt der Sande kann mit den OSL-Datierungen des unteren Profilbereich auf Turakh Sise von 24 – 37 ka BP (evtl. sogar 17 – 37 ka BP) verglichen werden, die nach den OSL-Altern ebenfalls dem späten Kargin zugerechnet werden (Abb. 48). Da die Profilbasis nicht erbohrt wurde, kann nicht abgeschätzt werden, ob sich den untersten Sanden der dritten Terrasse vergleichbare Sequenzen im Liegenden der zweiten Terrasse fortsetzen (frühes bis mittleres Kargin).

Auf Grundlage dieser OSL-Alterschronologie kann interpretiert werden, dass die Sandsedimentation der Sequenzen sowohl unter dem IC der dritten Terrasse zwischen 54 bis < 20 ka als auch im Bereich des Arga-Komplexes der zweiten Terrasse stattgefunden hat. Während aber auf der dritten Terrasse der IC die Sande abschließt, setzte sich vermutlich auf der zweiten Terrasse die Sandsedimentation fort, deren OSL-Alter für eine Einordnung ins Sartan bis Holozän sprechen.

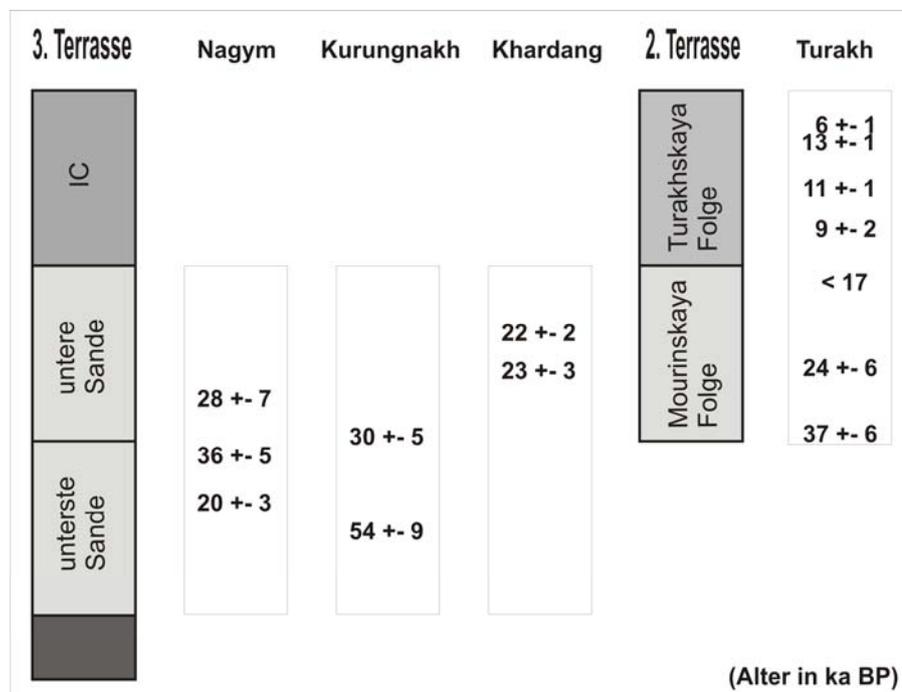
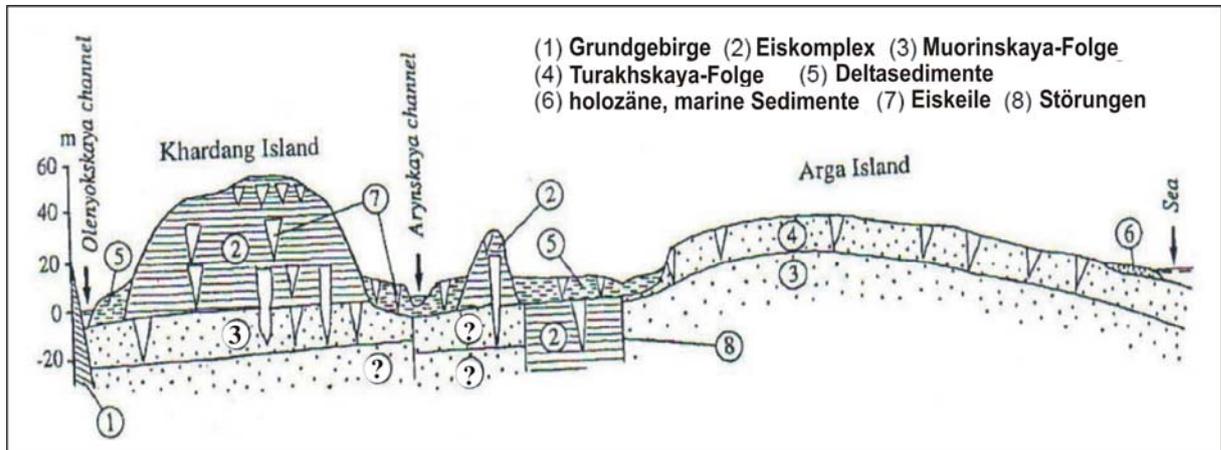


Abb. 48: Vergleich der OSL-Alter der zweiten und dritten Terrasse

Auch wenn man im Hinblick auf die zahlreichen älteren  $^{14}\text{C}$ -Datierungen die Proben nicht sicher nach den OSL-Altern absolut zeitlich einordnen kann, lassen sich doch relative

Überlegungen anstellen. Überträgt man die festgestellte OSL-Chronologie auf die Vermutungen zur Beziehung der dritten und zweiten Terrasse von GALABALA (1987), bestätigt sich die Fortsetzung der Turakhskaya-Folge unter dem IC nicht. Dagegen kann dies für die Muorinskaya-Folge durchaus angenommen werden (Abb. 49).



**Abb. 49: Schematische Darstellung der Ablagerungen im westlichen Lena-Delta** (nach: GALABALA 1987, GRIGORIEV et al. 2007; verändert)

Die Radiokarbonalter zeigen ebenfalls eine - wenn auch ältere - Chronologie. Während für den IC die  $^{14}\text{C}$ -Alter von 14 bis 43 ka BP dem stratigraphischen Zusammenhang folgen, sind in den unteren Sanden zahlreiche Altersinversionen anzutreffen Wegen der methodischen Bestimmungsgrenze. Die Alter liegen zwischen 37 und  $> 57$  ka BP. Die  $^{14}\text{C}$ -Alter der Turakh-Sektion im unteren Profilteil (Mourinskaya Folge) liegen zwischen 40 und  $> 52$  ka BP und zeigen damit vergleichbare Größenordnungen wie die Sande unter dem IC der dritten Terrasse, eine Parallele, wie sie auch in den OSL-Altern nachvollzogen werden kann. Die  $^{14}\text{C}$ -Alter im oberen Profilteil von 27 – 11 ka ähneln denen des IC, weshalb eine gleichzeitige Sedimentation vermutet werden kann.

Die Parallelen der Alter in der OSL- und der  $^{14}\text{C}$ -Chronologie unterstützen demnach eine stratigraphische Vergleichbarkeit der Sande unter dem IC von der dritten Terrasse mit dem unteren Profilbereich der Sande von der zweiten Terrasse und können als Muorinskaya Folge charakterisiert werden. Ob sie noch von einer weiteren Folge unterlagert ist, bleibt unsicher, da sie auf Turakh Sise nicht vollständig aufgeschlossen wurde und auf der dritten Terrasse mehr OSL-Alter nahe der Profilbasis notwendig wären. Weiterhin könnte eine gezielte Beprobung der obersten Bereiche unter dem IC mit anschließender OSL-Datierung klären, inwieweit im Westdelta ein möglicher Altersgradient von Süd nach Nord vorliegt, der eine Verlagerung des Sedimentationsraums anzeigen würde, wie dies auch in den holozänen Ablagerungen der ersten Terrasse beobachtet wurde.

## 6.2 Altersdifferenzen zwischen OSL und $^{14}\text{C}$

Auf Grundlage der Prüfung heterogener Bleichung anhand der auftretenden Streuung innerhalb einer Probe gegenüber der nach DR-Tests ermittelten probeneigenen Variabilität wurden alle OSL-Alter mit statistischen Methoden im niedrigen Dosisbereich ermittelt. Am Vergleichsprofil auf Bunge-Land konnten auf diese Weise die parallelen  $^{14}\text{C}$ -Alter gut reproduziert werden. Problematisch blieb die Abschätzung unterer Ausreißer, die für die Methoden des unteren Dosispektrums von besonderer Bedeutung sind.

Obwohl die Anwendung der erprobten Statistik im Lena-Delta eine in sich konsistente OSL-Chronologie ergibt, treten deutliche Altersdifferenzen zur Radiokarbonmethode auf, die einer Systematik zu unterliegen scheinen. Die Ursache dafür ist noch nicht bekannt.

Auch wenn die Differenzen mit dem Alter absolut zunehmen, entspricht dies doch einer prozentualen Beziehung. Generell sind die OSL-Alter annähernd halb so groß wie die  $^{14}\text{C}$ -Alter. Anhand der wegen der großen Streuung vermuteten heterogenen Bleichung wäre eher das Gegenteil zu erwarten gewesen, da in die OSL-Berechnungen anteilig Restsignale älterer Sedimentationszyklen einfließen könnten. Vergleichende Berechnungen anhand des arithmetischen Mittels ( $x_q$ ) stimmen deutlich besser mit den  $^{14}\text{C}$ -Altern überein, liegen aber z.T. immer noch leicht darunter. Es konnte zudem keine Begründung gefunden werden, warum  $x_q$  bei diesen ED-Verteilungen das Alter besser repräsentieren sollte und der PD-Bestimmung am unteren Dosisrand widersprochen wird.

Hinweise auf starke Kontaminationen durch jüngeres Material, die eine weit größere Zahl an unteren Ausreißern zur Folge hätten und das Alter an das aus  $x_q$  annähern würden, kann im Profil nicht nachvollzogen werden. Mittels einer größeren Anzahl von gemessenen Aliquots könnte zudem die statistische Sicherheit beachtlich erhöht werden und die Diskussion um Häufigkeitsmaxima und untere Extremwerte wesentlich vereinfachen. Generell sollten daher möglichst mehr als 50 Aliquots mit geeigneten Parametern für die Berechnungen genutzt werden. Der Einfluss von mikrodosimetrischen Inhomogenitäten, die eine erhöhte natürliche Variabilität gegenüber der im Labor bestimmten probenspezifischen ( $v_{\text{DR}}$ ) verursachen, weshalb eine größere Streuung der ED einer Probe akzeptiert werden müsste, konnte wegen fehlender Feldmessungen nicht überprüft werden. Diese würden sich v.a. auf die Berechnungen des gleitenden Mittels nach FUCHS & LANG (2001) auswirken, indem das Alter etwas erhöht würde. Die viel größeren Altersunterschiede können damit aber nicht erklärt werden.

Eine andere Ursache der gegenüber der  $v_{\text{DR}}$  erhöhten beobachteten Streuungen der ED könnte in den dynamischen Umlagerungen über kurze Transportstrecken innerhalb des Deltas liegen. Es kann angenommen werden, dass das Ausgangssignal aller Quarzkörner ist bei der Ankunft und Ablagerung im Delta gleich Null, da allgemein lange Transportstrecken in der Lena und eine Konzentration der geomorphologischen Aktivität auf den Sommer bei gleichzeitig hoher Sonnenscheindauer (Lichtexposition) vorliegt. Wenn dann weitere kurze Umlagerungszyklen mit unzureichender Bleichung der neu akkumulierten Strahlendosis folgen, bleiben verschieden große Restsignale übrig. Werden die Sedimente schließlich in stabiler Lagerung festgelegt, startet die Akkumulation der Strahlungsenergie auf unterschiedlichen Niveaus und zeigt resultierend eine größere Streuung. Doch eine Zunahme der Streuungen von der Lena-

Mündung zum Deltarandbereich wurde nicht beobachtet. Folglich sind die Streuungen doch stark im Zusammenhang zu den wahrscheinlich hochdynamischen Ablagerungsprozessen der Lena an sich begründet, die sich auch in sedimentaologischen Untersuchungen herausgestellt hatten, oder der Gradient der Streuungen konnte wegen der geringen Anzahl gemessener Aliquots nicht ausreichend erfasst werden.

Wenn also die jungen OSL-Alter der dritten Terrasse den wahren Sedimentationszeitpunkt repräsentieren, dann stammen die Sande unter dem IC aus dem letzten Kargin-Inerstadial (50 – 22 ka BP) und der IC müsste folglich jünger sein (< 22 ka BP, Sartan). Die <sup>14</sup>C-Datierungen der organischen Substanz des IC sprechen aber aus verschiedenen Profilen für Alter bis 50 ka BP, vergleichbar den OSL-Altern der unterlagernden Sande. Daraus folgend könnte im feuchteren und wärmeren Kargin die Bildung von torfigem Material im Chekanovsky Gebirge vorgeherrscht und eine zeitgleiche Sedimentation der Sande im Deltabereich stattgefunden haben. Die Abkühlung im letzten Stadial (Sartan) führte dann kältebedingt (periglazial) zu Aussetzen und Degradation der organischen Akkumulationen. Polygenetische Umlagerungen transportierten das organische Material aus der Chekanovsky Gebirgskette ins Delta, wo es über den Sanden abgelagert wurde. Die auf bis 50 ka BP datierten <sup>14</sup>C-Alter hätten in diesem Szenario also schon ein Alter von maximal 27 ka „mitgebracht“. Die jüngsten OSL-Alter in den Sanden bei ca. 21 ka BP müssten demnach den Beginn der Umlagerung aus dem Chekanovsky-Gebirge bestimmen und die <sup>14</sup>C-Alter den Zeitpunkt der Bildung organischen Materials bei geeigneten klimatischen Bedingungen. Die Zuordnung des IC-Materials zum südlich angrenzenden Chekanovsky-Gebirge ist über Schwermineralanalysen belegt worden. Da allerdings so zahlreiche <sup>14</sup>C-Alter in ähnlichen Altersregionen an unterschiedlichen Profilen und stratigraphischen Einheiten vergleichbare Altersbereiche abdecken, das Problem allochthonen Materials bekannt ist und es weitgehend bei der Probenahme Berücksichtigung fand, ist diese These unwahrscheinlich. Ebenso sind die <sup>230</sup>Th/ U-Datierungen weit älter (ca. 200 ka BP). Die älteren IR-OSL-Alter könnten durch die Verwendung des additiven Verfahrens (multiple aliquot) mit einhergehend hoher Streuung und durch die schlechter bleichenden Feldspäte verursacht werden. Allerdings passen die IR-OSL-Alter der Profilbasis der dritten Terrasse zu den OSL-Datierungen.

Zusammenfassend bleibt unverständlich, wie die deutlich jüngeren OSL-Alter zustande kommen und warum fast die gesamte untere Hälfte des Dosispektrums in allen OSL-Proben die <sup>14</sup>C-Alter so deutlich unterschätzen. Insgesamt konnten keine grundlegenden systematischen Probleme in der OSL-Methode gefunden werden, die diese beachtlichen Altersdifferenzen erklären könnten und einer Kopplung der jüngeren Alter an den wahren Sedimentationszeitpunkt widersprechen. Und auch bei höherer Anzahl gemessener Aliquots würden auf Grundlage der beschriebenen Theorien die Alter höchstens noch jünger werden.

Mögliche weitere Erklärungsansätze könnten in der Korrektur der DL über den Wassergehalt zu finden sein, der schwer für die gesamte Sedimentationsperiode abgeschätzt werden kann. Zudem ist das Wasser dominant im gefrorenen Zustand vorhanden und beeinflusst eventuell die Strahlenwirkung anders bzw. leitet Licht tiefer ins Sediment. Dadurch könnten die Altersberechnungen systematisch verfälscht werden. Daher ist in Permafrostsequenzen zu prüfen, wie sich Eis, v.a. segregiertes Eis, auf die DL auswirkt und welchen Einfluss z.B. die Druckverhältnisse von Frostwechselprozessen auf das OSL-Signal

haben. Im Vergleichsprofil auf Bunge-Land zeigten ungefrorene Proben (v.a. Bunge-3) geringere Streuungen als die gefrorenen Proben, obwohl diese Aussage für Bunge-5 äußerst vage bleibt wegen der wenigen ED.

Altersunterschätzungen von OSL-Untersuchungen wurden für künstliche Dosen  $> 10$  Gy mit etwa 1 sd von FUCHS & LANG (2001) festgestellt. BUYLAERT et al. (2007) berichten von zu jungen, mit dem SAR-Protokoll erhobenen OSL-Altern ab ca. 60 ka BP im chinesischen Löss, für den man ausreichende Bleichung des Materials annimmt. IR-OSL-Alter zeigten bessere Ergebnisse zwischen ca. 60 – 120 ka BP. MURRAY et al. (2007) beschrieben eine systematische Unterschätzung um etwa 10 % in Nordrussland an Material aus dem Eem. Als Gründe nennen sie mögliche Sensitivitätsänderungen, Radionuklidverhalten in offenen Systemen und Unsicherheiten in der Langzeit-Wassergehaltsabschätzung. Diese Ursachen können aber für die hier viel größeren Differenzen kaum allein verantwortlich sein. OWEN et al. (2007) haben verschiedene Datierungsmethoden in der Mojave Wüste in Kalifornien untersucht und ebenfalls überraschend junge OSL-Alter im Vergleich zu v.a. den  $^{14}\text{C}$ -Altern festgestellt. Sie vermuten einerseits thermales Ausheilen (thermal fading) als Ursache oder Kontamination durch jüngeres Material über Trockenrisse, die Frostrissen unter den periglazialen Bedingungen im Lena-Delta entsprechen könnten. Es muss noch diskutiert werden, warum sie einen verschwindend geringen Einfluss auf Bunge-Land haben, wo die Radiokarbonalter mit der verwendeten Methodik gut reproduziert werden konnten .

## 7 ZUSAMMENFASSUNG

Mittels OSL sollten im Lena-Delta fünf Profile bezüglich ihrer Sedimentationsalter untersucht werden um die chronologische Beziehung der zweiten und dritten Terrasse zueinander zu klären. Da zahlreiche Autoren auf das Problem der unzureichenden Bleichung in fluvialen Sedimenten hinweisen, wurden die in der Literatur vorgeschlagenen statistischen Verfahren an einem Vergleichsprofil auf Bunge-Land, Neusibirische Inseln, getestet. Anhand der Gesamtstreuung der Proben und der Dose-Recovery-Tests konnte die erwartete heterogene Bleichung bestätigt werden. Die parallelen  $^{14}\text{C}$ -Alter von 12 bzw. 7 ka wurden erfolgreich von den Methoden nach OLLEY et al. (1998), FUCHS & LANG (2001) und LEPPER & MCKEEVER (2002) reproduziert, die am unteren Ende des gemessenen Dosispektrums ansetzen, aber nur die letzten beiden können als objektiv und probenspezifisch gelten. Entscheidend für die Genauigkeit der Methoden wirkte sich das Erkennen unterer Ausreißer aus. Für die Methode nach OLLEY et al. (1998) zeigte sich vor allem die geringe Anzahl an für die Analyse geeigneten Messwerten problematisch ( $N < 2$  Messwerte). Die Ergebnisse spiegeln stets die niedrigsten ED wieder ohne Bezug zur restlichen Dosisverteilung und die Standardabweichung liegt höchstens zufällig im Bereich der natürlichen Variabilität. Generell gut anwendbar zeigte sich die Methode nach FUCHS & LANG (2001), die sich stark an der Variabilität der DR-Tests orientierte und diese als natürlich voraussetzt. Ein bedeutender Vorteil besteht in der Beschränkung der Berechnungen auf diesen als natürlichen betrachteten probenspezifischen Variationsbereich und die relativ objektive Abgrenzung von unteren Ausreißern. Probleme ergaben sich insbesondere bei schlechten Ergebnissen der DR-Tests, die aber z.T. auch als Zeichen für eine ungenügende Bestimmbarkeit der Probe gelten können. Liegen mehrere niedrige ED im Bereich möglicher Ausreißer, bleibt deren Abgrenzung trotzdem häufig diskussionswürdig. Das Verfahren der leading edge nach LEPPER & MCKEEVER (2002) zeigte häufig ähnliche Ergebnisse wie nach FUCHS & LANG (2001), kann diese sogar bei einer hohen Variabilität der DR-Tests oder besonders unsicheren Ausreißern qualitativ übertreffen. Allerdings liegen Schwierigkeiten im Aufbau der Häufigkeitsverteilung als Grundlage für die leading edge. Diese sind, abhängig vom Median der ED-Fehler, zu große oder kleine Klassenweiten und bei der allgemein geringen Anzahl von ED wenig differenzierte Häufigkeiten der einzelnen Klassen. Zusätzlich kann schon eine leichte Verschiebung des Startpunktes der untersten Klasse recht unterschiedlich aussagekräftige Histogramme produzieren. Allgemein erscheint diese Methode ungeeignet bei linksschiefen Verteilungen, da in diesem Fall keine echte leading edge vorliegt und sehr hohe sd resultieren.

Insgesamt stellt sich heraus, dass möglichst viele ED für eine robuste Statistik notwendig sind um nicht nur wenige zufällige Ausschnitte der Dosisverteilung im Sediment abzubilden. Die Auswahlkriterien für die Eignung von ED zur weiteren Analyse konnten bei schlechtem Verhalten der Probe gelockert werden, ohne dass sich das Dosispektrum wesentlich verschiebt. Beeinträchtigungen können die Gesamtstreuung der Probe und z.T. auch Worthäufungen betreffen. Es sollte daraus folgend eine größere Variation der ED als natürlich akzeptiert werden. Die auf Bunge-Land unabhängig mittels OSL und den oben genannten statistischen Verfahren untersuchten Proben ergaben für Bunge-3 (Bun-5)  $5.565 \pm$

718 a BP und für die küstennahen Proben Bunge-4 und 5 der niederen Terrasse  $390 \pm 59$  a BP und  $< 170$  a BP.

Im Lena-Delta wurde in allen Proben ebenfalls das Vorliegen heterogener Bleichung festgestellt und daher statistische Untersuchungen am unteren Ende des Dosispektrums durchgeführt.

Die OSL-Alter der Proben OLE3, 4, 5, 8 und 8b sowie Kha-OSL-1 und 2 der dritten Terrasse lagen zwischen 54 und 22 ka BP für die unter dem IC liegenden Sande, was dem Kargin-Interstadial entspricht. Dabei liegen keine OSL-Alter für die engeren Grenzbereiche der Sande zur Profilbasis und zum IC vor. Nur OLE3 sticht aus der sonst chronologischen Altersfolge heraus, was eventuell verursacht wird durch die extreme in situ Wasser- (bzw. Eis-) Übersättigung. Die IR-OSL-Alter der Profilbasis könnten die OSL-Alter ergänzen. Es ließe sich dann ein früherer Beginn der Sedimentation in Kurungnakh ableiten, sowie nach den OSL-Altern ab etwa 30 ka BP erhöhte Ablagerungsraten gegenüber Nagym. Um diese Vermutungen zu bestätigen sind weitere OSL-Untersuchungen dieser Randbereiche der Sande erforderlich.

Die Profile Tur-1 und Tur-2 der zweiten Terrasse zeigten im unteren Profilbereich der Größenordnung nach mit der dritten Terrasse vergleichbare OSL-Alter von 37 bis  $< 17$  ka BP. Diese Parallelität lässt sich ebenso in den  $^{14}\text{C}$ -Altern nachvollziehen. Der hangende Bereich erscheint jünger bei 13 bis 6 ka BP und wäre danach ins Sartan bis Holozän zu stellen.

Der Vergleich zu den Radiokarbonaltern ergab in allen Profilen eine systematische Altersdifferenz, wonach die OSL-Alter stets etwa 50 % der  $^{14}\text{C}$ -Alter entsprachen. Obwohl sich die  $^{14}\text{C}$ -Alter v.a. in den Sanden der dritten Terrasse an der methodischen Bestimmungsgrenze bewegen, bestätigen sich die Größenordnungen in zahlreichen Profilen unterschiedlichster Schichten gegenseitig und bauen Chronologien über jüngere Schichten bis hin zur Oberfläche auf. Aber auch die OSL-Alter sind in sich konsistent und können eine relative Chronologie aufbauen. Altersberechnungen aus dem arithmetischen Mittel sind zwar deutlich besser vergleichbar mit den Radiokarbonaltern, sind aber ungeeignet um auf die beobachtete heterogene Bleichung zu reagieren. Daher sollte die statistische Auswertung der OSL-Ergebnisse beibehalten werden. Andere Ursachen für die Altersdifferenzen könnten in den Permafrostablagerungen an sich begründet sein, wie dem hohen Eisgehalt, segregiertem Eis, eventuell auch den Druckverhältnissen oder Kontamination mit jüngerem Material über Frostrisse. Radioaktive Ungleichgewichte tragen, wenn überhaupt nur gering zu den Altersunsicherheiten bei. Um diese auch in den Untersuchungen anderer Autoren festgestellten Altersunterschiede zwischen OSL und  $^{14}\text{C}$  zu klären, wären weitere Analysen mit unabhängiger Kontrolle über weitere Datierungsmethoden notwendig. Leider sind Profile mit geeignetem Material für möglichst viele Methoden zur Altersbestimmung selten.

## 8 LITERATUR- UND QUELLENVERZEICHNIS

**AITKEN, M.J. (1998):** An introduction to optical dating. Oxford University Press, Oxford, 276 S.

**ANTONOW, M. (1999):** Modern Sedimentation in the Lena Delta. In: Rachold, V., Grigoriev, M.N. (Eds.), Russian-German Cooperation System Laptev Sea 2000: the Lena Delta 1998 Expedition, Reports on Polar Research 315, S. 83-88

**ARE, F., REIMNITZ, E. (2000):** An Overview of the Lena River Delta Setting: Geology, Tectonics, Geomorphology, and Hydrology. Journal of Coastal Research 16 (4), 1083-1093.

**ARNOLD, L.J., BAILEY, R.M., TUCKER, G.E. (2007):** Statistical treatment of fluvial dose distributions from southern Colorado arroyo deposits. Quaternary Geochronology 2 (2007), S. 162-167.

**BAHRENBERG, G. (1990):** Statistische Methoden in der Geographie. 3. überarb. Aufl., Stuttgart, 233 S.

**BANERJEE, D., BØTTER-JENSEN, L., MURRAY, A.S. (2000):** Retrospective dosimetry: estimation of the dose to quartz using single-aliquot regenerative-dose protocol. Applied Radiation and Isotopes 52 (2000), S. 831-844.

**BLÜMEL, W.D. (1999):** Pysische Geographie der Polargebiete. Teubner Studienbücher, Geographie. Stuttgart-Leipzig, 239 S.

**BØTTER-JENSEN, L. MEJDAHL, V., MURRAY, A.S. (1999):** New light on OSL. Quaternary Geochronology 18 (1999), 303-309.

**BUYLAERT, J.P., VANDENBERGHE, D., MURRAY, A.S., HUOT, S., DE CORTE, F., VAN DEN HAUTE, P. (2007):** Luminescence dating of old (>70 ka) Chinese loess: A comparison of single-aliquot OSL and IRSL techniques. Quaternary Geochronology 2 (2007), 9-14.

**CRAMER, E., NEŠLEHOVÁ, J. (2005):** Vorkurs Mathematik – Arbeitsbuch zum Studienbeginn in den Wirtschafts- und Sozialwissenschaften. Heidelberg, 423 S.

**DULLER, G.A.T. (1994):** Luminescence dating of poorly bleached sediments from Scotland. Quaternary Geochronology 13 (1994), S. 521-524.

**FRENCH, H.M. (2007):** The periglacial environment. 3<sup>rd</sup> edition, Longman, Harlow 478 S.

**FUCHS, M. (2001):** Die OSL-Datierung von Archäosedimenten zur Rekonstruktion anthropogen bedingter Sedimentumlagerung. Geoarchäologische Untersuchungen im Becken von Phlious, NE-Peloponnes, Griechenland. Stuttgart.

**FUCHS, M., LANG, A. (2001):** OSL dating of coarse-grain fluvial quartz using single-aliquot protocols on sediments from NE Peloponnes, Greece. *Quaternary Science Reviews* 20 (2001), S. 783-787.

**FUCHS, M., WAGNER, G.A. (2003):** Recognition of insufficient bleaching by small aliquots of quartz for reconstructing soil erosion in Greece. *Quaternary Science Reviews* 22 (2003), S. 1161-1167.

**FUCHS, M., STRAUB, J., ZÖLLER, L. (2005):** Residual luminescence signals of recent river flood sediments: A comparison between quartz and feldspar of fine- and coarse-grain sediments. *Ancient TL* 23 No. 1 (2005), S. 25-30.

**GALABALA, R.O. (1987):** New data on the Lena-Delta structure. *Quaternary of North-East USSR. Magadan*. S. 152–172. (in Russisch).

**GALABALA, R.O. (1997):** Pereletki and the initiation of glaciation in Siberia. *Quaternary International* 41/42, 152-171.

**GALBRAITH, R.F., ROBERTS, R.G., LASLETT, G.M., YOSHIDA, H., OLLEY, J.M. (1999):** Optical dating of single and multiple grains of quartz from Jinmium Rock Shelter, Northern Australia: Part I, experimental design and statistical models. *Archaeometry* 41, 2 (1999), S. 339-364.

**GALBRAITH, R.F., ROBERTS, R.G. (2008):** Statistical aspects of equivalent dose and error calculation in luminescence dating. In: Krbetschek, M. (Ed.): *Luminescence dating*. Springer (in preparation)

**GEYH, M.A., SCHLEICHER, H. (1990):** Absolute age determination. *Physical and chemical dating methods and their application*. Berlin Heidelberg New York, 503 S.

**GEYH, M.A. (2005):** *Handbuch der physikalischen und chemischen Altersbestimmung*. Darmstadt, 211 S.

**GRIGORIEV, M., KUNITSKY, V., SCHIRRMEISTER, L. (2007):** Geological and geographical characteristics. In: Schirrmeister, L. (Ed.): *Expeditions in Siberia in 2005, Reports on Polar and Marine Research* 550 (2007), S. 85-86.

**GROSSE, G. (2001):** Geochronologie mit Infrarot Optisch Stimulierter Lumineszenz an spätquartären Sedimenten der Laptevsee-Küste, nordsibirische Arktis – Bol'shoy Lyakhovsky, Neusibirische Inseln und Mamontovy Khayata, Bykovsky-Halbinsel. Diplomarbeit.

**HILGERS, A., MURRAY, A.S., SCHLAAK, N., RADTKE, U. (2001):** Comparison of quartz OSL protocols using Lateglacial and Holocene dune sands from Brandenburg, Germany. *Quaternary Science Reviews* 20, 731-736.

**HILGERS, A. (2007):** The chronology of Late Glacial and Holocene dune development in the northern Central European lowland reconstructed by optically stimulated luminescence (OSL) dating. Dissertation, Köln, 353 S.

**HUBBERTEN, H.W., ANDREEV, A., ASTAKHOV, V.I., IGOR DEMIDOV, I., DOWDESWELL, J.A., HENRIKSEN, M., HJORT, C., HOUMARK-NIELSEN, M., JAKOBSSON, M., KUZMINA, S., LARSEN, E., PEKKA LUNKKA, J., LYSÄ, A., MANGERUD, J., MÖLLER, P., SAARNISTO, M., SCHIRRMESTER, L., SHER, A.V., SIEGERT, C., SIEGERT, M.J., SVENDSEN, J.I. (2004):** The periglacial climate and environment in northern Eurasia during the Last Glaciation. *Quaternary Science Reviews* 23, 1333-1357.

**KRBETSCHKE, M.R., RIESER, U., ZÖLLER, L., HEINICKE, J. (1994):** Radioactive disequilibria in palaeodosimetric dating of sediments. *Radiation Measurements*, Vol. 23, Nos. 2/3, 485-489.

**KRBETSCHKE, M. (1995):** Lumineszenz-Datierung quartärer Sedimente Mittel-, Ost- und Nordostdeutschlands. Dissertation, Freiberg, 122 S.

**KRBETSCHKE, M.R., GÖTZE, J., DIETRICH, A., TRAUTMANN, T. (1997):** Spectral information from minerals relevant for luminescence dating. *Radiation Measurements* 27, No. 5/6, 695-748.

**KRBETSCHKE, M.R., GONSER, G., SCHWAMBORN, G. (2002):** Luminescence dating results of sediment Sequences of the Lena Delta. *Polarforschung* 70, 83-88.

**KUZMINA, S., WETTERICH, S., MEYER, H. (2003):** Paleoecological and sedimentological studies of Permafrost deposits in the Central Lena Delta (Kurungnakh and Samoylov Islands). In: Grigoriev, M.N., Rachold, V., Bolshiyarov, D.Y., Pfeiffer, E.-M., Schirrmeister, L., Wagner, D., Hubberten, H.-W. (Eds.): *Russian-German Cooperation SYSTEM LAPTEV SEA. The Expedition LENA 2002. Reports on Polar and Marine Research*, 466, 71-81.

**LANTUIT, H., GRIGORIEV, M.N., GROSSE, G., ULRICH, M. (2007):** Studies of oriented lakes and thermokarst depressions. In: Schirrmeister, L. (Ed.): *Expeditions in Siberia in 2005, Reports on Polar and Marine Research* 550 (2007), S. 87-99.

- LEPPER, K., MCKEEVER, S.W.S. (2002):** An objective methodology for dose distribution analysis. *Radiation Protection Dosimetry* 101 (1-4), S. 349-352.
- MEYER, H. (2003):** Late Quaternary climate history of the Northern Siberia – evidence from ground ice. *Reports on Polar and Marine Research* 461, 111 S.
- MÜLLER, K. (1997):** Oberflächenstrukturen und Eigenschaften von Permafrostböden im nordsibirischen Lena-Delta. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde* 160, 497-503.
- MÜLLER-LUPP, T. (2002):** Short- and Long-Term Environmental Changes in the Laptev Sea (Siberian Arctic) During the Holocene. In: *Reports on Polar and Marine Research*, no. 424.
- MURRAY, A.S., OLLEY, J.M., CAITCHEON, G.G. (1995):** Measurement of equivalent doses in quartz from contemporary water-lain sediments using optically stimulated luminescence. *Quaternary Science Reviews* 14, S. 365-371.
- MURRAY, A.S., WINTLE, A.G. (2000):** Luminescence dating of quartz using an improved single-aliquot regenerative-dose protocol. *Radiation Measurements* 32 (2000), S. 57-73.
- MURRAY, A.S., OLLEY, J.M. (2002):** Precision and accuracy in the optically stimulated luminescence dating of sedimentary quartz: A status review. *Geochronometria* 21,
- MURRAY, A.S., WINTLE, A.G. (2002):** Retrospective dose assessment: The measurement of the dose in quartz in dating and accident dosimetry. *Radiation Protection Dosimetry* Vol. 101 (1-4), S. 301-308.
- MURRAY, A.S., WINTLE, A.G. (2003):** The single aliquot regeneration dose protocol: potential for improvements in reliability. *Radiation Measurements* 32, 377-381.
- MURRAY, A.S., SVENDSEN, J.I., MANGERUD, J., ASTAKHOV, V.I. (2007):** Testing the accuracy of quartz OSL dating using a known-age Eemian site on the river Sula, northern Russia. *Quaternary Geochronology* 2 (2007), 102-109.
- OLLEY, J., CAITCHEON, G., MURRAY, A. (1998):** The distribution of apparent dose as determined by optically stimulated luminescence in small aliquots of fluvial quartz: Implications for dating young sediments. *Quaternary Geochronology* 17 (1998), S. 1033-1040.
- OLLEY, J.M., CAITCHEON, G.G., ROBERTS, R.G. (1999):** The origin of dose distribution in fluvial sediments, and the prospect of dating single grains from fluvial deposits using optically stimulated luminescence. *Radiation Measurements* 30 (1999), 207-217.

- OWEN, L.A., BRIGHT, J., FINKEL, R.C., JAISWAL, M.K., KAUFMAN, D.S., MAHAN, S., RADTKE, U., SCHNEIDER, J.S., SHARP, W., SINGHVI, A.K., WARREN, C.N. (2007):** Numerical dating of a Late Quaternary spit-shoreline complex at the northern end of Silver Lake playa, Mojave Desert, California: A comparison of the applicability of radiocarbon, luminescence, terrestrial cosmogenic nuclide, electron spin resonance, U-series and amino acid racemization methods. *Quaternary International* 166 (2007), 87-110.
- PACKMAN, S.C., MAUZ, B., ROUSSEAU, D.-D., ANTOINE, P., ROSSIGNOL, J., LANG, A. (2007):** Implications of broad dose distributions obtained with single-aliquot regenerative-dose method on quartz fine-grains from loess. *Quaternary Geochronology* 2 (2007), S. 39-44.
- PAVLOVA, E.Y., DOROZHKINA, M.V. (2001):** History of the relief formation of the western Lena-Delta Sector in the late Pleistocene-Holocene. In: Rachold, V. (Ed.): Russian-German Cooperation SYSTEM LAPTEV SEA 2000: The Expedition LENA 1999, Reports on Polar Research 354, S. 65-78.
- PFEIFFER, E.-M., WAGNER, D., KOBABE, S., KUTZBACH, L., KURCHATOVA, A., STOOF, G., WILLE, C. (2002):** Modern processes in permafrost affected soils. In: Pfeiffer, E.-M., Grigoriev, M.N. (Eds.): Russian-German Cooperation SYSTEM LAPTEV-SEA 2000: The Expedition LENA 2001, Reports on Polar and Marine Research, 426, 21-41.
- PRESCOTT, J.R., HUTTON, J.T. (1988):** Cosmic ray and gamma ray dosimetry for TL and ESR. *Nuclear Tracks and Radiation Measurement* 14, 223-227.
- PRESCOTT, J.R., ROBERTSON, G.B. (1997):** Sediment dating by luminescence: A review. *Radiation Measurements* Vol. 27, No. 5/6, 893-922.
- RACHOLD, V., GRIGORIEV, M.N., ANTONOW, M. (1999a):** Introduction. Figure 1-1, Map showing the location of the Lena Delta. In: Rachold, V., Grigoriev, M.N. (Eds.), Russian-German Cooperation System Laptev Sea 2000: the Lena Delta 1998 Expedition, Reports on Polar Research 315 (1999), S. 7
- RACHOLD, V., GRIGORIEV, M.N., ANTONOW, M. (1999b):** Modern Sedimentation and Environmental History of the Lena Delta. In: Rachold, V., Grigoriev, M.N. (Eds.), Russian-German Cooperation System Laptev Sea 2000: the Lena Delta 1998 Expedition, Reports on Polar Research 315 (1999), S. 81-82
- RISØ DTU (2008):** Guide to the Risø TL/OSL Reader. Denmark.
- ROMANOVSKII, N.N., HUBBERTEN, H.-W., GAVRILOV, A.V., TUMSKOY, V.E., KHOLODOV, A.L. (2004):** Permafrost of the east Siberian Arctic shelf and coastal lowlands. *Quaternary Science Reviews* 23, 1359-1369.

**SCHIRRMEISTER, L., SIEGERT, C., KUNITSKY, V., SHER, A. (1999):** Paleoclimate Signals of Ice-rich Permafrost. In: Rachold, V., Grigoriev, M.N. (Eds.): Russian-German Cooperation System Laptev Sea 2000: the Lena Delta 1998 Expedition, Reports on Polar Research 315 (1999), S. 145 – 152.

**SCHIRRMEISTER, L., KUNITSKY, V., GROSSE, G., KUZNETSOVA, T. (2001):** Late Quaternary and recent environmental situation around the Olenyok Channel (western Lena Delta) and on Bykovsky Peninsula. In: Rachold, V., Grigoriev, M.N. (Eds.): Russian-German Cooperation System Laptev Sea 2000: The Expedition Lena 2000, Reports on Polar Research 388 (2001), S. 85 – 135.

**SCHIRRMEISTER, L., GROSSE, G., SCHWAMBORN, G., ANDREEV, A.A., MEYER, H., KUNITSKY, V.V., KUZNETSOVA, T.V., DOROZHKINA, M.V., PAVLOVA, E.Y., BOBROV, A.A., OEZEN, D. (2003a):** Late Quaternary history of the accumulation plain north of the Chekanovsky Ridge (Lena Delta, Russia): A multidisciplinary approach. *Polar Geography* 27 (2003), No. 4, 277 – 319.

**SCHIRRMEISTER, L., GROSSE, G., KUNITSKY, V., MEYER, H., DERIVYAGIN, A., KUZNETSOVA, T. (2003b):** Permafrost, periglacial and paleo-environmental studies on New Siberian Islands. In: Grigoriev, M.N., Rachold, V., Bolshiyarov, D.Y., Pfeiffer, E-M., Schirrmeister, L., Wagner, D., Hubberten, H.-W. (Eds.): Russian-German Cooperation SYSTEM LAPTEV SEA 2002: The Expedition LENA 2002. Reports on Polar and Marine Research 466, 195-339, Bremerhaven.

**SCHIRRMEISTER, L., GROSSE, G., GRIGORIEV, M., SCHNEIDER, W., KUNITSKY, V., KUZNETSOVA, T. (2007):** Studies of permafrost sequences for paleo-environmental reconstruction. In: Schirrmeister, L. (Ed.): Expeditions in Siberia in 2005, Reports on Polar and Marine Research 550 (2007), S. 105 - 124.

**SCHÖN, J. (1983):** Petrophysik. Physikalische Eigenschaften von Gesteinen und Mineralen. Berlin, 402 S.

**SCHWAMBORN, G., SCHNEIDER, W., GRIGORYEV, M., RACHOLD, V., ANTONOW, M. (1999):** Sedimentation and environmental history of the Lena Delta. In: Rachold, V., Grigoriev, M.N. (Eds.), Russian-German Cooperation System Laptev Sea 2000: the Lena Delta 1998 Expedition, Reports on Polar Research 315 (1999), S. 94-111

**SCHWAMBORN, G., RACHOLD, V., GRIGORIEV, M.N. (2002a):** Late Quaternary sedimentation history of the Lena Delta. *Quaternary International* 89 (2002), 119 – 134.

- SCHWAMBORN, G., ANDREEV, A.A., RACHOLD, V., HUBBERTEN, H.-W., GRIGORIEV, M.N., TUMSKOY, V., PAVLOVA, E.Y., DOROZHINA, M.V. (2002b):** Evolution of Lake Nikolay, Arga Island, western Lena River Delta, during Late Pleistocene and Holocene time. *Polarforschung* 70, 69-82.
- SCHWAMBORN, G.J. (2004):** Late Quaternary Sedimentation History of the Lena Delta. In: *Reports on Polar and Marine Research* 471.
- SHER, A.V., KUZMINA, S.A., KUZNETSOVA, T.V., SULERZHITSKY, L.D. (2005):** New insights into the Weichselian environment and climate of the East Siberian Arctic, derived from fossil insects, plants and mammals. *Quaternary Science Reviews* 24, 533-569.
- SMITH, B.W., RHODES, E.J. (1993):** Charge Movements in quartz and their relevance to optical dating. *Radiation Measurements* 23, Nos 2/3, 329-333.
- WALKER, H.J. (1998):** Arctic deltas. *Journal of Coastal Research* 14 (3), 718-738.
- WALLINGA, J. (2002):** On the detection of OSL age overestimation using single-aliquot techniques. *Geochronometria* 21, 17-26.
- WEIN, N. (1999):** Sibirien. Gotha-Stuttgart, 248 S.
- WEISE, O.R. (1983):** Das Periglazial – Geomorphologie und Klima in gletscherfreien, kalten Regionen. Berlin-Stuttgart, 199 S.
- WETTERICH, S., KUZMINA, S., ANDREEV, A.A., KIENAST, F., MEYER, H., SCHIRRMEISTER, L., KUZNETSOVA, T., SIERRALTA, M. (2008):** Palaeoenvironmental dynamics inferred from late Quaternary permafrost deposits on Kurungnakh Island, Lena Delta, Northeast Siberia, Russia. *Quaternary Science Reviews* 27, 1523-1540.
- WODA, C., FUCHS, M. (2008):** On the applicability of the leading edge method to obtain equivalent doses in OSL dating and dosimetry. *Radiation Measurement* 43 (1), S. 26-37.
- WÜTHRICH, C., THANNHEISER, D. (2002):** Die Polargebiete. Das Geographische Seminar, Braunschweig, 299 S.

## **PERSÖNLICHE MITTEILUNGEN**

**SCHIRRMEISTER, L. (2008):** schriftliche Mitteilung, <sup>14</sup>C-Alter von Khardang-Sektion und Turakh-Sektion, 26.04.2008

**HILGERS, A. (2008):** persönl. Gespräch, Köln, 06.05.2008

**FUCHS, M. (2008):** schriftliche Mitteilung, 11.01.2008

**KRBETSCHKE, M. (2007):** persönliches Gespräch, 06.08.2007

**STEIN, I. (2007):** persönliche Einführung in die Laborroutine des SAW-Lumineszenzlabors in Freiberg, 06.04.2007

## **INTERNETDATEN UND KARTENMATERIAL**

**AWI (2008a):**[http://www.awi.de/en/research/research\\_divisions/geosciences/marine\\_geology\\_and\\_paleontology/research\\_themes/bathymetry\\_and\\_geodesy/amore\\_gakkel\\_ridge](http://www.awi.de/en/research/research_divisions/geosciences/marine_geology_and_paleontology/research_themes/bathymetry_and_geodesy/amore_gakkel_ridge); (13.07.2008)

**AWI (2008b):** [http://www.awi.de/en/news/press\\_releases/detail/item/zum\\_nordpol\\_auf\\_einer\\_eisscholle](http://www.awi.de/en/news/press_releases/detail/item/zum_nordpol_auf_einer_eisscholle); Foto: Eiskeilstrukturen (15.05.2008)

**DULLER, G.A. (2001):** ANALYST Version 3.04b – Auswertesoftware für Daten nach dem SAR-Protokoll.

**GEOLOGY.COM (2008):** <http://geology.com/world/arctic-ocean-bathymetry-map.shtml>; (24.07.2008)

**GOOGLE-MAPS:** Kartengrundlage (21.08.2008)

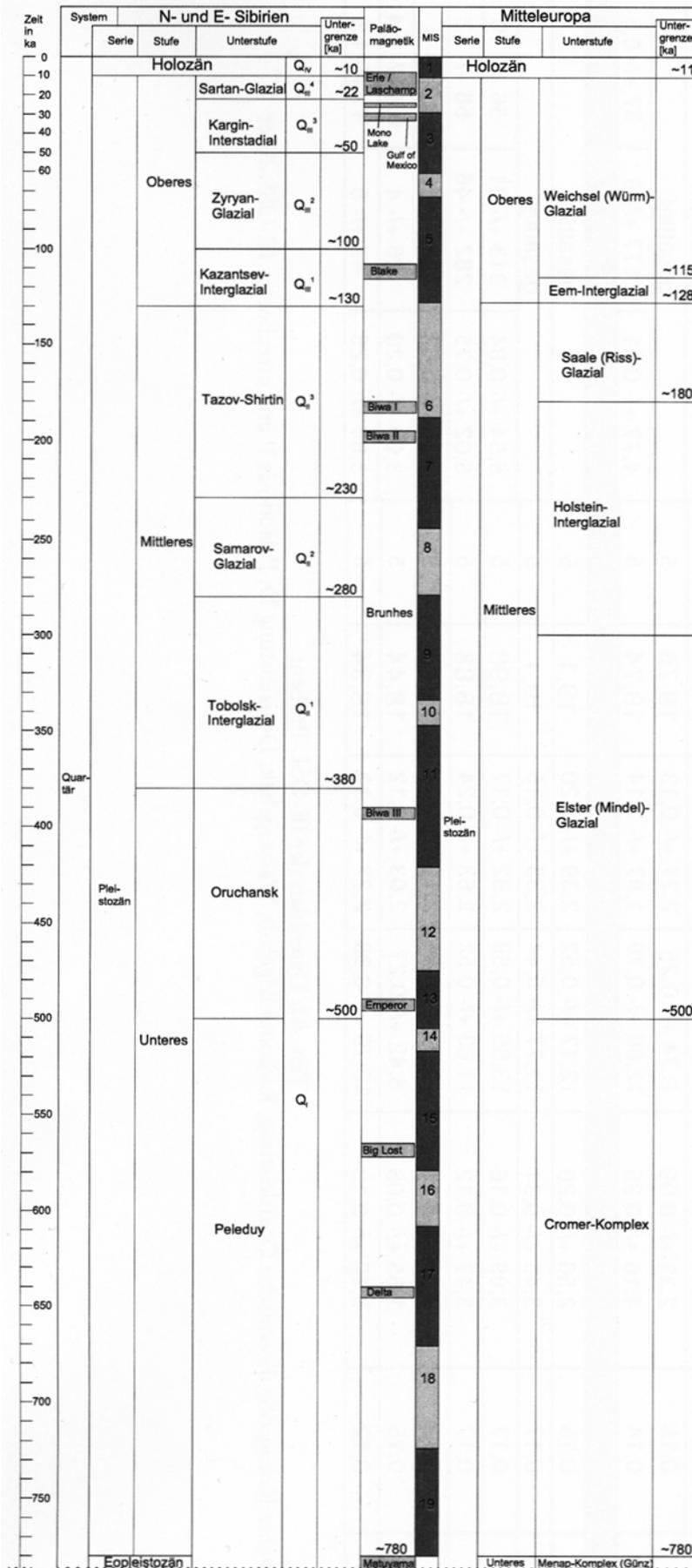
**GROSSE, G. (2005):** Lena Delta DEM. AWI Potsdam

**KULIG, G. (2005):** ADELE - Auswertesoftware zur Altersbestimmung mittels Lumineszenzverfahren unter spezieller Berücksichtigung des Einflusses radioaktiver Ungleichgewichte in der <sup>238</sup>U-Zerfallsreihe, aus: Bakkalaureus-Arbeit, Freiberg.

## 9 ANHANG

- A1: Vergleichende quartäre Stratigraphie für N- und E-Sibirien sowie Mitteleuropa
- A2: Zerfallsreihen der radioaktiven Nuklide  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$  und von  $^{40}\text{K}$
- A3: Überblick der Ergebnisse zur Berechnung der Dosisleistung
- A4: Überblick über die Messreihen und Ergebnisse (Teil 1)
- A5: Überblick über die Messreihen und Ergebnisse (Teil 2)





**A1: Vergleichende quartäre Stratigraphie für N- und E-Sibirien sowie Mitteleuropa** (nach: GROSSE 2001, basierend: ALEKSEEV (1989), SHACKLETON et al. (1990)\*, KAWAI et al. (1972)\*, MACHIDA et al. (1991)\*, LANGEREIS et al. (1997)\*, HAYS et al. (1976)\*, KOMINZ et al. (1979)\*, PISIAS & MOORE (1981)\*, SHACKLETON & OPDYKE (1973)\*, \* in Grosse ohne Quelle)

THORIUM-232									Ra-228 5,7a $\beta^-$	$\alpha$	Th-232 $1,4 \cdot 10^{10}$ a		
										$\beta^-$	Ac-228 6,13h		
		Pb-212 10,6h $\beta^-$	$\alpha$	Po-216 0,15s	$\alpha$	Rn-220 55,6s	$\alpha$	Ra-224 3,64d	$\alpha$		Th-228 1,9a		
	Tl-208 3,1min $\beta^-$	$\alpha$		Bi-212 60,6min $\beta^-$									
		Pb-208 stabil	$\alpha$		Po-212 0,3ps								

URAN-235											Th-231 25,6h $\beta^-$	$\alpha$	U-235 $7 \cdot 10^8$ a
				Bi-215 7,4min $\beta^-$	$\alpha$ 97%	At-219 0,9min 3% $\beta^-$	$\alpha$ $4 \cdot 10^{-6}$ %	Fr-223 22min 100% $\beta^-$	$\alpha$ 1,2%	Ac-227 22a 98,8% $\beta^-$	$\alpha$	Pa-231 $3,3 \cdot 10^4$ a	
		Pb-211 36,1min $\beta^-$	$\alpha$	Po-215 1,8ms $5 \cdot 10^{-6}$ % $\beta^-$	$\alpha$	Rn-219 3,9s	$\alpha$	Ra-223 11,4d	$\alpha$		Th-227 18,7d		
	Tl-207 4,8min $\beta^-$	$\alpha$ 99,68%		Bi-211 2,15min 0,32% $\beta^-$	$\alpha$	At-215 -100 $\mu$ s							
		Pb-207 stabil	$\alpha$		Po-211 0,52s								

URAN-238											Th-234 24,1d $\beta^-$	$\alpha$	U-238 $4,5 \cdot 10^9$ a
												$\beta^-$	Pa-234 1,2min/6,7h 99,85% $\beta^-$ 0,15% $\gamma^-$
		Pb-214 26,8min $\beta^-$	$\alpha$ 99,98%	Po-218 3,05min 0,02% $\beta^-$	$\alpha$	Rn-222 3,8d	$\alpha$	Ra-226 1600a	$\alpha$		Th-230 $8 \cdot 10^4$ a	$\alpha$	U-234 $2,5 \cdot 10^5$ a
	Tl-210 1,3min $\beta^-$	$\alpha$ 0,04%		Bi-214 19,8min 99,96% $\beta^-$	$\alpha$	At-218 -2s							
Hg-206 8,1min $\beta^-$	$\alpha$ $7,5 \cdot 10^{-7}$ %			Pb-210 22a -100% $\beta^-$	$\alpha$	Po-214 162 $\mu$ s							
	Tl-206 4,3min $\beta^-$	$\alpha$ $5 \cdot 10^{-6}$ %		Bi-210 5,0d -100% $\beta^-$									
		Pb-206 stabil	$\alpha$		Po-210 138,4d								

natürliche primordiale Radionuklide  
außerhalb der Zerfallsreihen:

$^{40}\text{K}$  ( $1,4 \cdot 10^9$  a)  $\xrightarrow{\beta^-}$   $^{40}\text{Ca}$  (89%)  
 $^{40}\text{K}$  ( $1,2 \cdot 10^9$  a)  $\xrightarrow{\text{EC}}$   $^{40}\text{Ar}$  (11%)  
 $^{87}\text{Rb}$  ( $4,8 \cdot 10^{10}$  a)  $\xrightarrow{\beta^-}$   $^{87}\text{Sr}$

A2: Zerfallsreihen der radioaktiven Nuklide  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$  und von  $^{40}\text{K}$  (nach: KELLER 1981, KUHN 1993; In: FUCHS 2001)

Ergebnisse	Dosisleistung											Wassergehalt		
	Radionuklide					(in Bq/kg)					kosmische Strahlung			
	U	±	Th	±	K	±	Bemerkung	Höhe uNN (in m)	Sedimentdecke (in m)	D-Rate (mGy/ka)	in situ	Sättigung		
Probe														
Kha-OSL-1	13.63	0.35	17.91	0.66	680.38	9.16	SiO <sub>2</sub> -Matrix	2.0	18.0	37	7.0	33.4		
Kha-OSL-2	12.70	0.41	16.74	0.68	691.60	9.62	SiO <sub>2</sub> -Matrix	4.0	16.0	43	5.3	26.6		
Tur-OSL-1	10.13	0.31	13.16	0.54	638.75	8.39		-2.18	3.7	126	20.9	21.9		
Tur-OSL-2	10.70	0.35	14.30	0.57	659.21	8.82	leichte U-Anreicherung	0.88	4.5	121	21.9	24.3		
Tur-OSL-3	8.01	0.42	10.89	0.59	638.95	9.64	SiO <sub>2</sub> -Matrix, wenig U	2.88	2.5	153	26.3	24.4		
Tur-OSL-4	7.31	0.3	9.53	0.45	646.90	8.73	SiO <sub>2</sub> -Matrix, wenig U	2.88	2.5	153	11.0	26.6		
Tur-OSL-5	7.90	0.32	9.84	0.48	583.73	8.3	SiO <sub>2</sub> -Matrix, wenig U	-3.48	5.0	115	18.1	26.0		
Tur-OSL-6	22.72	0.6	28.13	1.05	653.36	9.78		-4.98	6.5	98	39.5	74.4		
Tur-OSL-7	22.31	0.49	30.53	1	666.58	9.16	SiO <sub>2</sub> -Matrix	-8.23	9.8	71	30.7	32.8		
Ole 3	19.76	3.088	23.94	1.298	772.5	52.53		5.8	24.2	25	69.2	36.1		
Ole 4	19.76	0.86	23.94	2.718	772.5	58.71		7.8	22.2	28	9.2	23.1		
Ole 5	13.59	0.741	18.66	1.217	803.4	52.53		9.0	21.0	30	6.8	29.8		
Ole 8	11.3	0.7	14.2	0.9	628.7	37		5.7	29.3	19	4.2	33.1		
Ole 8b	18.53	0.865	24.75	1.095	648.9	46.35		7.2	27.8	20	6.0	30.0		
Bunge-1	11.67	0.36	15.16	0.64	623.8	7.55	leicht U-Anreicherung	9.0	3	144	22.2	26.0		
Bunge-2	12.74	0.38	18.65	0.72	635.29	8.75	leicht U-Anreicherung	11.3	0.7	192	9.7	29.8		
Bunge-3	12.44	0.36	16.33	0.63	633.18	8.57		11.4	0.6	194	11.4	32.7		
Bunge-4	8.94	0.23	12.84	0.46	625.71	7.79	Cs Kontamination?	0.9	0.6	193	23.6	29.8		
Bunge-5	8.21	0.28	11.46	0.48	623.8	7.55	Cs Kontamination?	1.1	0.4	198	20.5	25.4		

A3: Überblick der Ergebnisse zur Berechnung der Dosisleistung

1. Messung																						
INFO					in Sek.					ERGEBNISSE					in Gy				PROBLEME			
Probe	N	OSL	DR	TD	Sequenz 1					N	xq	min	max	DR	TDE	RR	NP	N.S.				
										ok	(in Gy)			v(%)				> R4				
Kha-OSL-1	20	4	500	30	N/ 200/ 400/ 650/ <b>1000</b> / 0/ 400/ 100					13	<b>97.51</b>	47.79	156.83	12.7								
Kha-OSL-2	20	4	500	30	N/ 200/ 400/ 650/ <b>1000</b> / 0/ 400/ 100					12	<b>84.45</b>	32.96	119.74	7.3								
Tur-OSL-1	20	4	200	30	N/ 80/ 160/ 300/ <b>500</b> / 0/ 80/ 100					13	<b>34.03</b>	15.56	52.10	7.8								
Tur-OSL-2	20	4	300	30	N/ 100/ 200/ 350/ <b>600</b> / 0/ 200/ 100					15	<b>29.60</b>	20.30	40.64	15.2	DR-			DR-				
Tur-OSL-3	20	4	300	30	N/ 100/ 200/ 350/ <b>600</b> / 0/ 200/ 100					12	<b>34.28</b>	22.74	47.01	4.7	DR-			DR-				
Tur-OSL-4	20	4	300	30	N/ 150/ 300/ 500/ <b>800</b> / 0/ 300/ 100					10	<b>26.99</b>	14.59	39.48	4.6		DR-		DR-				
Tur-OSL-5	20	4	300	30	N/ 100/ 200/ 350/ <b>600</b> / 0/ 200/ 100					11	<b>34.22</b>	22.29	49.27	9.2	-							
Tur-OSL-6	20	4	300	30	N/ 100/ 200/ 350/ <b>600</b> / 0/ 200/ 100					7	<b>101.37</b>	59.54	135.77	10.7	-			-				
Tur-OSL-7	20	4	800	30	N/ 200/ 400/ 750/ <b>1200</b> / 0/ 400/ 100					14	<b>129.06</b>	44.13	240.17	19.5	-			-				
Ole 3	20	4	1000	30	N/ 300/ 600/ 1000/ <b>1500</b> / 0/ 600/ 100					16	<b>107.09</b>	42.14	287.53	6.7								
Ole 4	20	4	1000	30	N/ 300/ 600/ 1000/ <b>1500</b> / 0/ 600/ 100					11	<b>106.28</b>	80.61	132.77	15.4	-							
Ole 5	20	4	1000	30	N/ 300/ 600/ 1000/ <b>1500</b> / 0/ 600/ 100					4	<b>108.14</b>	60.20	144.62	27	-		DR-	-				
Ole 8	20	4	300	30	N/ 150/ 300/ 500/ <b>800</b> / 0/ 300/ 100					7	<b>119.06</b>	57.37	187.29	12.2	-			-				
Ole 8b	20	4	800	30	N/ 250/ 500/ 900/ <b>1400</b> / 0/ 500/ 100					4	<b>151.35</b>	82.50	259.59	/	-	-	-	-				

#### A4: Überblick über die Messreihen und Ergebnisse (Teil 1)

2. Messung																		
INFO					in Gy					ERGEBNISSE				PROBLEME				
Probe	N	OSL	DR	TD	Sequenz 2					N	xq	min	max	DR	TDE	RR	NP	N.S.
										ok	(in Gy)			v(%)				> R4
Kha-OSL-1	20	4	700	30	250-500-900- <b>1400</b> -0-500-100					18	<b>57.50</b>	17.83	97.45	7.8				
Kha-OSL-2	20	4	800	30	250-500-900- <b>1400</b> -0-500-100					12	<b>58.81</b>	38.97	102.87	5.5	?			
Tur-OSL-1	20	4	300	30	100-200-350- <b>600</b> -0-200-100					15	<b>27.85</b>	11.43	48.88	3.6	-			
Tur-OSL-2	20	4	300	30	150-250-400- <b>700</b> -0-250-100					14	<b>24.82</b>	11.88	35.48	5.1	-			
Tur-OSL-3																		
Tur-OSL-4	20	4	300	30	100-200-350- <b>600</b> -0-200-100					15	<b>19.06</b>	7.29	36.09	3.2	-			
Tur-OSL-5																		
Tur-OSL-6	20	4	700	30	250-500-800- <b>1200</b> -0-500-100					20	<b>76.36</b>	17.91	167.78	4.2				
Tur-OSL-7	20	4	900	30	400-600-1000- <b>1600</b> -0-600-100					13	<b>94.68</b>	35.82	161.25	12.6	DR-			
Ole 3	20	4	1100	30	400-700-1100- <b>1700</b> -0-700-100					18	<b>62.24</b>	25.49	129.30	6.5				
Ole 4	20	4	1200	30	500-800-1200- <b>1800</b> -0-800-100					14	<b>108.85</b>	61.99	162.57	6.7				
Ole 5	20	4	1200	30	500-800-1200- <b>1800</b> -0-800-100					9	<b>107.98</b>	65.01	155.97	8.2	-			-
Ole 8	20	4	800	30	250-500- 900- <b>1400</b> -0-500-100					11	<b>132.95</b>	105.67	206.76	8.8	-			-
Ole 8b	20	4	1200	30	500-800-1200- <b>1800</b> -0-800-100					11	<b>92.30</b>	53.84	152.29	7.3	-		-	-

#### A5: Überblick über die Messreihen und Ergebnisse (Teil 2)