

# ELASMOTHERIUM SIBIRICUM: DE UITGESTORVEN SIBERISCHE EENHOORN – UITKOMSTEN VAN OPZIENBAREND ONDERZOEK

**MARGOT KUITEMS**, CENTRUM VOOR ISOTOPEN ONDERZOEK, RIJKSUNIVERSITEIT GRONINGEN

**HANS VAN DER PLICHT**, CENTRUM VOOR ISOTOPEN ONDERZOEK, RIJKSUNIVERSITEIT GRONINGEN

**THIJS VAN KOLFSCHOTEN**, FACULTEIT ARCHEOLOGIE, UNIVERSITEIT LEIDEN; INSTITUTE OF CULTURAL HERITAGE, SHANDONG UNIVERSITY, CHINA

---

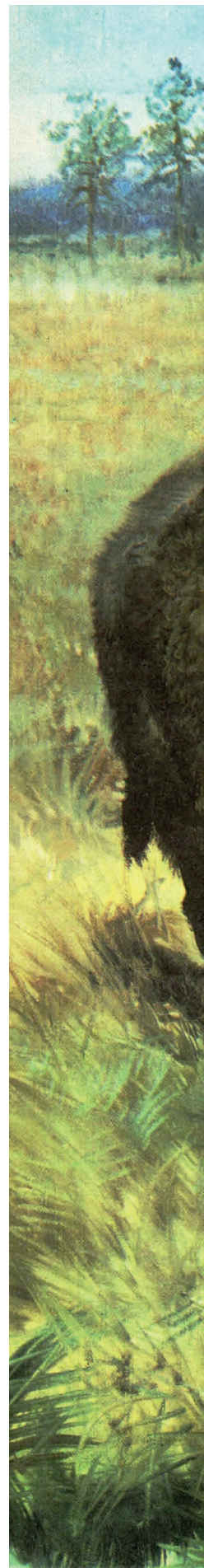
## Samenvatting

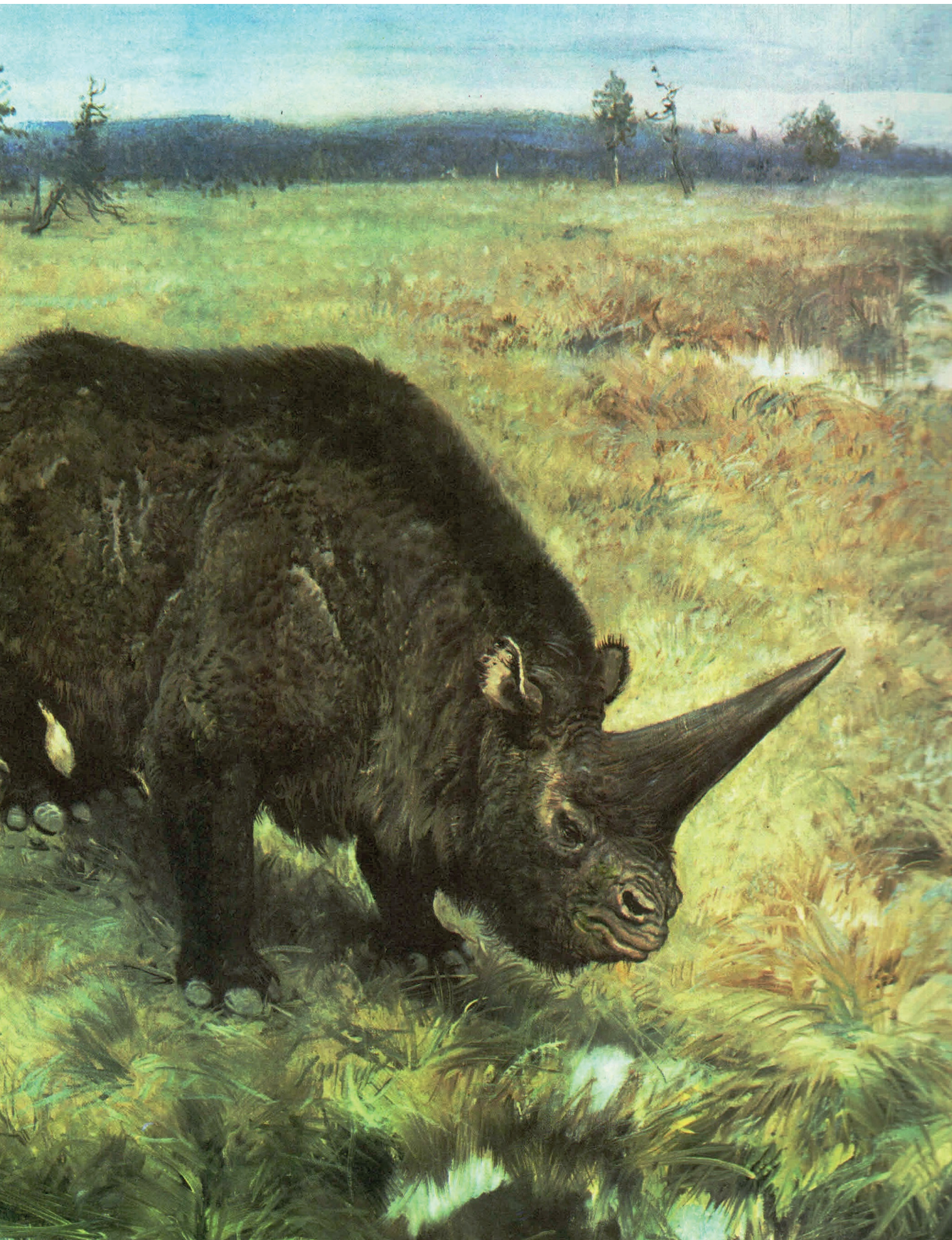
In het kader van Nederlandse/Russische onderzoeksprogramma's betreffende de mammoetsteppe zijn de afgelopen jaren tientallen fossiele botten geanalyseerd van een bijzonder dier: *Elasmotherium sibiricum*. Dit is een reusachtige neushoorn, behorend tot de uitgestorven megafauna. Vanwege een manskrote hoorn staat het dier ook wel bekend als de "eenhoorn". Tot voor kort werd verondersteld dat het dier, dat met name in Oost-Europa en Centraal-Azië leefde, ongeveer 200.000 jaar geleden was uitgestorven. Nieuwe  $^{14}\text{C}$  dateringen leverden nogal opzienbarende resultaten op en laten zien dat dit moet worden bijgesteld naar ongeveer 39.000 jaar geleden. Daarnaast leveren analyses van stabiele isotopen ( $^{13}\text{C}$  en  $^{15}\text{N}$ ) en DNA waardevolle informatie over de evolutie en het dieet van dit bijzondere dier. In deze bijdrage presenteren we een uitgebreide samenvatting van onze bevindingen, alsmede een overzicht van een aantal kenmerkende paleontologische gegevens. Opvallend zijn bijvoorbeeld de kiezen, die zeer hoogkronig en wortelloos zijn. Dit zou ook de merkwaardige  $^{13}\text{C}$  waarden kunnen verklaren, die duiden op een dieet van ondergrondse bestanddelen van planten, zoals knollen. Voor meer technische details, meetgegevens en uitgebreide vakliteratuur verwijzen we naar de oorspronkelijke publicatie met de daarbij behorende "online supplementary information" (Kosintsev et al., 2019).

## Summary

During the past decade, we analysed fossil bones of the extinct *Elasmotherium sibiricum*, a giant rhinoceros, also known as the "unicorn". It lived in Eastern Europe and Central Asia and it was believed to have gone extinct about 200,000 years ago. However, new  $^{14}\text{C}$  dating results showed that the previous idea must be revised to around 39,000 years ago. In addition, analysis of the stable isotopes  $^{13}\text{C}$  and  $^{15}\text{N}$  indicate the animal likely consumed mainly plants from below the surface, which explains the extreme hypsodonty of the (pre)molars. This contribution presents a summary of our article by Kosintsev et al. (2019) with the emphasis on the dating and the stable isotope study.

---





Figur 1. Elasmotherium in Z. Burian's reconstructie (Zhegallo et al., 2005).  
Elasmotherium in Z. Burian's reconstruction (Zhegallo et al., 2005).

## INLEIDING

Nee, de Siberische eenhoorn is geen paard met een geraaide hoorn op zijn voorhoofd, een populair fabeldier dat je bijvoorbeeld in de Efteling kunt zien. De Siberische eenhoorn is een uitgestorven soort neushoorn (Fig. 1) die tijdens het Pleistoceen in een groot deel van Eurazië heeft geleefd. Het is een onevenhoevige (orde Perissodactyla) behorend tot de familie van de neushoornachtigen, de Rhinocerotidae, een groep met ca. 250 beschreven, veelal uitgestorven, soorten die in het verleden zeer succesvol was en tijdens het Mioceen (ca. 23-5 miljoen jaar geleden) de grote zoogdierfauna van Afrika, Eurazië en Noord-Amerika domineerde (Kosintsev *et al.*, 2019). De Rhinocerotidae worden onderverdeeld in twee subfamilies: a) de Rhinocerotinae waartoe de vijf recent levende soorten en ook de pleistocene soorten neushoorns die in West-Europa voorkwamen, zoals bijvoorbeeld de steppe-neushoorn *Stephanorhinus hemitoechus* en de wolharige neushoorn *Coelodonta antiquitatis*, behoren en b) de uitgestorven Elasmotheriinae. Op basis van het fossiele record werd aangenomen dat de splitsing tussen de twee subfamilies al heel vroeg, tijdens het Eoceen (ca. 56 – 34 miljoen jaar geleden) plaatsgevonden heeft. De analyse van het fossiele DNA in de recentelijk onderzochte botten heeft met een berekende genetische divergentie van ca. 47,4 miljoen jaar geleden (Kosintsev *et al.*, 2019) de eerdere veronderstelling bevestigd. De Siberische eenhoorn was de jongste vertegenwoordiger van de miljoenen jaren oude tak van neushoorns en met het uitsterven van *Elasmotherium sibiricum* verdween de laatste vertegenwoordiger van de eens zo succesvolle subfamilie.

## ELASMOTHERIUM SIBIRICUM FISCHER, 1809

*Elasmotherium sibiricum* was met een lengte van ca. 4,5 meter, een schofthoogte van ruim 2 meter (Zhegallo *et al.*, 2005) en een gewicht van ca. 3,5 ton een ware gigant. Het was echter niet de grootse neushoorn die tijdens het Pleistoceen in Eurazië geleefd heeft. Zijn voorganger, *E. caucasicum*, was met een lengte van 5,0-5,2 meter, een schofthoogte van ca. 2,4 meter en een gewicht van ca. 5 ton nog groter (Zhegallo *et al.*, 2005; Schvyreva, 2015).

Het verspreidingsgebied van *Elasmotherium sibiricum* en aanverwante soorten (Fig. 2) beperkt zich met name tot Oost-Europa en Centraal-Azië; daarnaast zijn er een aantal geografisch geïsoleerde vondsten uit Mongolië en China bekend. Schvyreva (2016) veronderstelt dat *Elasmotherium* niet verder naar het westen is gemigreerd vanwege de daar heersende meer vochtige klimaatomstandigheden en de daaraan gekoppelde meer bosrijke vegetatie.

Kenmerkend voor de Siberische eenhoorn is de enorme schedel met een opvallende koepel (bult) op zijn voorhoofd (het frontale; Fig. 3) die de basis vormt van de hoorn. In dit opzicht wijkt de Siberische eenhoorn af van andere neushoorns, zoals de wolharige neushoorn *Coelodonta antiquitatis* waarbij de basis van de hoorn(s) meer naar voren (op het nasale) ligt. Een lengtedoorsnede door de schedel (Fig. 4) laat zien dat de bult op het voorhoofd niet uit massief bot bestaat, maar een spongieuze, cellulaire structuur heeft zoals we die ook bij de schedels van olifanten kennen. Sporen van goed ontwikkelde bloedvaten met name aan de basis van de koepel

suggesteren een sterke doorbloeding. Dit kan volgens sommige onderzoekers duiden op een goed ontwikkeld reukvermogen. De bult heeft een ruw oppervlak; een fenomeen dat we ook zien bij andere neushoorns waar de hoorn(s) op de snuit zitten. Over de vorm en de grootte van de hoorn van de Siberische eenhoorn lopen de meningen nogal uiteen. Zhegallo *et al.* (2005) presenteren een uitgebreid overzicht van de verschillende hypothesen die de afgelopen decennia zijn gepubliceerd.

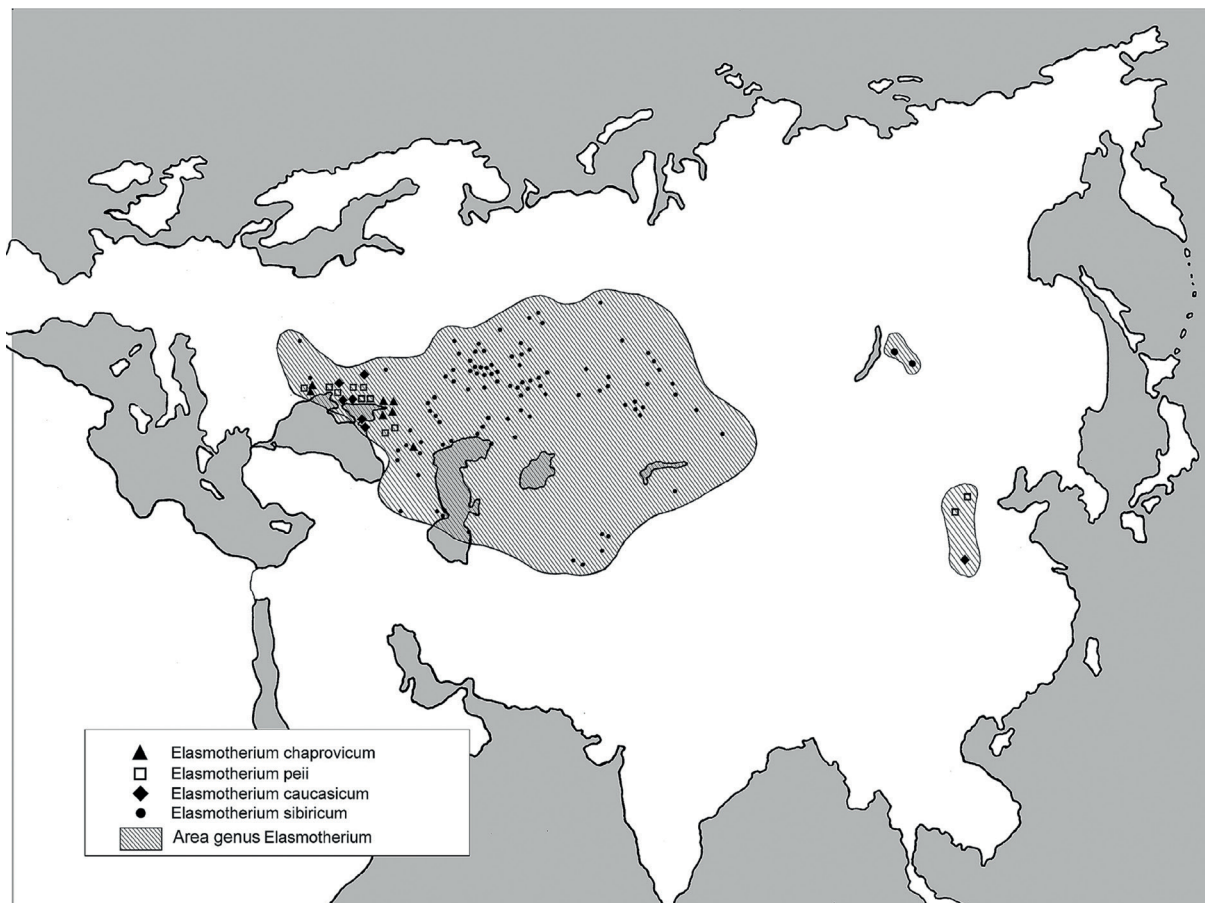
Er is niet alleen discussie over de vorm en grootte van de hoorn; in de literatuur wordt ook gespeculeerd over het omgeving waarin het dier heeft geleefd; a) in moerasachtige gebieden langs rivieren en meren of b) op de droge uitgestrekte steppen (Zhegallo *et al.*, 2005; Schvyreva, 2016). Het kenmerkende gebit van de Siberische eenhoorn wordt door velen gezien als een aanwijzing voor een bewoner van de droge steppen. Het gebit is qua elementen gereduceerd; zowel in de bovenkaak als in de onderkaak ontbreken de snijtanden en hoektanden evenals de voorste twee premolaren. Het permanente gebit bestaat uit vijf zeer hoogkronige kiezen, twee premolaren, drie molaren (Fig. 5). De kiezen hebben geen wortels, waaruit blijkt dat ze het hele leven doorgroeiden. Het email van de kiezen is opvallend sterk geplooid (Fig. 5a). De hoogkronige, wortelloze kiezen met een sterk geplooid email worden gezien als een aanpassing aan voedsel dat een uitzonderlijke snelle slijtage veroorzaakt (Schvyreva, 2016). Het voedsel zelf kan de oorzaak van de snelle slijtage zijn maar ook bijvoorbeeld zand, dat met het voedsel meekomt, kan de slijtage van de kiezen veroorzaken.

Het skelet van de Siberische eenhoorn (Fig. 6) lijkt in veel opzichten op dat van neushoorns. Opvallend is dat de beenderen van de voor- en achterpoten slank van bouw zijn. Dit wordt gezien als een evolutionaire aanpassing waardoor het dier, ondanks zijn grote gewicht, zich snel kon voortbewegen en zo grote afstanden kon afleggen (Schvyreva, 2014; 2015; 2016).

En dan is er nog de vraag of de Siberische eenhoorn heeft voortgeleefd tot in het Laat-Pleistoceen. Op basis van de fossiele gegevens wordt algemeen aangenomen dat *Elasmotherium* tijdens het Midden-Pleistoceen, ca. 200.000 jaar geleden, uitsterft (Zhegallo *et al.*, 2005). Een paleolithische grottschildering in de grot van Rouffignac (Frankrijk) doet echter sterk denken aan een afbeelding van een Siberische eenhoorn en dit indirecte bewijs zou kunnen betekenen dat *Elasmotherium* pas veel later uitgestorven is en dat de moderne mens het dier gezien heeft. Kortom, er zijn nog een aantal vragen rond de Siberische eenhoorn; twee van de vragen kwamen in het onlangs gepubliceerde artikel (Kosintsev *et al.*, 2019) aan bod: a) het moment van uitsterven en b) het dieet van de Siberische eenhoorn op basis van de geanalyseerde stabiele isotopen.

## NEDERLANSE BIJDRAGE AAN HET ONDERZOEK

Vanuit de Universiteit Leiden is, in samenwerking met meerdere collega's uit Rusland, gedurende de laatste decennia veel onderzoek verricht naar de ontwikkeling van de mammoetsteppe. Het eerste project met de titel *Evolution of the European ecosystems during the Pleistocene-Holocene transition (24-8 kyr BP)* (Markova & van Kolfschoten, 2008) richtte zich met name op Europa. In het daaropvolgende



Figuur 2. Geografisch verspreidingsgebied van *Elasmotherium sibiricum* en aanverwante soorten (Schvyreva, 2016).  
Geographical distribution of *Elasmotherium sibiricum* and related species (Schvyreva, 2016).

project met de titel *Collapse of the Mammoth Steppe Ecosystem (COMSEC)* werd Siberië in zijn geheel onder de loep genomen. Beide projecten hebben een schat aan gegevens opgeleverd en veel publicaties. Als spraakmakend voorbeeld van de vele wetenschappelijke artikelen noemen we hier alleen dat over de baby mammoet “Lyuba” (Fisher *et al.*, 2012).

Cruciaal voor het onderzoek waren de honderden  $^{14}\text{C}$  dateringen, welke voornamelijk aan de Rijksuniversiteit Groningen zijn uitgevoerd. Van één vindplaats werden in de regel meerdere fossielen gedateerd om een goed beeld te krijgen van de ouderdom van de fossiele assemblages die vaak uit meerdere lagen afkomstig waren. Dit gebeurde ook bij de datering van de vindplaats Pyshma nabij Jekaterinaburg, in de zuidelijke Oeral. Op die site waren ook resten van de Siberische eenhoorn *Elasmotherium sibiricum* gevonden en ondanks het feit dat we veronderstelden dat het om ouder materiaal ging, dat als fossiel in de assemblage terecht gekomen was, werd het monster in de  $^{14}\text{C}$  molen meegenomen. Het resultaat was verrassend; de ouderdom van de zogenaamde fossielen bleken binnen het  $^{14}\text{C}$  bereik te liggen en even oud te zijn als de overige gedateerde resten van de vindplaats. Reden genoeg om meer *Elasmotherium* fossielen uit die regio te dateren.

## NIEUWE DATERINGEN

In totaal zijn er 25 *Elasmotherium* fossielen afkomstig van diverse locaties in het verspreidingsgebied gedateerd met de  $^{14}\text{C}$  methode; hiervan leverden 23 botmonsters voldoende collageen voor datering. Er bleken 19 monsters in het  $^{14}\text{C}$  bereik te vallen; vier zijn niet te onderscheiden van de

achtergrond van de methode, die is ongeveer 45.000  $^{14}\text{C}$  jaren. De  $^{14}\text{C}$  ouderdom wordt in BP uitgedrukt, wat staat voor Before Present, zoals gebruikelijk in de geologie en paleontologie. Maar voor  $^{14}\text{C}$  kan dit niet letterlijk worden genomen, wat gemakkelijk tot verwarring kan leiden. De oorzaak is dat het  $^{14}\text{C}$  gehalte in de natuur niet constant is, zodat het verband tussen de  $^{14}\text{C}$  tijdschaal en de kalender niet lineair is. De  $^{14}\text{C}$  tijdschaal moet dan ook worden geijkt. Deze ijking of kalibratie is vastgelegd door vergelijking van  $^{14}\text{C}$  dateringen met die verkregen door andere methodes, zoals dendrochronologie en Uraniumdateringen (Reimer *et al.*, 2013). Kalibraties kunnen online worden gedaan met het interactieve programma OxCal. De gekalibreerde dateringen worden gerapporteerd in calBP, wat is gedefinieerd als kalenderjaren ten opzichte van 1950 AD.

Tabel 1 geeft een overzicht van de dateringen en andere gegevens. De meeste fossielen zijn gedateerd in Groningen. Gaandeweg het onderzoek is ook een samenwerking geïnitieerd met collega's van het Natural History Museum in Londen en het  $^{14}\text{C}$  laboratorium in Oxford. In de collectie van het museum zijn ook twee *Elasmotherium sibiricum* exemplaren aanwezig. De codering voor Groningen is GrA, die voor Oxford is OxA.

De negen jongste monsters volgens de oorspronkelijke Groninger dataset zijn vervolgens ook in Oxford gedateerd. Hiervan gaven vijf hetzelfde resultaat (binnen de onderlinge meetfout), voor vier was er discrepantie: twee OxA dateringen zijn ouder dan GrA, en twee GrA dateringen zijn ouder dan OxA. Deze discrepanties konden worden opgelost

*Figuur 3. Schedel van de Elasmotherium sibiricum uit de collectie van het Zoologisch Museum in St. Petersburg (Rusland).*

*Cranium of an Elasmotherium sibiricum from the collection of the Zoological Museum in St. Petersburg (Russia).*



ALEXEI TIKHONOV

*Figuur 4. Lengtedoorsnede van de schedel van Elasmotherium sibiricum (Schvyreva, 2016).*

*Longitudinal section of the cranium of an Elasmotherium sibiricum (Schvyreva, 2016).*



*Figuur 5. Kauwvlak en zijaanzicht van een bovenkaaks M3 van een Elasmotherium sibiricum uit de Lower Don Region, laat Midden-Pleistoceen, collectie Azov Museum-reserve.*

*Surface and lateral view of an upper M3 of an Elasmotherium sibiricum from the Lower Don Region, late Middle-Pleistocene, collection Azov Museum-reserve.*



VADIM TITOV

Locality	Sample	Lab nr	BP sigma	lab nr	BP sigma	lab nr	BP sigma	calBP 2-sigma	d <sup>13</sup> C ‰	d <sup>15</sup> N ‰
Irbit	molar	GrA-53428	<u>29470</u> 145	OxA- V2754-18&19	<u>29400</u> 320	OxA-X2750-14&15	>50000		-17,4	10,1
Smelovskya	cranium	GrA-32606	>45000						-15,8	11
Saratov	molar	GrA-62353	33630	OxA-29557	<u>31650</u>	OxA-X2762-57	>45700		-17,3	11,6
European Russia	cranium	GrA-62204	<u>28650</u> 160	OxA-36749	<u>38300</u> 900	OxA-X2750-38	<u>50300</u> 2700		-16,6	10,4
Tobolsk	radius			OxA-34900	>49200				-18,8	12,8
Bashkiriya	cranium	GrA-55451	<u>43900</u> 575					48630- 45920	-16,4	9,6
Samara	cranium	GrA-62202	<u>42230</u> 370					46260- 44860	-17,2	9,6
Bashkiriya	cranium	GrA-55450	<u>41220</u> 445					45560- 43870	-17,8	6,5
Samara	femur	GrA-61035	<u>40860</u> 445					45260- 43500	-17,3	8,8
Samara	tooth	GrA-61030	<u>40470</u> 445					44910- 43220	-17,7	10,2
Samara	cranium	GrA-61033	<u>40200</u> 445					44670- 43040	-18,7	10
Samara	cranium	GrA-61031	<u>40180</u> 445					44660- 43020	-21,5	8,4
Borovlyanka	molar	GrA-53425	<u>39480</u> 355					43920- 42640	-18,8	9,4
unknown	cranium	GrA-62203	<u>38440</u> 295					42940- 42080	-16,9	10,3
Luchka	vertebra	GrA-62200	<u>38230</u> 285					42800- 41970	-18,2	10,1
European Russia	vertebra	GrA-62197	<u>37850</u> 285					42570- 41720	-17,8	7,2
Luchka	cranium	GrA-62198	<u>32410</u> 200	OxA-V2754-17	<u>33040</u> 340	OxA-X2750-13	<u>36850</u> 650	42430- 40200	-18,3	9,5
Bashkiriya	cranium	GrA-55452	<u>36290</u> 275					41530- 40300	-18,2	10,4
Bashkiriya	mandible	GrA-55453	<u>31040</u> 175	OxA-31828	<u>31850</u> 400	OxA-X2756-57	<u>34400</u> 1000	41230- 36540	-19,2	7,2
Voronovka	cranium	GrA-53426	<u>33620</u> 210	OxA-31896	<u>34500</u> 600	OxA- X2677-55	<u>34250</u> 700	40440- 36820	-18,7	8,6
Borovlyanka	metacarpal	GrA-53424	<u>33380</u> 205	OxA-31827	<u>34200</u> 550	OxA-X2756-56	<u>33300</u> 1100	40400- 35240	-18,6	9,6
Borovlyanka	molar	GrA-52426	<u>22180</u> 95	OxA-31826	<u>33450</u> 500	OxA X2677-54	<u>33650</u> 650	39570- 36340	-20,9	n/a
Sarepta	cranium	GrA-62354	<u>39020</u> 215	OxA-28220	<u>32250</u> 450	OxA X2677-52	<u>33250</u> 500	38690- 36260	-16,3	7,8
Bashkiriya	cranium	geen collageen								
Odessa	tooth	geen collageen								

Tabel 1. Dateringen en stabiele-isotopengegevens van *Elasmotherium sibiricum*. Zwart: dateringen uit Groningen (GrA); paars: uit Oxford (OxA); blauw: Oxford HYP-dateringen. De <sup>14</sup>C dateringen zijn gekalibreerd met IntCal13 (Reimer et al., 2013) en het 2-sigma ouderdomsgebied is weergegeven in calBP. De eerste vijf dateringen vallen buiten het bereik van de ijkgrafiek.

Dates and stable isotope data of *Elasmotherium sibiricum*. Black: dates from Groningen (GrA); purple: from Oxford (OxA); blue: Oxford HYP-dates. The <sup>14</sup>C dates are calibrated with IntCal13 (Reimer et al., 2013) and the 2-sigma dating area is shown in calBP. The first five dates are out of range with the calibration graph.



Figuur 6. Skelet van de *Elasmotherium sibiricum* in het Stavropol regionaal museum (Schvyreva, 2016).  
 Skeleton of an *Elasmotherium sibiricum* in the Stavropol regional museum (Schvyreva, 2016).

doordat in Oxford een nieuw toegevoegd element is ontwikkeld om dateringen van mogelijk gecontamineerde monsters te verbeteren. De standaard methode voor het dateren van botmonsters is gebaseerd op collageen. Bij de nieuwe methode wordt vervolgens het meest stabiele aminozuur uit het collageen geëxtraheerd: hydroxyproline (oftewel HYP). In ons geval van belang omdat het collageen zeer waarschijnlijk verontreinigd is met conserveermiddelen, welke moeilijk of onmogelijk te verwijderen zijn met de standaard methode. De dateringen uit Oxford zijn in kleur weergegeven in de tabel; paars voor standaard- en blauw voor HYP-dateringen.

In de tabel zijn ook de dateringen gekalibreerd weergegeven in calBP, met hun 2-sigma betrouwbaarheidsinterval. De kalibratiegrafiek IntCal13 is hiervoor gebruikt (Reimer *et al.*, 2013). De eerste vijf dateringen vallen buiten het bereik van de ijkgrafiek. Voor overige gegevens zoals coördinaten van de locaties en de museumidentificatieparameters verwijzen we naar de online “supplementary information” in Kosintsev *et al.* (2019).

In Fig. 7 zijn de dateringen vergeleken met gegevens afkomstig van Groenlandse ijskernen (Rasmussen *et al.*, 2014). Uitgezet zijn metingen van concentraties van het zuurstofisotoop  $^{18}\text{O}$  in ijs als functie van de tijd. Dit isotoop is een proxy voor temperatuur oftewel klimaat; meer positieve waarden komen overeen met relatief warme perioden, meer negatieve met koudere perioden. Holoceen en Pleistoceen zijn duidelijk te onderscheiden en aangegeven in de figuur. Het Pleistoceen wordt gekenmerkt door klimaatfluctuaties genaamd Groenlandse Stadiaalen en Interstadialen. In Fig.

7 zijn alleen de hier relevante interstadialen i7 en i8, en het stadiaal s8 aangegeven; het uitsterven van de *Elasmotherium* vond plaats gedurende deze perioden van klimaatfluctuaties.

Onze dateringen laten duidelijk zien dat *Elasmotherium sibiricum* gedurende het laat Kwartair is uitgestorven, vóór het Laat Glaciale Maximum (LGM, ruwweg 25.000 jaar geleden). In ieder geval zijn er geen vondsten van *Elasmotherium* bekend met een LGM (of jongere) context. Het uitsterven van de *Elasmotherium* kan dus worden gezien als behorend tot de “megafauna extinctie” van de laatste ijstijd. Deze vond plaats gedurende een tijdperk van extreme veranderingen in het klimaat, zoals waargenomen in diepzeekernen en ook als (inter)stadialen in Groenlandse ijskernen (Fig. 7), bekend als Marine Isotope Stage (MIS) 3. Het is opvallend dat het uitsterven van *Elasmotherium* min of meer samenvalt met stadiaal s8 (Fig. 7) en bovendien ook met een periode waarin een extreme “ice rafting” optreedt in de Noordelijke Atlantische oceaan, een periode die bekend staat als Heinrich event H4.

## STABIELE ISOTOPEN

Collageen is de dateerbare fractie voor  $^{14}\text{C}$  dateringen. Van hetzelfde collageen worden ook de concentraties van de stabiele isotopen  $^{13}\text{C}$  en  $^{15}\text{N}$  gemeten. Deze stabiele isotopen zijn “tracers” voor biologische, fysische en chemische processen, omdat deze processen massa-afhankelijk zijn. De zeldzame isotopen  $^{13}\text{C}$  en  $^{15}\text{N}$  hebben een grotere massa dan de meest voorkomende isotopen  $^{12}\text{C}$  en  $^{14}\text{N}$ .

Hier behandelen we alleen de stabiele isotopen in de voedselketen. Van fossiele botten kunnen we met behulp van de isotopen specifieke groepen organismen onderscheiden. Bijvoorbeeld, aquatische organismen hebben een verhoogde <sup>15</sup>N concentratie; planten kunnen wat betreft fotosynthese worden onderscheiden in zogenaamde C3 en C4 planten, elk met een specifieke <sup>13</sup>C concentratie, die ook te meten is in botten van consumenten van de planten; en verder neemt zowel de <sup>13</sup>C als <sup>15</sup>N concentratie toe naar mate men hoger in de voedselketen staat. Om een anekdotische titel van een klassiek artikel (Kohn, 1999) te citeren: “*you are what you eat*” (plus a few permil).

De concentratie van de zeldzame isotopen wordt uitgedrukt in zogenaamde deltawaarden, gedefinieerd als het relatieve verschil in verhouding van zeldzaam tot meest voorkomend isotoop ten opzichte van een referentie materiaal:

$$\delta^{13}C = \left[ \frac{(^{13}C / ^{12}C)_{monster}}{(^{13}C / ^{12}C)_{referentie}} - 1 \right] \times 1000\text{‰}$$

$$\delta^{15}N = \left[ \frac{(^{15}N / ^{14}N)_{monster}}{(^{15}N / ^{14}N)_{referentie}} - 1 \right] \times 1000\text{‰}$$

De deltawaarden worden getalsmatig in promille (Engels: permil; ‰) uitgedrukt. De referentiematerialen zijn een belemniet (bekend als VPDB) voor <sup>13</sup>C en lucht (AIR) voor <sup>15</sup>N (zie bijvoorbeeld Mook, 2006 voor verdere technische details). Deze standaardisatie wordt door alle onderzoekers wereldwijd

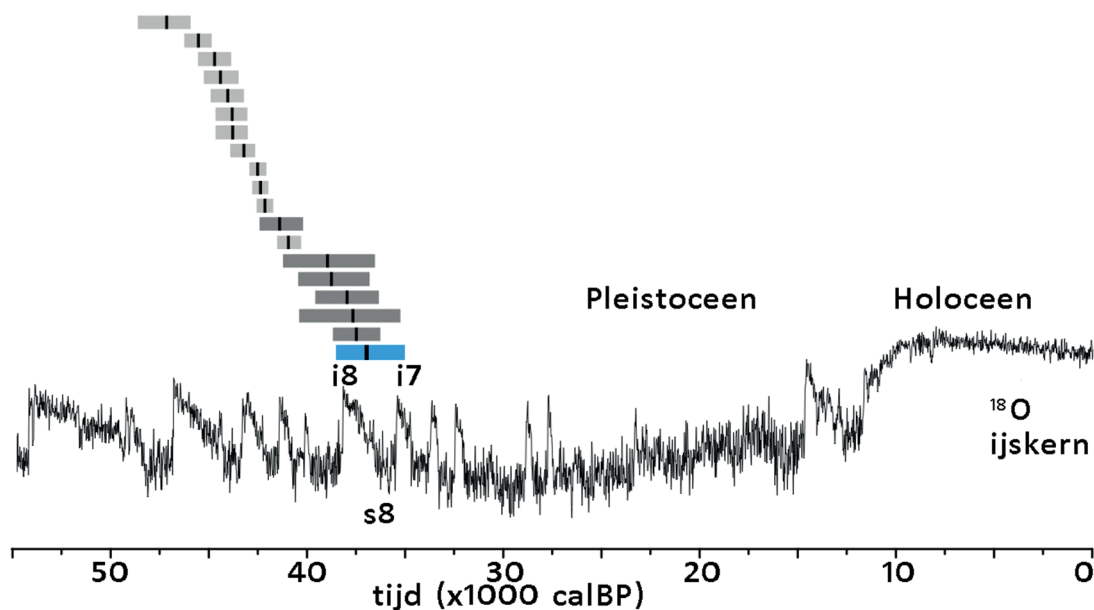
gebruikt, zodat alle deltawaarden uit de literatuur dezelfde betekenis hebben en onderling vergeleken kunnen worden.

De <sup>δ</sup><sup>13</sup>C en <sup>δ</sup><sup>15</sup>N waarden worden in het algemeen op dezelfde manier geplot: <sup>δ</sup><sup>13</sup>C horizontaal, en <sup>δ</sup><sup>15</sup>N verticaal, wat een handzaam overzicht geeft. Theoretisch ziet dit eruit als in Fig. 8a, waarin de hierboven genoemde dieetgroepen te herkennen zijn. Hierbij is aangenomen dat het dieet bestaat uit 100% van de aangegeven voedselbron.

Door middel van “isotope tracing” kan bijvoorbeeld van een bot worden vastgesteld of het een marien organisme betreft, een herbivoor of een carnivoor, of in een gebied heeft geleefd gedomineerd door C4 vegetatie. Maïs en gierst zijn bekende C4 planten. De isotopen <sup>13</sup>C, <sup>14</sup>C en <sup>15</sup>N van collageen leveren essentiële herkomstinformatie op bruikbaar bij archeologisch, forensisch en paleontologisch onderzoek. Zo ook voor *Elasmotherium sibiricum*.

De <sup>δ</sup><sup>13</sup>C en <sup>δ</sup><sup>15</sup>N waarden voor *Elasmotherium sibiricum* zijn gegeven in Tabel 1. De waarden zijn geplot in Fig. 8b. Bij een vergelijking met Fig. 8a valt meteen op dat de *Elasmotherium* waarden uitzonderlijk zijn, en om een specifieke interpretatie vragen.

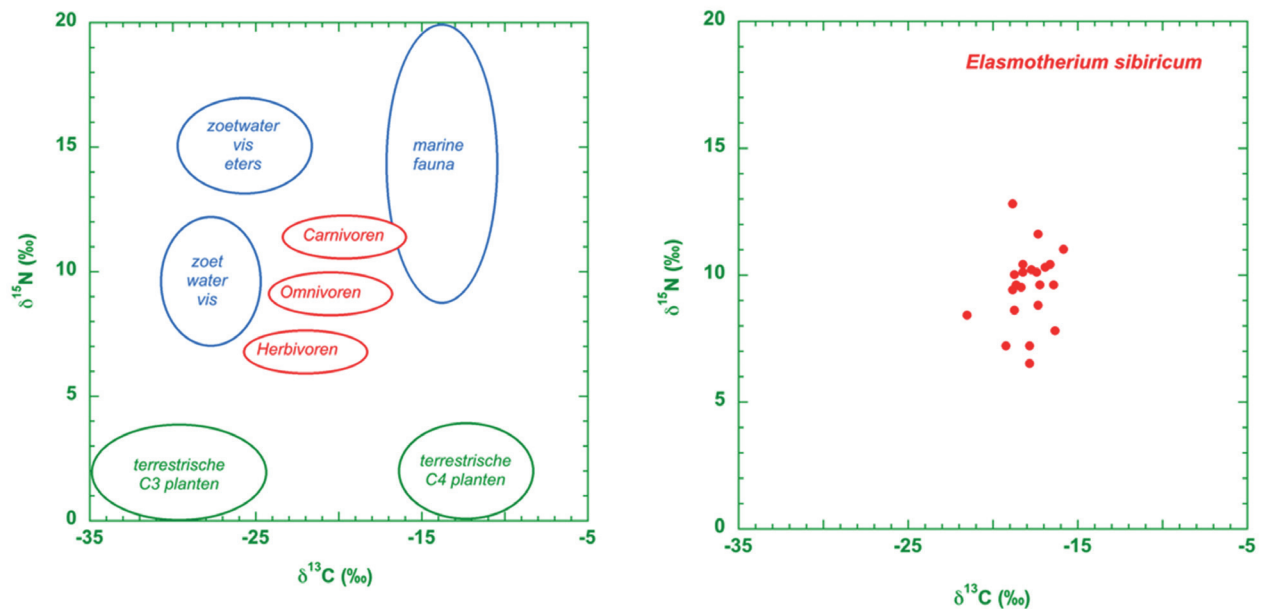
De gemiddelde <sup>δ</sup><sup>13</sup>C en <sup>δ</sup><sup>15</sup>N waarden van de gemeten *Elasmotherium* monsters zijn respectievelijk -18.1±0.3 ‰ en +9.4±0.3 ‰. Beide waarden zijn positiever dan men zou verwachten voor herbivoren, ook vergeleken met huidige en uitgestorven neushoornsoorten. De meest positief gemeten waarden zijn -15.8‰ voor <sup>δ</sup><sup>13</sup>C, en +12.8‰ voor <sup>δ</sup><sup>15</sup>N.



Figuur 7. Gekalibreerde <sup>14</sup>C dateringen van *Elasmotherium sibiricum*, vergeleken met de chronologie en temperatuur van Groenlands ijs. De blauwe band is het “extinction event” bepaald uit de dateringen.

Calibrated <sup>14</sup>C dates of *Elasmotherium sibiricum*, compared with the chronology and temperature of Greenland ice. The blue area marks the extinction event, as determined from dating samples.





Figuur 8. Stabiele isotoopwaarden in botcollageen ( $^{15}\text{N}$  verticaal,  $^{13}\text{C}$  horizontaal), met links schematisch aangegeven de (gedeeltes van) de voedselketen en rechts de gemeten waarden voor *Elasmotherium sibiricum*.

Stable isotope measurements from bone collagen ( $^{15}\text{N}$  vertical,  $^{13}\text{C}$  horizontal), with on the left a schematic drawing of (part of) the food chain and on the right the results of *Elasmotherium sibiricum*.

Paleobotanische gegevens laten zien dat gedurende MIS 3 de habitat van *Elasmotherium sibiricum* voornamelijk bestond uit een open steppelandschap. Hoge  $\delta^{13}\text{C}$  en  $\delta^{15}\text{N}$  waarden worden waargenomen bij zoogdieren in droge steppen of woestijnen. De relatief hoge  $\delta^{13}\text{C}$  waarden kunnen ook een gevolg zijn van een dieet dat (gedeeltelijk) C4 vegetatie bevat, of ondergrondse plantendelen zoals wortels en knollen, welke doorgaans ook verhoogde  $\delta^{13}\text{C}$  waarden hebben. Het zou ook verklaren waarom de kiezen van *Elasmotherium* hoogkronig zijn en geen wortels hebben waardoor ze een onbeperkte groei hebben: bij het eten van knollen komt veel zand mee, waardoor de tanden van het dier waarschijnlijk in een hoog tempo sleten.

Voor meer details en vergelijking met andere diersoorten verwijzen we naar het proefschrift van de eerste auteur (Kuitens, 2019), waarin stabiele isotoop gegevens van de uitgestorven megafauna van de mammoetsteppe uitgebreid worden bediscussieerd.

## CONCLUSIE

De dateringsresultaten zijn nogal opzienbarend; er is echter geen enkele reden om de datering in twijfel te trekken. De  $^{14}\text{C}$  dateringsmethode is de laatste decennia sterk verbeterd, met name betreffende het kalibreren (het absoluut maken van de tijdschaal) en door de mogelijkheid van “compound specific” dateren van botcollageen. Veel *Elasmotherium* botten blijken binnen het meetgebied van  $^{14}\text{C}$  (ca. 50.000 jaar) te liggen, wat betekent dat de Siberische eenhoorn veel later is uitgestorven dan voor kort werd aangenomen. De soort stierf uit in een

periode waarin ook andere soorten, die tot de mammoetsteppe megafauna behoorden, uitstierven. Verder is het fascinerend te beseffen dat de moderne mens het dier moet hebben gekend. Er wordt zelfs gespeculeerd dat ze zijn afgebeeld in paleolithische grottekeningen; een controversieel onderwerp. Zie hiervoor o.a. het artikel van Zhegallo *et al.* (2005) in een eerdere uitgave van Cranium, waarin ook een uitgebreid overzicht is gegeven van eerder Russisch onderzoek.

De stabiele isotopen  $^{13}\text{C}$  en  $^{15}\text{N}$  van het gedateerde collageen leveren informatie over paleoecologie en paleodieet: wat stond er bij *Elasmotherium* op het menu? Voor dit bijzondere dier blijkt dit voornamelijk uit ondergrondse plantenresten te bestaan. Dat is een bevestiging van een belangrijke paleontologische waarneming: de kiezen van *Elasmotherium* waren aangepast aan een dieet dat extreme slijtage veroorzaakte.

Ons onderzoek laat zien dat de toepassing van modern natuurwetenschappelijke methoden nieuwe, verbazingwekkende gegevens kan opleveren, ook als het om relatief goed onderzochte pleistocene soorten gaat.

## DANKWOORD

De auteurs zijn dank verschuldigd aan de mede-auteurs van ons Nature artikel, en in het bijzonder aan onze Russische collega's Pavel Kosintsev (Jekaterinburg), Alexei Tikhonov en Ekaterina Petrova (St. Petersburg), en Vadim Titov (Rostov-on-Don) voor het beschikbaar stellen van het monstermateriaal en relevante literatuur en foto's.

## LITERATUUR

Fisher, D.C., A.N. Tikhonov, P.A. Kosintsev, A.N. Rountrey, B. Buigues, J. van der Plicht (2012) Anatomy, death and preservation of a woolly mammoth (*Mammuthus primigenius*) calf, Yamal Peninsula, northwest Siberia. *Quaternary International* 255, 94-105.

Kohn, M.J. (1999) You are what you eat. *Science* 283, 335-336.

Kosintsev, P., K.J. Mitchell, T. Devièse, J. van der Plicht, M. Kuitems, E. Petrova, A. Tikhonov, T. Higham, D. Comeskey, C. Turney, A. Cooper, T. van Kolfschoten, A.J. Stuart, A.M. Lister (2019) Evolution and extinction of the giant rhinoceros *Elasmotherium sibiricum* sheds light on late Quaternary megafaunal extinction. *Nature Ecology and Evolution* 3, 31-38.

Kuitems, M. (2019): Proefschrift, Universiteit Leiden (in bewerking).

Markova, A.K., T. van Kolfschoten (eds.) (2008) *Evolution of the European ecosystems during the Pleistocene-Holocene transition (24-8 Kyr BP)*. KMK Scientific Press (Moscow) [Russisch].

Mook, W.G. (2006). *Introduction to Isotope Hydrology*. Taylor and Francis, London.

Rasmussen, S.O., M. Bigler, S.P. Blockley, T. Blunier, S.L. Buchardt, H.B. Clausen, I. Cvijanovic, D. Dahl-Jensen, S.J. Johnsen, H. Fischer, V. Gkinis, M. Guillevic, W.Z. Hoek, J.J. Lowe, J.B. Pedro, T. Popp, I.K. Seierstad, J.P. Steffensen, A.M. Svensson, P. Vallenga, B.M. Vinther, M.J.C. Walker, J.J. Wheatley, M. Winstrup (2014) A stratigraphic framework for abrupt climatic changes during the Last Glacial period based on three synchronized Greenland ice-core records: refining and extending the INTIMATE event stratigraphy. *Quaternary Science Reviews* 106, 14-28.

Reimer, P.J., E. Bard, A. Bayliss, J.W. Beck, P.G. Blackwell, C. Bronk Ramsey, C.E. Buck, R.L. Edwards, M. Friedrich, P.M. Grootes, T.P. Guilderson, H. Haffidason, I. Hajdas, C. Hatté, T.J. Heaton, D.L. Hoffmann, A.G. Hogg, K.A. Hughen, K.F. Kaiser, Bernd Kromer, S.W. Manning, M. Niu, R.W. Reimer, D.A. Richards, E. M. Scott, J.R. Southon, R.A. Staff, C.S.M. Turney, J. van der Plicht (2013) IntCal13 and Marine13 Radiocarbon age calibration curves 0-50,000 years cal BP. *Radiocarbon* 55, 1869-1887.

Schvyreva, A.K. (2014) *The rhinoceroses of the genus Elasmotherium in the biochronology of Eastern Europe*. In: Kostopoulos, D.S., E. Vlachos, E. Tsoukala (eds.) Abstract Book of the VIth International Conference on Mammoths and their Relatives. S.A.S.G., Special Volume 102, 180 – 181.

Schvyreva, A.K. (2015) On the importance of the representatives of the genus *Elasmotherium* (Rhinocerotidae, Mammalia) in the biochronology of the Pleistocene of Eastern Europe. *Quaternary International* 379, 128-134.

Schvyreva, A.K. 2016. *The Elasmotherii of Pleistocene Eurasia*. Pechatniy Dvor Publishers, Stavropol, 1-218 [Russisch].

Zhegallo, V., N. Kalandadze, A. Shapovalov, Z. Bessudnova, N. Noskova, E. Tesakova (2005) on the fossil rhinoceros *Elasmotherium* (including the collections of the Russian Academy of Sciences). *Cranium* 22, 17-40.