

## ACKNOWLEDGEMENTS

Completing this thesis would have been hard, if not impossible, without the support of many. I would like to thank all of them for their different way of support in –slowly, but surely- getting my thesis to the printer. I would like to mention several persons more specific, fully aware of inevitably forgetting someone...

My promotor, Sierd Cloetingh, receives all credits for creating the right boundary conditions to successfully finish an intriguing PhD project on neo-tectonics. The department of Tectonics and the international environment through co-operation always were extremely inspiring. Sierd, thank you for your continuous belief in me finishing this project!

Thanks are due to the members of the reading committee that spent their precious time in improving my draft. Dr. Kees Biermann (Vrije Universiteit), Dr. Gerardo de Vicente (Universidad Complutense Madrid), Prof. Seth Stein (University of Stanford), Dr. Fred Beekman (Vrije Universiteit) and Prof. Ramon Vegas (Universidad Complutense Madrid) are kindly thanked for their effort. A special word in this respect to Prof. Peter Ziegler (University of Basel): your detailed remarks were highly appreciated! Dr. David Coblenz is acknowledged for kindly sharing his code for potential energy calculations. Dr. Gerardo de Vicente and Dr. Alfonso Muñoz Martín are thanked for our joint work on the neo-tectonics of central Iberia. Without them, this project would have been only half as exciting and efficient!

With regard to daily guidance I would like to mention a few people that were always helpful in discussions or any science related problem: Fred Beekman (thesis number 25 in which he is addressed in this way?!), Marlies ter Voorde (always there to make sense of the things I put on paper!), Kees Biermann, Anco Lankreijer. Prof. Peter Ziegler is thanked for a few very fruitful 'dentist visits'.

Fred Beekman and Matthias Gölke are thanked for our joint struggle in modelling faults in 3D in ANSYS. Gábor Bada is thanked for working together on science, and having a lot of fun in the mean time (the turning-the-chair record is still in my hands!). Köszönöm, Judit as well!. Both Gábor and my former roommate Ernst Willingshofer are thanked for our joint effort in trying to understand 'extensional collapse'. Ernst is especially acknowledged, and not only for his patience in answering the phone for me over and over again. I deeply admire how he kept the good spirit alive even in less fortunate periods over the last years. Ernst, Antoinette, Carmen and Robin: all the best in the years to come!

The members of the 'Iberia-project': Gert-Jan Weltje, Marlies ter Voorde, Wout Nijman (thanks for your enthusiasm and endurance in the field!) and Karen de Bruijne. With Karen (Catharina la Bruja), the contact was intense and very nice ('vino blanco muy, muy seco') during our joint field campaigns. It worked out pretty well together! I was privileged to work on a project that included numerous stays and fieldworks in Spain. Gracias a la gente de los pueblos en los que trabajamos Cogolludo, Ponferrada, San Vicente de la Barquera ...¡Volveré algún día!

¡De Madrid al cielo! Gracias al grupo tectónico de la Universidad Complutense de Madrid. Gerardo, Alfonso (Poncho, ¡Aupa Atleti!), Miguel, Geles, Jorge ("Ghello Dutch people!"), Silvia, Pilar (gracias por la hospitalidad), Raul, Carmen & Carmelita, Meaza. Sin vosotros nunca hubieran sido tan interesantes mis visitas a Madrid. Agredezco a Jorge, Miguel, Gerardo, Jose Pedro Calvo y Jose Manuel Casado el haberme dejado disfrutar de su extenso conocimiento de la geología de España central. Además quiero dar las gracias a Miguel por el muy agradable trabajo de campo en Asturias (¿Beberemos otra sidra?).

I would like to thank Harm Rondeel, Kees Biermann and Anne Fortuin for offering me the opportunity to assist the first year fieldwork in Spain (4 times!). All of the students: thank you for the nice days in the field. All of the assistants are thanked for the fine nights and the short holiday

breaks to the Embalse de Camarillas, the playa San Juan or Vilajoyosa. A special word of thank to Frank & Karen (Fuente Alamo, 1996), Thijs ('sepia frita?') (Hellin, 1997), Fred ('beef special') (Jumilla, 1998), Bart ('Mercatorplein scoort!'), Ron and Margo (1999). And, por supuesto, Pepe and family from Meson El Alamo!

The entire ancient and new E1 corridor (now 'expanded' to C2), with a special word to Marlies, Reini, Luis (Lucho), Harry, Tore ('What's that in English? Well, you know what I mean'), Taco, Matthias (witbiertje), JD, Gerco (Vissen Is Plezant), Jorge (¡Gracias! Pude practicar mi 'español'), Stephanie, Jeroen, Sevgi, several generations of NSG-students, Kaptein Dick (& Nora) and the many foreign guests. Anco ('biertje?') is thanked for his support in many ways.

There are several 'groups' of people that regularly brought some distraction in life: VUCK (Vrije Universiteit Colleague Kartclub) for some extra speed, de Ouwe Manne (indoor soccer, late night) for some fresh injuries, de Tour-directie for the biggest mental exercises and nervous afternoons in July, een 'potje' (binnen of in het Vondelpark). Andor ('Hot Lips'), Erwin, Guido, Remke, Frank, Elmer, Ron ('potje biljarten?'), Yvette, Jurgen. The Geoscoop editors, especially Michel (stay angry!), Marleen and Kees. Ceciel, thank you for your advice and tips on (not!) working with computers! GeoVUsie, thanks for all of the nice events. Donderdorst, Elfkroegentocht, VIP4life, whatever! Laurens en Aline (de Baarsjes express), Anouk ('zeg, eh, ben jij op de fiets?'), and everyone else!

Studenten, medewerkers, Onderwijsvoorlichting, Jaap, Herman, Mascha, Saskia, iedereen, die van mijn nieuwe werk een superbaan maakt.

Life outside the faculty was –like it should be– more than worthwhile! Thanks to the frequent (or less frequent) dinners, evenings (nights, or days) playing games, exciting trips, just drinking, or celebrating whatever: Anne & Sander ('portje kir?'), Ilya & Daan, Mirja & Marcel, Malika & Joost, Bart & Christine, Elien & Jef (oliebollen!). Erin and Daphne, thanks for holding on inviting me over for diner! Anouk (Rein & Toke), Erik & Li, Matthijs!

AV Sagitta (Olympiaplein), Phanos nowadays (in the Olympic Stadium), for the physical exercise on the runway track and Rayan for his help on getting me back on track (and behind the computer!!).

Ali & Gerard, Hanneke & Serge, Marjolijn & Hugo: dank voor de gezellige weekendjes in Zeeland, etentjes in Amersfoort, Gouda en picknicks in de parken van Amsterdam-West.

Mijn ouders, Bernice & Gijsbert en Celedonio, voor wie ik ben geworden! Bernice: bedankt voor je vakkundige hulp bij het maken van het boekje!

En Annemieke, gelukkig kunnen we over mijn huidige werk wel praten.... Wat zouden we ook weer allemaal doen 'na mijn promotie'? Zou het nóg leuker kunnen worden samen?

## SUMMARY

This thesis contains the results of the four years of research I carried out at the department of Structural geology/Tectonics of the Faculty of Earth Sciences at the Vrije Universiteit Amsterdam. The research forms part of the multi-disciplinary NWO program “Interplay of tectonic and surface processes: vertical and horizontal motions in the Iberian Peninsula”. The four components within this program are focusing on different aspects of this theme: (a) vertical motions using fission track analysis, (b) landscape evolution, (c) coupled erosion-sedimentation modelling in 3D and (d) tectonic modelling combined with structural geological fieldwork. The Iberian Peninsula (Portugal and Spain) has been chosen for this study because of the vast amount of available data, perfect outcrop conditions and interesting tectonic setting during the Cenozoic. The component that is described in this thesis, entitled “Cenozoic tectonic evolution of the Iberian Peninsula: causes and effects of changing stress fields” forms the tectonic/structural geological framework for the other components. As is evident from the title of this thesis, the several topics that will be addressed are: the Cenozoic tectonic evolution of the Iberian Peninsula, the effects of changing stress fields (deformation as detected by field observations) and the causes of these changes in stress field.

Many regional studies have been published about the Cenozoic geology of the Iberian Peninsula. A detailed outline of the geological evolution of the entire Peninsula, however, was not yet available. Therefore, this thesis presents a compilation of the available data for the reconstruction of the tectonic evolution of the Iberian Peninsula and the western Mediterranean. Because the present-day setting of the Iberian Peninsula was essentially structured by reactivation of inherited crustal features during Tertiary times, this reconstruction has been made for the period of 65 Ma until present-day. This compilation shows low temporal and/or spatial resolution of data concerning the tectonics and the (paleo)stress field for some regions in the Iberian Peninsula. Several of these voids in knowledge have been addressed by carrying out combined structural and sedimentological fieldwork to provide new constraints on the stress field evolution. The results of these regional studies have been incorporated in the reconstruction of the entire Peninsula and will be presented in this thesis. In this way, my research provided the other components of the NWO program with information on the temporal and spatial development of the stress field and activity of larger scale tectonic features.

Based on the paleo-geological reconstruction, finite element models of the Iberian Peninsula have been constructed for several time slices during the Tertiary in order to predict the stress field of that time and test different hypotheses on activity along the plate boundaries. Both the geometry and the boundary conditions have been derived directly from the paleo-geological reconstruction. The present-day situation provides the best constraints on plate (boundary) geometry, relative motion of the different plates (Africa, Eurasia) and tectonic activity deduced from seismicity. But even for this case, some of the parameters used in the modelling are a matter of debate, such as for example, the exact location of the plate boundary between Africa and the Iberian Peninsula. However, if for the present-day stress field an acceptable regional result can be obtained, then this would provide more confidence in the results obtained for periods for which the constraints are less well documented.

The first order numerical modelling of the present-day stress field in the Iberian Peninsula and surrounding regions uses a finite-element model of a 100km thick lithosphere with forces applied to the borders. Since it has been shown that the effect of lateral density variations (e.g. continental crust next to air in the case of a mountain range) upon the stress field is significant, this effect has been incorporated subsequently. This approach for the reconstruction of Tertiary stress fields requires a first-order estimate of paleotopography. In this way, the other components of this NWO-program dealing with vertical motions offered feedback to the tectonic modelling.

Chapter 1 is a brief introduction to the general geological evolution of the Iberian Peninsula and the western Mediterranean region.

Chapter 2 offers an introduction to theoretical backgrounds of basic concepts used in the research such as (origin of) stresses in the Earth's crust, deformation, stress inversion techniques, finite element modelling, and the concept of stress induced by lateral density variations. Extra attention will be paid to the latter concept, and the chapter contains results of sensitivity tests I performed on several basic assumptions.

Chapter 3 presents structural geological data that has been gathered to fill some gaps in knowledge about the tectonic evolution of Iberia in time and space. New data is presented on the tectonic activity of the Spanish Central System during the Paleogene and for the NW of the Peninsula (Bierzo Basin and Asturian coast).

In Chapter 4, a compilation is presented of the available data on the tectonic and geologic evolution of the Iberian Peninsula during the Paleogene (65-23Ma). Included are the stress field, active deformation structures, (first-order estimates on) paleotopography and sedimentary environments. This combination of data is presented in maps depicting different time-intervals, accompanied by a reference text.

Chapter 5 is similar in configuration to Chapter 4, but dealing with the Neogene to present-day reconstruction (23-0Ma).

Chapter 6 presents the results of numerical models on the evolution of the stress field in the Iberian Peninsula during the Cenozoic. For time slices for which stress field and paleotopography could be derived with enough confidence, model geometry and boundary conditions have been derived from the reconstructions in Chapter 4 and 5. The concept of stresses induced by lateral density variations is included in the modelling.

The final chapter, Chapter 7, forms a synthesis and discusses the constraints this study provides for the tectonic evolution of the Iberian Peninsula, the implications of the model results, and possible future directions for research on this topic.

## SAMENVATTING (SUMMARY IN DUTCH)

Mijn onderzoek heeft zich gericht op de oorzaken en gevolgen van spanningen in de aardkorst. In grote lijnen is bekend dat de oorzaken van deze spanningen gezocht moeten worden in de *platentektoniek*. De korst van de aarde bestaat uit verschillende 'scherven' (*platen*) die bewegen ten opzichte van elkaar. Op bepaalde plekken is die beweging uit elkaar (*mid oceanische ruggen*) en onvermijdelijk (ervan uitgaande dat de Aarde niet groter wordt) op andere plekken naar elkaar toe (*subductie zones* of *gebergten*). Als gevolg van krachten die samenhangen met botsing, langs elkaar bewegen of uit elkaar drijven van de platen ontstaan er spanningen in de korst. Afhankelijk van welke processen actief zijn langs de plaatranden van een bepaalde plaat, kan het spanningsveld binnen de plaat ingewikkelde tussenvormen van *compressie* (druk) en *tensie* (rek) vertonen. Zwaktezones die in de korst voorkomen, kunnen door deze spanningen in beweging komen. Dat gaat niet geleidelijk, maar met schokken (aardbevingen). Om een beter begrip te krijgen van de relatie tussen spanningen en breukbeweging is het dus erg belangrijk te weten wat voor spanningsveld in de bestudeerde plaat aanwezig is.

Het gebied waarin het onderzoek is uitgevoerd is het Iberische Schiereiland (Spanje en Portugal). Dit gebied is onder andere geselecteerd omdat hier al veel waarnemingen van het spanningsveld beschikbaar waren. Daarbij komt dat bekend was dat er een opeenvolging van verschillende fases van vervorming heeft plaatsgevonden in de 'jonge' geologische ontwikkeling van het Iberisch Schiereiland.

Vanaf ongeveer de Krijt – Tertiair grens (65 miljoen jaar geleden) botste noord 'Iberië' met 'Europa' (compressie, waardoor de Pyreneeën zich vormden). Kort daarna begon aan de oostkant van Iberië de opening van de Middellandse Zee (rek). Vervolgens begon Afrika naar het noorden te bewegen en zorgde voor botsing aan de zuidkant van Iberië (Sierra Nevada) met Noord Afrika (Atlas gebergten). Tijdens de hele geschiedenis opende in het westen de Atlantische Oceaan zich. In het eerste hoofdstuk wordt een algemeen beeld gegeven van deze ontwikkeling. Omdat het gebied in geologisch korte tijd beïnvloed is door deze wisselende bronnen van spanning langs de plaatranden, is dit gebied zeer geschikt om de effecten hiervan op het spanningsveld te bestuderen. In het eerste hoofdstuk zal aandacht geschonken worden aan de grote lijnen van de geologische ontwikkeling van Iberië.

In Hoofdstuk 2 worden de verschillende methoden en technieken die gebruikt zijn bij deze studie kort toegelicht. Daarbij wordt ingegaan op de eindige elementen methode, de paleo-spannings methode en het effect dat verschillen in korstdikte heeft op het spanningsveld in de aardkorst. De Aarde streeft naar evenwicht: bij een verdikte korst zal rek, in de afwezigheid van andere krachten op de plaat, zorgen voor verdunning. En andersom. Bij dit concept zal langer worden stil gestaan en op een aantal fundamentele punten van de theorie worden ingegaan die tot nog toe niet onderzocht waren.

Uit een uitvoerige literatuur studie bleek dat van een aantal gebieden of bepaalde periodes in tijd, de gegevens over het toendertijd heersende spanningsveld summier waren of ontbraken. Om deze aan te vullen en een vollediger reconstructie mogelijk te maken, zijn extra gegevens verzameld. In Hoofdstuk 3 wordt uitgebreid ingegaan op de nieuwe gegevens en de gebieden waar die zijn verzameld. Daarbij ligt de nadruk op het

NE deel van het Spaanse Centraal Systeem en het noordwesten van Spanje (de Bierzo-regio en de kust van Asturië).

De literatuurstudie, aangevuld met de nieuwe gegevens, leverde een nauwkeurige studie op van de geologische ontwikkeling van het Iberische Schiereiland en de omliggende westelijke Mediterrane regio. Daartoe heb ik per tijdstap van 3 miljoen jaar kaarten gemaakt waarin alle beschikbare data uit literatuur en eigen studie zijn samengevoegd. Gegevens zijn gecombineerd uit verschillende vakgebieden van de aardwetenschappen: structurele geologie voor de actieve breuken en plooien en de paleo-spanningsdata, sedimentaire geologie om te bepalen in welke gebieden erosie of sedimentatie plaatsvond en in wat voor omgeving (ondiepe zee, strand, rivier op het land, diep zee), isotopen geologie om aan de hand van splijtsporen te bepalen welke gebieden actief omhoog kwamen. Al deze gegevens zijn gebruikt om per tijdseenheid te kunnen reconstrueren hoe de spanningen in de aardkorst in Iberië in de geologische tijd gevarieerd hebben. Bij deze reconstructies hoorde ook het per tijdseenheid bepalen welke structuren de plaatranden van Iberië vormden en welke activiteit daarlangs waarschijnlijk is geweest. In hoofdstuk 4 en 5 worden deze reconstructies gepresenteerd in 15 kaarten en met tekst uitvoerig toegelicht. Hoofdstuk 4 gaat daarbij in op de ontwikkeling tijdens het Paleogeen (65-23 miljoen jaar geleden), terwijl hoofdstuk 5 zich richt op het Neogeen en het Kwartair, de afgelopen 23 miljoen jaar. Dit geheel is een zeer uitgebreide bron van referenties voor verdere studies in het Iberische Schiereiland en omgeving.

Vervolgens zijn computer modellen gebouwd op basis van de reconstructies. Met deze modellen zijn de resulterende spanningsvelden berekend als gevolg van de aangenomen randvoorwaarden. Hoofdstuk 6 geeft een overzicht van de resultaten van de modelleringen, die vergeleken worden met het gereconstrueerde spanningsveld. Hieruit bleek dat het goed mogelijk is de orientatie van het spanningsveld te modelleren, maar dat de resulterende spanningsvelden te uniform zijn als ze vergeleken werden met waarnemingen (overal evenveel compressie, bijvoorbeeld). Gebruik van deze resultaten zou leiden tot verkeerde conclusies over activiteit van breuken.

Op deze manier kan ook nieuwe inzichten in de plaattektoniek van een bepaalde periode verschaffen. Waarnemingen van een spanningsveld in de vroegere geschiedenis van een plaat kunnen inzicht geven in de activiteit van de plaatranden of de gereconstrueerde geometrie.

Nieuw in dit onderzoek is het bestuderen van het effect dat variatie in korstdikte heeft op het spanningsveld. Als dit effect van (korst)topografie wordt meegenomen, komt het gemodelleerde spanningsveld een stuk beter overeen met de waarnemingen. Dit concept zou dan ook moeten worden toegepast in studies van spanningsvelden in de aardkorst.

In het zevende en laatste hoofdstuk worden conclusies getrokken uit de vergelijking van waarnemingen en resultaten van de modellering. De conclusies zullen vervolgens in een ruimer perspectief behandeld worden.



Figure 1.1  
 Overview of the Iberian Peninsula and western Mediterranean with the names of basins, major faults and regions that are used in the description of the geological evolution of the area (see [www.geo.vu.nl/~andb/iberia](http://www.geo.vu.nl/~andb/iberia) for full color version).

