

VU Research Portal

Thermo-tectonic evolution of a convergent orogen with low topographic build-up

Merten, S.

2011

document version

Publisher's PDF, also known as Version of record

[Link to publication in VU Research Portal](#)

citation for published version (APA)

Merten, S. (2011). *Thermo-tectonic evolution of a convergent orogen with low topographic build-up: Exhumation and kinematic patterns in the Romanian Carpathians derived from thermochronology*. [PhD-Thesis - Research and graduation internal, Vrije Universiteit Amsterdam].

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

E-mail address:

vuresearchportal.ub@vu.nl

VRIJE UNIVERSITEIT

**Thermo-tectonic evolution of a convergent orogen
with low topographic build-up**

**Exhumation and kinematic patterns in the Romanian
Carpathians derived from thermochronology**

ACADEMISCH PROEFSCHRIFT

ter verkrijging van de graad Doctor aan
de Vrije Universiteit Amsterdam,
op gezag van de rector magnificus
prof.dr. L.M. Bouter,
in het openbaar te verdedigen
ten overstaan van de promotiecommissie
van de faculteit der Aard- en Levenswetenschappen
op donderdag 19 mei 2011 om 13.45 uur
in de aula van de universiteit,
De Boelelaan 1105

door

Sandra Merten

geboren te Amsterdam

promotor: prof.dr. P.A.M. Andriessen
copromotor: dr. L.C. Matenco

It is not the mountain we conquer, but ourselves.

Sir Edmund Hillary

The clock is running. Make the most of today. Time waits for no man.
Yesterday is history. Tomorrow is a mystery. Today is a gift.
That's why it is called the present.

Alice Morse Earle

The research for this thesis was funded by the Netherlands Research Centre for Integrated Solid Earth Science (ISES) and the VU University Amsterdam. It was conducted at:

Departments of Isotope Geochemistry and Tectonics
Faculty of Earth and Life Sciences
VU University Amsterdam
De Boelelaan 1085
1081 HV Amsterdam
The Netherlands



Leescommissie: prof.dr. M. Ducea
prof.dr. B. Fügenschuh
dr. F.M. Stuart
dr. M. ter Voorde
dr. E. Willingshofer

ISBN 978-90-9026120-1
Copyright © 2011, S. Merten

This is NSG publication № 2011.05.19

Title: Thermo-tectonic evolution of a convergent orogen with low topographic build-up: Exhumation and kinematic patterns in the Romanian Carpathians derived from thermochronology.
(PhD thesis, VU University Amsterdam)

Translated title: Thermo-tektonische ontwikkeling van een convergent gebergte met geringe topografische opbouw: Exhumatie- en kinematische patronen in de Roemeense Karpaten afgeleid van thermochronologie
(Academisch proefschrift, Vrije Universiteit Amsterdam)

Typeset in L^AT_EX 2_ε

Printed by Ipskamp Drukkers B.V., Amsterdam/Enschede

Cover: NW-ward view from the Siriu Dam on the low-topography SE Carpathians (Fieldwork July 2005, Buzău Valley).

Contents

Acknowledgements	ix
Samenvatting	xiii
Summary	xvii
1 Introduction	1
1.1 The evolution of convergent orogens	1
1.2 Deriving orogenic mechanics using thermochronology	3
1.3 The low-topography Carpathian orogen	3
1.4 Thesis outline	6
2 Low-temperature thermochronology	7
2.1 Introduction	7
2.2 Apatite fission track (AFT) thermochronology	9
2.2.1 Fission track formation	9
2.2.2 Age determination and calculation	10
2.2.3 Stability and fading of tracks	13
2.2.4 Laboratory and analytical procedures	16
2.2.5 Statistical analysis of single grain age data	17
2.3 Apatite (U-Th)/He (AHe) thermochronology	18
2.3.1 ⁴ He ingrowth	18
2.3.2 ⁴ He diffusion	21
2.3.3 Analytical procedures ⁴ He extraction	25
2.3.4 Analytical procedures U and Th analysis	26
2.3.5 Blank corrections	27
2.3.6 Durango apatite standard	29
2.3.7 AHe age and error calculation	30
2.3.8 Intra-sample variations in single crystal ages	31

2.4	Deriving thermal histories and exhumation/denudation estimates from AFT and AHe data	34
2.4.1	AFT annealing models	34
2.4.2	AHe diffusion models	36
2.4.3	Thermal modelling	38
2.4.4	Conversion of time-temperature histories into exhumation / denudation estimates	39
3	Towards understanding the post-collisional evolution of an orogen influenced by convergence at adjacent plate margins: Late Cretaceous–Tertiary thermo-tectonic history of the Apuseni Mountains	41
3.1	Introduction	41
3.2	The Apuseni Mountains: a transitional orogen between the Carpathians and Dinarides	42
3.2.1	Late Cretaceous tectonics and magmatism	44
3.2.2	Post-Cretaceous evolution of the Apuseni Mountains and Transylvania Basin	46
3.3	Thermochronology of the Apuseni Mountains	46
3.3.1	Discussion of apatite fission track and (U-Th)/He data	49
3.3.2	Thermal modelling	55
3.4	Paleogene kinematics of the Apuseni Mountains in the vicinity of the Transylvania Basin	55
3.4.1	The Mezeş Mountains and Vlădeasa Massif	59
3.4.2	The transition between the Mezeş and Ticău mountains	61
3.4.3	The area SW of Cluj-Napoca	64
3.5	Late Cretaceous–Miocene exhumation and tectonics of the Apuseni Mountains	64
3.5.1	Latest Cretaceous–Paleocene exhumation: “Laramian” thrusting and Banatitic magmatism	65
3.5.2	Middle Eocene–Oligocene exhumation: thrusting along Mezeş and Puini thrusts	67
3.5.3	Middle Miocene extension	70
3.5.4	Late middle to late Miocene deformation and volcanism	70
3.5.5	Latest Miocene–recent exhumation: inversion of the Transylvania Basin	71
3.6	Conclusions	71
4	From nappe-stacking to out-of-sequence post-collisional deformations: Cretaceous to Quaternary exhumation history of the SE Carpathians assessed by low-temperature thermochronology	73
4.1	Introduction	73
4.2	Evolution of the East and SE Carpathians and kinematic constraints	76
4.2.1	Cretaceous convergence of Ceahlău-Severin	76
4.2.2	Miocene contraction of the external East and SE Carpathians	77
4.3	Post-collisional deformation in the SE Carpathians	79
4.4	Low-temperature thermochronology of the SE Carpathians	80

4.4.1	Analytical results	82
4.4.2	Thermochronological ages versus depositional age	83
4.4.3	Thermal evolution of the SE Carpathians	83
4.5	Interpretation and estimates on uplift and erosion, subsidence and sedimentation	92
4.5.1	Cretaceous–Paleogene exhumation	92
4.5.2	Miocene contraction and collision of the East and SE Carpathian nappes	94
4.5.3	Late Miocene–Quaternary post-collisional evolution	95
4.6	Particularities of SE Carpathian kinematics	98
4.6.1	Paleogene exhumation of the SE Carpathians	98
4.6.2	Collision mechanics	98
4.6.3	Post-collisional exhumation and subsidence: what is driving it?	99
4.7	Conclusions	100
5	Collisional characteristics of an orogen with low topographic build-up: Integration of the high-resolution exhumation history of the SE Carpathians at the scale of the entire Romanian Carpathians	103
5.1	Introduction	103
5.2	The Romanian Carpathians: framework of kinematics and collision	105
5.3	Overview of thermochronology data of the East, SE and South Carpathians	107
5.3.1	AHe thermochronology results	107
5.3.2	Discussion of AHe and AFT data	107
5.3.3	Time-temperature histories for the East, SE and South Carpathians	116
5.4	Exhumation and geometry during the Miocene collision of the Carpathians	117
5.4.1	Miocene contraction and collision of the East and SE Carpathian nappes	121
5.4.2	Latest Miocene–Quaternary post-collisional exhumation of the East and SE Carpathians	124
5.4.3	Exhumation history of the South Carpathians	124
5.5	Controls on the exhumation of the Romanian Carpathians and foreland-coupling collision	125
6	Multi-phase exhumation history of a low-topography orogen: A compilation of low-temperature thermochronological data for the Romanian Carpathians	129
6.1	Introduction	129
6.2	Brief overview of the main tectonic units and deformation events at regional scale	133
6.3	Data sources and methodological constraints	136
6.3.1	Quality and homogeneity of the data	136
6.3.2	Elevation	137
6.3.3	Maps of interpolated thermochronological ages	137

6.3.4	Reconstruction of exhumation and burial in the Romanian Carpathians	138
6.4	Main features of thermochronological age patterns	139
6.4.1	ZFT age patterns	139
6.4.2	AFT age patterns	142
6.4.3	AHe age patterns	142
6.5	Spatial and temporal distribution of exhumation patterns and differential vertical movements	143
6.5.1	Latest Cretaceous–middle Eocene (78–41 Ma)	143
6.5.2	Middle Eocene–Oligocene (41–23 Ma)	144
6.5.3	Early–middle Miocene (23–11/9 Ma)	148
6.5.4	Latest Miocene–present-day (11/9–0 Ma)	148
6.6	Kinematic evolution of the Romanian Carpathians	149
6.6.1	Latest Cretaceous–middle Eocene tectonics	153
6.6.2	Middle Eocene–Oligocene rotations and shortening	154
6.6.3	Miocene orogenic events	155
6.6.4	Post-collisional evolution	157
6.7	Present-day topography and its link with exhumation and tectonics	158
6.8	Accelerated Pliocene–Quaternary exhumation of the SE Carpathians in a regional perspective – the effects of tectonics and climate .	160
6.9	Conclusions	162
	Appendices	165
	A Apatite Fission Track Analytical Data	165
	B Apatite (U-Th)/He Analytical Data	169
	References	179

Acknowledgements

“The world is the geologist’s great puzzle-box; he stands before it like the child to whom the separate pieces of his puzzle remain a mystery till he detects their relation and sees where they fit, and then his fragments grow at once into a connected picture beneath his hand.”, *Louis Agassiz*.

To me, this phrase illustrates the beauty of geology, although the comparison is quite an oversimplification (a geologist does not know exactly how many pieces the puzzle has, nor where the borders of the puzzle are, nor what the picture should really look like). Trying to put the pieces of the puzzle together is very exciting, but it can also be quite a challenge, especially when you are working on a PhD thesis. Fortunately, there were many people to help me. I would like to thank everyone who contributed to this work and who have supported me over the years!

First of all I would like to thank my supervisors, Paul Andriessen and Liviu Matenco. Paul, thank you for your support and for introducing me to the world of thermochronology. When I started working on this project, I did not know much about thermochronology and how it could be used to study a complex tectonic setting like the Carpathians. I think we have come a long way since then.

Liviu, thank you for all your input into this project. You gave me a great introduction to the geology (and the country) of Romania. I still remember very well how we started in Oradea, looking for extensional structures in the Borod and Beius basins (being observed by the buffaloes). From there we drove all the way to the Putna and Buzău valleys to look at the tilted Miocene–Pliocene strata (and “Intorsura Buzăului”). I really appreciate the constructive and inspiring discussions we have had over the years. Without your endless support and encouragement to focus on the right things, I do not think I would have been able to finish this thesis. Thank you so much for everything you have done for me.

I would also like to thank Jurgen Foeken for his help over the past few years, particularly for his input on the (U-Th)/He part of this project, first in Glasgow at SUERC and later in Amsterdam at the VU. Jurgen, thank you for the great discussions on the helium data and for reviewing the chapters of this thesis (including the sedimentary cycles).

I would like to thank the members of the reading committee, Prof. dr. Bernhard Fügenschuh, Dr. Ernst Willingshofer, Dr. Finlay Stuart, Dr. Marlies ter

Voorde and Prof. dr. Mihai Ducea, for the time and effort they spent reading this thesis and for their constructive and helpful comments.

I would also like to acknowledge the constructive input of Bernhard Fügen-schuh and Stefan Schmid on earlier versions of the chapter on the Apuseni Mountains. Fin, thank you for the helium analysis carried out at SUERC and in particular for the discussions on how to treat those low-content samples. Ernst, thank you for sharing your constructive ideas, especially on the last chapter of this thesis. Marlies, bedankt voor je hulp bij de Nederlandse samenvatting en natuurlijk voor het delen van je kamer in de allerlaatste fase van mijn proefschrift.

Het werk gepresenteerd in dit proefschrift zou niet mogelijk zijn geweest zonder de hulp van vele mensen. Fenny, dankjewel voor je hulp bij administratieve zaken en natuurlijk voor alle cappuccinos en gezelligheid. Cees, bedankt voor je bijdrage aan het verzamelen van de gesteentemonsters (oftewel, de geologische versie van “hoeveel watermeloenen passen er in een Dacia”). Roel, bedankt dat je me hebt geleerd hoe je apatieten uit gesteentemonsters kunt “toveren” en voor de geweldige sfeer in het mineraalscheidingslab. Tineke, dankjewel voor je hulp en geduld bij het prepareren van de fission track mounts en voor alle gezelligheid (en voor de soep!). Bas en Onno, dankjulliewel voor de hulp bij het meten van die moeilijke monsters en voor de vele leuke gesprekken tijdens de koffiepauzes. Verder wil ik Joaquim bedanken voor alle uitleg en hulp bij de VU-helium analyses, Richard voor de hulp in het cleanlab en Wim voor zijn hulp bij de fission track microscopen.

Furthermore, I would like to thank many people from the Earth Sciences department. Harm, Dick en Kees, bedankt voor de geologische basis die jullie gelegd hebben tijdens mijn masterprojecten. Giovanni and Tibor, thank you for your guidance during the initial phase of this project. Karen and Diana, thank you for all the nice discussions we had on the evolution of the SE Carpathians and other things. Diana, thank you also for the warm welcome in Romania during my fieldwork. Elco and Uros, many thanks you for being such great office mates the past year and for all the fun and warm coffees during that really cold winter in the “old” office. Leah and Anne, thank you for for the great fun we had the past few years when the thesis was “almost” done. Jurgen, naast alle hulp bij het inhoudelijke deel van het proefschrift, ook bedankt voor de nodige afleiding in de vorm van een borrel of een vaartochtje over de grachten. Ron, Anco en Emma, bedankt voor alle meestal spontane acties om een biertje te gaan drinken op het terras. Also thanks to the staff of the various departments, Anna, Dimitrios, Jan, John, Klaudia, Sierd, Reini, and many more. Ik wil ook graag de mensen bedanken voor de leuke tijd tijdens het geven van onderwijs of het begeleiden van veldwerken. Marlies en Fred, ik vond het leuk om met de werkgroepen wiskunde te helpen. Anne, Harry, Jan, Anco en Bernd, bedankt voor de leuke tijd in Albarracín. Frank, Anco, Ron, Bernd, Fraukje, Emma en Cedric, de Ardennen excursie was altijd weer leuk en leerzaam. Het is ontzettend leuk om te zien hoe studenten ineens geologen worden als ze hun eerste plooi ontdekt hebben. Verder wil ik een heleboel mensen bedanken voor de vele discussies en gezelligheid, op het werk of tijdens congressen, koffiepauzes en borrels: Aafke, Alex, Andreas, Andrei, Ane, Arjen, Bas, Bernd, Björn, Cedric, Daphne, David, Elodie, Els, Geert-Jan, Iuliana, Jane, Javier, Jelle, John, Laura, Maarten, Magdala, Margriet, Mark, Marten, Maud, Mirjam, Mohammed, Nico, Olli, Onno, Philip, Rongguo, Stefan,

Stefan, Suzanne, Tineke, Valentina and anyone I forgot here.

A special word of thanks to the PhD group I started this thesis with: Arnaud, Bad'r, John and Aude. We spent many hours discussing about science, but also about life, at the VU or somewhere on a terrace in Amsterdam (Tig Barra), Glasgow, Utrecht, or in Strasbourg. I have really enjoyed these discussions, especially coming from such a variety of backgrounds and personalities, and I appreciate the way they influenced my way of thinking on some aspects of work and life. Thank you for all your support, especially during some of those difficult moments.

While I was writing the last chapter of this thesis, I also worked at Elsevier. Phoebe, Friso, Robbertjan and many others, thank you for broadening my view on geology and work in general during that half year. I have really enjoyed it.

Daarnaast zijn er een heleboel mensen die indirect aan dit proefschrift hebben bijgedragen. Petra, bedankt voor al je hulp bij het verzorgen van Dimple als ik weer eens op veldwerk of congres was. Gerben en Mai, mijn huisgenoten, bedankt voor jullie interesse en natuurlijk voor alle hulp bij mijn eeuwige laptop problemen. Maarten, Judith, Syb, Karlijn, Joris, Willeke, Ralph, Saskia, Bas, Jelle, Sanne, Marinka, Sietse, Klaas, Xavier, Irene, Bart, Aaike, Hajni, Cees, en iedereen die ik hier vergeten ben: bedankt voor jullie steun en voor het zorgen voor de broodnodige afleiding tijdens de vele etentjes, biertjes op het terras, weekendjes weg, skivakanties, en natuurlijk de relaxvakanties naar Noorwegen. Een speciaal woord van dank voor de "squashmeiden" (het squashballetje zal opgelucht adem halen): Willeke, Sas, San, Karlijn en Marinka, bedankt voor jullie geduld als ik weer eens te laat was omdat ik nog "even" iets af moest maken en voor al jullie steun en belangstelling.

En als laatste wil ik mijn familie bedanken, en in het bijzonder Mam, Hanneke en Bart. Bedankt voor al jullie hulp bij dit proefschrift, maar ook voor de nodige afleiding daarbuiten, variërend van een uitgebreid etentje tot gewoon een koffie in de zon. Dankjulliewel voor jullie onvoorwaardelijke belangstelling en vertrouwen.



Start of the field campaign in 2005: being observed by buffaloes in a mud pool while looking for extensional structures in the Borod and Beius basins, Apuseni Mountains.

Samenvatting

De manier waarop convergente gebergteketens zich manifesteren kan sterk verschillen, variërend van zeer hoge bergtoppen (bijv. het Himalaya gebergte, ~ 8 km) tot veel lagere bergtoppen (bijv. de Roemeense Karpaten, ~ 2 km). Convergente gebergteketens worden gevormd door het naar elkaar toe bewegen van tektonische platen. In het geval van zogenaamde “botsingsgebergten” wordt hierbij in eerste instantie afgeschraapt korstmateriaal van de onderduikende plaat opgestapeld voor de overschuivende plaat, waarna de naar elkaar toe bewegende continentale platen op elkaar botsen. Daarbij wordt de verkorting opgevangen door sterke deformatie van het korstgesteente en “groeit” het gebergte in de hoogte.

Op basis van observaties uit de Europese Alpen wordt de vorming van deze convergente orogenen vaak verklaard met behulp van het “dubbel-vergente wig model”. Hierbij wordt aangenomen dat materiaal uit de diepe korst naar de oppervlakte komt via grootschalige diepe breuken in de overschuivende plaat, op het moment waarop continentale botsing plaatsvindt. Dit model lijkt te kloppen voor gebergteketens die zijn gevormd door snel convergerende tektonische platen (zoals de Alpen). De ontwikkeling van veel gebergteketens wordt echter gedomineerd door snel onderschuivende platen (zoals de Apennijnen, Dinariden en Karpaten). Dit type gebergte wordt vaak gekenmerkt door een aanzienlijke component van lateraal materiaal transport en een geringe topografische opbouw. Omdat de ontwikkeling van gebergten voornamelijk moet worden afgeleid via observaties aan het aardoppervlak, maakt de geringe opbouw in de hoogte het moeilijker om inzicht te krijgen in de verkortingsgeschiedenis en de wisselwerking tussen opheffing en afbraak van dit soort gebergteketens.

Bovengenoemde gebergteketens kunnen vaak niet verklaard worden met het model van de “dubbel-vergente wig”: ze laten geen sporen zien van exhumatie van diep korstmateriaal tijdens de verkorting. Exhumatie van diepere korstgesteenten komt wel voor, maar pas in een later stadium als gevolg van het tektonisch afschuiven van stukken aardkorst door extensie van het achterland (d.w.z. in de overschuivende plaat). Door het snelheidsverschil tussen het naar beneden duiken van de onderste plaat, de mantel in, en het naar elkaar toe bewegen van de tektonische platen, trekt de rand van de onderschuivende plaat zich terug (het “roll-back” mechanisme). De extensie van de overschuivende plaat vangt dit op, en

verplaatst zich steeds verder naar het voorland toe. De verkortingsstructuren en de exhumatie van gesteenten in de kern van het gebergte worden in dit geval beïnvloed door een latere fase van extensie, waardoor het reconstrueren van de verkortingsgeschiedenis bij dergelijke terugtrekkende plaatgrenzen wordt bemoeilijkt.

Het doel van dit proefschrift is om inzicht te krijgen in de thermo-tektonische ontwikkeling van een convergent gebergte dat gedomineerd wordt door een terugtrekkende onderschuivende plaat. De Karpaten en het Balkangebergte zijn een typisch voorbeeld van zo een gebergteketen met geringe topografische opbouw tijdens de langdurige verkortingsgeschiedenis van Laat Jura tot Mioceen. De huidige verschijningsvorm, waarin de Karpaten, het Balkangebergte en de verbinding met de Dinariden geïsoleerde gebergten lijken is slechts schijn; het opbreken is veroorzaakt door een latere fase van Mioceen extensie van het achterland als gevolg van een terugtrekkende plaatgrens richting het Europese voorland (van de verdunde continentale korst van het “Carpathian embayment”). Het terugtrekken van deze convergerende plaatgrens begon ongeveer 20 miljoen jaar geleden, en creëerde daarbij de boogvorm van de gebergteketen en de tussenliggende sedimentaire bekkens. In het Roemeense deel van de Karpaten vond de grootschalige rek van het Pannoonse bekken ver in het achterland plaats. Daardoor zijn op deze locatie de deformatie structuren en de exhumatie van het gebergte als gevolg van verkorting nog steeds goed zichtbaar en vormt dit gebergte een ideaal gebied om de ontwikkeling van een laaggebergte te bestuderen. De positie van de Roemeense Karpaten binnen de complexe plaattektonische configuratie van de Alpen, Karpaten en Dinariden maakt het mogelijk om ook de effecten van geodynamische processen die plaatsvinden bij nabijgelegen plaatgrenzen te bestuderen.

Thermochronologie (de bepaling van “afkoelingsouderdommen”) en de analyse van geologische structuren zijn gecombineerd, met het doel een kwantitatief inzicht te verkrijgen in de ontwikkeling van de Roemeense Karpaten. Thermochronologische data verschaffen informatie over het moment waarop gesteenten door een bepaald temperatuursbereik heen afgekoeld zijn. Het achterliggende principe is dat bepaalde radioactieve vervalproducten alleen in specifieke mineralen bewaard blijven als deze genoeg zijn afgekoeld; op dat moment begint de “radiometrische klok” te lopen. De temperatuur neemt geleidelijk toe met de diepte van de aarde ($\sim 20\text{--}40^\circ\text{C}/\text{km}$). Met behulp van enige kennis van de plaatselijke geothermische gradient in de aardkorst kunnen deze tijd-temperatuur gegevens dus vertaald worden naar de exhumatie-geschiedenis van het gebied. De twee thermochronometers die toegepast zijn in deze studie zijn de splijtingsporen- en (U-Th)/He technieken voor het mineraal apatiet (respectievelijk de AFT en AHe methoden). Deze methoden hebben een temperatuursgevoeligheid in het bereik van $\sim 120\text{--}60^\circ\text{C}$ (AFT) en $\sim 85\text{--}40^\circ\text{C}$ (AHe) en leveren ouderdommen gekoppeld aan de lage-temperatuur geschiedenis op (Hoofdstuk 2). Hiermee is het mogelijk gedetailleerde afkoelingspatronen in de bovenste kilometers van de aardkorst af te leiden voor gebieden die worden gekenmerkt door geringe exhumatie. Nieuwe data zijn geïntegreerd met gegevens van eerdere thermochronologische studies om een regionale interpretatie van afkoelings- en exhumatiepatronen mogelijk te maken.

In Hoofdstuk 3 wordt op basis van AFT, AHe en structurele data de evolutie van het Apuseni Gebergte na de botsing van de Tisza en Dacia continen-

tale blokken besproken. Het Apuseni Gebergte neemt een interne positie in ten opzichte van de huidige Karpaten en Dinaridisch-Hellenische gebergtekets. De meeste aandacht gaat uit naar de Laat Krijt–Tertiaire ontwikkeling en de effecten van convergente processen bij twee naburige plaatgrenzen (de Sava en Ceahlău-Severin zones, respectievelijk in de Dinariden en de externe Karpaten). Op basis van de gereconstrueerde exhumatiegeschiedenis lijkt de huidige topografische expressie van het Apuseni Gebergte voornamelijk gevormd te zijn in het Laat Krijt, en beïnvloed te zijn door twee tektonische fasen in het Paleogeen. De Paleogene tektonische fasen kunnen worden afgeleid op basis van perioden waarin versnelde afkoeling en verkorting langs diepe breuksystemen plaatsvond, rond ~ 45 Ma en ~ 30 Ma. De exhumatie voor beide pulsen is in de orde van $\sim 3,5$ km en vindt gelijktijdig plaats met de continentale plaatbotsing in de Dinariden en met de rotatie van Tisza-Dacia om het Moesische voorland. Er zijn geen duidelijke aanwijzingen gevonden dat de Mioceene extensie van het Pannoonse bekken en de continentale plaatbotsing in de externe Karpaten een significant effect hadden op de exhumatiegeschiedenis. Dit is opmerkelijk, omdat tot nu toe werd aangenomen dat de topografische expressie van het Apuseni Gebergte in sterk verband stond met de vorming van het Pannoonse bekken en de inversie-fase die daarop volgde.

Een combinatie van de AFT en AHe technieken is ook toegepast op de Zuidoost Karpaten (Hoofdstuk 4). Hier worden afkoelingsouderdommen jonger naar het Moesische voorland toe, en variëren van Krijt voor de interne dikke korst dekbladen tot Mioceen–Kwartair voor de externe dunne sedimentaire dekbladen. De Krijt afkoelingsgeschiedenis van het interne deel van het gebergte kan gerelateerd worden aan tektonische fasen in het Albien en Senonian als gevolg van convergentie in de Ceahlău-Severin zone. Een fase van exhumatie in het Paleogeen doet vermoeden dat ook de Zuidoost Karpaten werden beïnvloed door de rotatie van Tisza-Dacia om Moesia. De daaropvolgende midden Mioceene continentale botsing van Tisza-Dacia met het Europese voorland (Moesia) blijkt uit de vastgestelde exhumatiesnelheden in de orde van $\sim 0,8$ mm/jr. De exhumatie in de Zuidoost Karpaten verplaatste zich naar het voorland tijdens de continentale botsing, wat sterk doet vermoeden dat dit gebergte zich niet ontwikkeld heeft volgens het “dubbel-vergente wig” model. De waargenomen exhumatiesnelheden voor het midden Mioceen zijn gelijk aan die voor de Oost Karpaten. In de Zuidoost Karpaten vonden daarna echter nog twee exhumatiefasen plaats in het externe deel van het gebergte. De eerste fase vond plaats in het laat Mioceen–vroeg Pliocéen (~ 6 – 5 Ma) en werd gekenmerkt door hoge exhumatiesnelheden in de orde van $\sim 1,7$ mm/jr. Deze exhumatiefase kan worden gecorreleerd met een zeespiegeldaling in de Paratethys gedurende de “Messinian Salinity Crisis”. De jongste exhumatiefase in het Pliocéen–vroeg Kwartair (~ 3 – 2 Ma) had een ook een hoge snelheid van $\sim 1,6$ mm/jr en is het gevolg van grootschalige verkorting van de continentale korst van de onderschuivende plaat.

Om meer inzicht te krijgen in de karakteristieken van de continentale plaatbotsing, is de gedetailleerde exhumatiegeschiedenis van de Zuidoost Karpaten uiteindelijk geïntegreerd in de regionale ontwikkeling van de gehele Karpatenboog (Hoofdstuk 5). Hiervoor zijn nieuwe AHe ouderdommen van dit onderzoek gecombineerd met AFT en AHe data uit eerdere studies. De gebergteontwikkeling tijdens de botsingsfase is af te leiden van de verkregen afkoelings-, exhumatie-, en

deformatiepatronen voor de periode van het Mioceen tot het Kwartair. In dit tijdsinterval bleken de deformatie en exhumatie zich door de tijd heen voornamelijk naar het voorland te verplaatsen, doordat breuken steeds dicht bij het voorland werden geactiveerd. Op een gegeven moment vond de breukactivatie echter ook plaats in een afwijkende volgorde (“out-of-sequence”), wat een indicatie is voor het optreden van de botsing. Door de sterke koppeling tussen de platen tijdens deze botsing (“foreland-coupling collision”) werd de onderschuivende plaat hierbij sterk gedeformeerd, zoals blijkt uit de steile diepe korstbreuken en de migratie van exhumatie in de richting van het voorland.

Laterale verschillen in exhumatiepatronen tussen de Oost, Zuidoost en Zuid Karpaten lijken voornamelijk het gevolg te zijn van het grote verschil in sterkte tussen de onderschuivende voorlandplaten in deze gebieden (nl. de Europese / Scythische plaat en de Moesische plaat). In de Oost Karpaten werd de Tisza-Dacia plaat samen met de Ceahlău- en externe sedimentaire dekbladen omhooggebracht. De sterke Europese/Scythische plaat werd gedeformeerd, maar de grens tussen Tisza-Dacia en de Europese plaat (de Ceahlău zone) bleef het voornaamste subductie contact. In de Zuidoost en Zuid Karpaten werd Miocene exhumatie alleen waargenomen in de externe dekbladen die dichtbij het voorland liggen. De overschuivende Tisza-Dacia plaat was in het Krijt al over het Danubische deel van de zwakke Moesische plaat geschoven. Het onderschuiven van de plaat tijdens het Mioceen vond plaats in een positie dicht naar het voorland toe, omdat het makkelijker was om de relatief zwakkere Moesische plaat “intern” te deformeren.

Hoofdstuk 6 geeft een overzicht van alle thermochronologische data die beschikbaar zijn voor de Roemeense Karpaten. De gegevens gepresenteerd in hoofdstukken 3 tot en met 5 en data uit eerdere publicaties zijn samengebracht in regionale thermochronologische ouderdomskaarten voor de zircon (met een temperatuursgevoeligheid van $\sim 230^\circ\text{C}$) en apatiet splijtingsporen methoden en voor de AHe methodiek. Dit hoofdstuk illustreert de ontwikkeling van de Roemeense Karpaten in zes tijdstappen van het Laat Krijt tot het Kwartair met exhumatie / begravingskaarten en dwarsdoorsneden. Deze regionale kaarten laten de grootschalige kinematische patronen zien in relatie tot de evolutie van de verschillende convergente plaatgrenzen. De resultaten benadrukken dat de effecten van processen die plaatsvinden bij deze naburige plaatgrenzen een grote rol kunnen spelen in de ontwikkeling van een complex gebied zoals de Roemeense Karpaten. Verder wordt er ingegaan op de link tussen de huidige topografische expressie en de jongst-waargenomen exhumatie fase. Deze analyse doet vermoeden dat een deel van de topografische expressie van de Roemeense Karpaten uit het Laat Krijt–Paleogeen stamt (het Apuseni Gebergte, de Zuid Karpaten en het interne deel van de Zuidoost Karpaten), in tegenstelling tot eerdere interpretaties die postuleerden dat deze gebieden sterk werden beïnvloed door de Miocene botsing in de externe Karpatenboog. Grootschalige Miocene exhumatie beperkte zich tot de Oost en Zuidoost Karpaten. De daaropvolgende Pliocene–Kwartaire exhumatie episoden in het externe deel van de Zuidoost Karpaten hebben een sterke correlatie met de huidige topografische expressie van dit deel van het gebergte.

Summary

Convergent orogens can reveal topographic expressions varying from high and wide, such as the Himalayas (~ 8 km), to much lower expressions, such as the Romanian Carpathians (~ 2 km). In the case of collisional mountain belts, the orogenic evolution is characterized by initial accretion of crustal material during subduction of a lower (oceanic) plate, followed by collision of the continental parts of the converging plates. Hereby, shortening is accommodated by strong deformation of crustal material, resulting in the build-up of an orogen.

Based on observations from the European Alps, it has been suggested that many convergent orogens can be explained by the double-vergent wedge model. This model postulates that deeper crustal levels are gradually brought to the surface by orogenic shortening, where major exhumation is associated with crustal-scale backthrusting (i.e. retro-shears) exposing large metamorphic complexes at the surface. Although this model seems to be valid for high-convergence orogens (e.g. the Alps), it seems that a large number of subduction-dominated orogens do not exhume deep crustal levels during shortening (e.g. the Apennines, Dinarides and Carpathians). For the latter type of orogen, it is more difficult to derive and quantify detailed constraints on their shortening-related kinematic evolution. Exhumation pathways are difficult to assess due to lateral transport inside the orogen and topographic build-up is generally low. Exhumation of deeper crustal levels does occur, but rather during subsequent detachments and core-complex formation as a result of back-arc extension, which is trying to accommodate the difference between subduction and convergence velocities. Due to a foreland-ward migration of this extension as a result of slab roll-back, shortening-related deformation and exhumation of the metamorphic core are largely overprinted. This extensional overprint generally obscures the regional contractional evolution that takes place at such retreating plate boundaries.

This thesis focuses on the thermo-tectonic evolution of a subduction-dominated orogen: the Romanian segment of the Carpathians. The Carpatho-Balkan orogen is a typical example of a mountain belt which failed to significantly grow upwards during the long lasting Late Jurassic–Miocene contractional evolution. The present-day appearance of the Carpathians, Balkans and their Dinaridic connection as separate orogens is just apparent; it is the result of a superposed Miocene roll-back and associated back-arc evolution that created the arcuate shape of

the orogen and the intervening sedimentary basins from ~ 20 Ma onwards. In the Romanian Carpathians, the large-scale extensional collapse of the Pannonian back-arc domain took place far away in the hinterland, and thus did not overprint shortening-related deformation and exhumation in the metamorphic core. Thus, the Romanian Carpathians are in an ideal position to study the evolution of an orogen characterised by low amounts of shortening-related exhumation. Additionally, the position of the Romanian Carpathians in the complex plate tectonic configuration of the Alps-Carpathians-Dinarides realm suggests that their evolution may have been affected by geodynamic processes taking place at adjacent plate boundaries.

Low-temperature thermochronology and structural analysis have been combined in order to derive quantitative constraints on the thermo-tectonic evolution of the Romanian Carpathians. Thermochronological data record the time at which rocks cooled through a specific temperature window. The underlying principle is based on the interplay between the accumulation of a radioactive decay product in a specific mineral, and the thermally activated removal of that decay product. Since temperature increases with depth below the Earth's surface, the data can be translated into exhumation (i.e. the unroofing history of a rock relative to the Earth's surface as a result of denudation processes) with some knowledge of the subsurface geothermal gradient. Exhumation of a rock sample or region can, for example, reflect enhanced erosional denudation resulting from tectonically induced uplift by crustal thickening. Thermochronological data may thus provide important insights into the kinematic evolution of convergent orogens. The two thermochronometers that have been applied in this study are the apatite fission track (AFT) and (U-Th)/He (AHe) thermochronometers. These methods have temperature sensitivities of $\sim 120\text{--}60^\circ\text{C}$ and $\sim 85\text{--}40^\circ\text{C}$, respectively, and allow the derivation of detailed cooling patterns in the upper few kilometres of the Earth's crust. This makes them suitable to study regions characterised by low amounts of exhumation. New thermochronological data were combined with data from previous studies for a more regional interpretation of cooling and exhumation patterns.

The late stage evolution of the Apuseni Mountains following the collision between the Tisza and Dacia continental blocks is assessed based on AFT and AHe thermochronology and structural analysis (Chapter 3). The Apuseni Mountains form an internal mountain belt with respect to the present-day Carpathian and Dinaridic-Hellenic belts. Main focus of this Chapter is their latest Cretaceous–Tertiary post-collisional evolution and the effects of convergence at two adjacent plate margins (the Sava and Ceahlău-Severin zones in the Dinarides and external Carpathians, respectively). The relationship between syn- to post-collisional orogenic shortening and stresses transmitted from other neighbouring plate boundaries is important for understanding the kinematics of mountain belts, but has received little attention so far. The exhumation history derived from AFT and AHe thermochronology indicates that the present-day topography of the Apuseni Mountains originates mainly from latest Cretaceous times, modified by tectonic pulses during the Paleogene. The latter are suggested by cooling ages clustering around ~ 45 Ma and ~ 30 Ma and the associated shortening recorded along deep-seated fault systems. Paleogene exhumation pulses are similar in magnitude

(~ 3.5 km) and are coeval with the final collisional phases recorded in the Dinarides and with the Carpathian rotation around the Moesian promontory. These newly quantified Paleogene exhumation pulses contradict the general view of tectonic quiescence, subsidence and overall sedimentation. The Miocene collapse of the Pannonian basin did not induce significant regional exhumation along the western Apuseni flank, neither did the subsequent Carpathian collision. This is surprising in the overall context of Pannonian basin formation and its subsequent inversion, in which the Apuseni Mountains were previously interpreted to be uplifted in both deformation stages.

In Chapter 4, AFT and AHe thermochronology have been combined to derive a detailed exhumation history for the SE Carpathians. Cooling ages generally decrease from Cretaceous for the internal basement nappes, to Miocene–Quaternary for the external sedimentary wedge. Cretaceous cooling is related to the intra-Albian and intra-Senonian tectonic events, which resulted from convergence and closure of the Ceahlău-Severin Ocean. The AFT and AHe data show a Paleogene cluster of cooling ages, confirming a suspected but never demonstrated tectonic event, which may be related to subduction retreat and the rotation of the Tisza-Dacia block into the so-called “Carpathian embayment”. The new data furthermore suggest that the SE Carpathians have been affected by a middle Miocene exhumation phase related to continental collision of Tisza-Dacia with the European foreland, which occurred at a rate of ~ 0.8 mm/yr. This rate is similar to the one previously inferred for the East Carpathians. The SE Carpathian tectonic evolution, however, is overprinted by two younger exhumation events in the Pliocene–Pleistocene. The first exhumation phase (latest Miocene–early Pliocene) occurred at high exhumation rates (~ 1.7 mm/yr), and is associated with a sea-level drop in the Paratethys basins during the Messinian low-stand. The youngest recorded tectonic phase suggests rapid Pleistocene exhumation (~ 1.6 mm/yr) and is interpreted to represent crustal-scale shortening different in mechanics from collisional processes. The data suggest that the SE Carpathians did not develop as a typical double-vergent orogenic wedge; instead, exhumation was related to a foreland-vergent sequence of nappe stacking during collision and was subsequently followed by a large out-of-sequence shortening event truncating the already locked collisional boundary.

In Chapter 5, the detailed exhumation history of the SE Carpathians is integrated into the general evolution of the Romanian Carpathians in order to assess the collisional characteristics of the low-topography Carpathian orogen. New AHe data of the East and South Carpathians are combined with previously published AFT and AHe data of the East, SE and South Carpathians. The construction of three cross-sections and derivation of Miocene to present-day exhumation estimates for these sections illustrates the style of the orogenic evolution across section. Thermochronological data show that timing of deformation is generally younger towards the foreland, but out-of-sequence deformation also occurred and is indicative for collisional stages. The lower orogenic plate was strongly involved into the collisional kinematics, as indicated by deep-seated basement thrusting along faults inclined at higher angles than the subduction zone. Near the surface, this is expressed by wide antiforms in the upper plate and the thin-skinned orogenic wedge. The overall foreland-ward migration of exhumation is diagnostic for

this type of orogenic mechanics.

Collisional exhumation patterns in the Carpathians also demonstrate significant differences along the orogenic strike, related to the strength contrast between the two major units that compose the Carpathian lower plate. In the mechanically strong European/Scythian domain, the Tisza-Dacia basement was stacked and exhumed together with the Ceahlău unit and the nappes of the external thrust belt during their Miocene emplacement. The European/Scythian lower plate was deformed, but the major subduction boundary remained at the contact between Tisza-Dacia and the European/Scythian plate (i.e. ~the Ceahlău zone). This situation changes laterally in the SE and South Carpathians, where Miocene exhumation is restricted to a more foreland-ward position (the Ceahlău unit and the external thrust belt). This lateral change in exhumation patterns indicates that in the SE and South Carpathians, the upper Tisza-Dacia plate was already accreted to the Danubian part of mechanically weaker Moesia (in the lower plate) at the end of the Cretaceous. The presence of an intermediate Danubian block in the SE Carpathians implies a shift from the Ceahlău-Severin subduction zone to mainly continental subduction of the distal parts of the foreland platform, grouped under the generic term of “Carpathian embayment”.

Chapter 6 provides an overview of all thermochronological data available for the Romanian Carpathians. The data presented in Chapters 3 through 5 and data from previous publications are shown on regional thermochronological age maps for the zircon (with a temperature sensitivity of $\sim 230^\circ\text{C}$) and apatite fission track, and AHe thermochronometers. Exhumation and burial maps and cross-sections are reconstructed for six different thermo-tectonic time-slices from the latest Cretaceous to present-day. These regional exhumation maps allow identification of both large-wavelength kinematic patterns driven by regional processes, but also short-wavelength geometries driven, for instance, by local faults. Integration of regional geometries at the scale of an entire orogen is the key to understanding the mechanics of subduction and collision. The maps highlight the importance of considering the evolution of adjacent convergent plate boundaries, which may play a major role in a complex area such as the Romanian Carpathians. Furthermore, the link between the present-day topographic expression and the last-recorded exhumation phase is addressed. This analysis suggests that the topographic expression of the Apuseni Mountains, South Carpathians and the internal part of the SE Carpathians is largely of latest Cretaceous–Paleogene age, in contrast to previous interpretations which postulated that these areas were strongly influenced by the Miocene collision in the external Carpathians. Widespread Miocene exhumation is limited to the East Carpathians and the external part of the SE Carpathians. The subsequent Pliocene–Quaternary exhumation episodes in the external part of the SE Carpathians have a strong correlation with the present-day topographic expression of this part of the mountain belt.