ETH zürich

ETH Library

Topography in passive margins: a case study across the southern Peninsular Indian escarpment using geomorphological analyses, cosmogenic nuclides and low-temperature thermochronometry

Doctoral Thesis

Author(s):
Mandal, Sanjay K.

Publication date:
2016

Permanent link:
https://doi.org/https://doi.org/10.3929/ethz-a-010608217

Rights / license:
In Copyright - Non-Commercial Use Permitted

This page was generated automatically upon download from the ETH Zurich Research Collection.
For more information, please consult the Terms of use.

DISS. ETH NO. 22895

TOPOGRAPHY IN PASSIVE MARGINS: A CASE STUDY ACROSS THE SOUTHERN PENINSULAR INDIAN ESCARPMENT USING GEOMORPHOLOGICAL ANALYSES, COSMOGENIC NUCLIDES AND LOW-TEMPERATURE THERMOCHRONOMETRY

A thesis submitted to attain the degree of

DOCTOR OF SCIENCES of ETH ZURICH

(Dr. sc. ETH Zurich)

presented by

SANJAY KUMAR MANDAL

MSc in Applied Geology, Indian Institute of Technology Roorkee

born on *08.07.1984*

citizen of
India

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Jean–Pierre Burg, ETH Zurich, Switzerland (examiner)
Prof. Dr. Sean D. Willett, ETH Zurich, Switzerland (co-examiner)
Prof. Dr. Paul Bishop, University of Glasgow, UK (co-examiner)

2016

Abstract

Landscapes in passive continental margins occupy a large part of the Earth's surface but their evolution remains under-studied, providing a central motivation of this thesis. Despite its antiquity and location on a passive continental margin, the present-day elevated topography of the southern Peninsular India's Western Ghat Mountains has raised important questions concerning the long-term mechanism of topographic evolution. I use a combination of topographic analyses based on digital elevation model data, catchment-averaged and local erosion rates quantified from ^{10}Be concentrations in river sands and bedrocks, and low-temperature thermochronometry, in particular apatite (U-Th-Sm)/He with inverse t-T history simulations. Specifically, I investigate (1) the magnitude and distribution of millennial-scale erosion rates across the southern Peninsular Indian escarpment, (2) the main controls on landscape erosion in southern Peninsular India, (3) timing and magnitude of late-stage rock cooling across the escarpment, (4) impacts of Mesozoic extensional tectonics on the landscape, (5) river networks on the regional scale.

The first part of this thesis consists of quantification of millennial-scale landscape erosion rates at an unprecedented aerial coverage. Catchment-averaged erosion rates vary from 9.6 ± 0.8 m Ma^{-1} in the inland plateau to 114.3 ± 25.4 m Ma^{-1} on the western escarpment side. Bedrock erosion rates range from 2.4 ± 0.2 m Ma^{-1} in the ridge-top to 143.4 ± 2.4 m Ma^{-1} in active channel beds of the inland plateau. Catchment-averaged erosion rates derived from the across-escarpment, westward-draining catchments are significantly higher than those derived from the eastward-draining, over highland catchments. This marked difference suggests that long-term down-wearing of the highland proceeds at lower rates than in the escarpment zones. The relationship among topography, climate, and erosion is accomplished through the establishment of regional millennial-scale erosion pattern and topographic, rainfall, and vegetation analyses. Catchment-averaged erosion rates reveal moderate correlation with mean hillslope angles and local relief whereas they reveal strong correlation with channel steepness, demonstrating that topographic steepness is the major control on the spatial variability of erosion rates. The strong rainfall gradient plays a minor role in this area. ^{10}Be-derived averaged erosion rates in highlands are consistent with long-term erosion rates previously estimated from apatite fission track (AFT) thermochronometry. These results collectively point to large-scale steady-state topography, only decaying slowly with time. Steady state likely reflects the balance between erosion and isostatically driven uplift of the southern Peninsular India. The second part of this thesis documents the analysis of apatite (U-Th-Sm)/He (AHe) ages of basement samples. The new AHe ages range from 38.1 ± 6.8 to 364.2 ± 44.6 Ma: they are younger than 50 Ma in the Palghat Gap region and older than 200 Ma in the interior of the Deccan Plateau. Thermal history modeling based on AHe data indicates enhanced bedrock cooling and exhumation in the interior of the Deccan Plateau by Permian-Triassic times, followed by gradual cooling to the present. The old (>200 Ma) AHe age distribution over the >2600 m high Nilgiri Plateau indicates very slow rate of long-term erosion/exhumation during the last ∼400 Ma, which is consistent with the lowest millennial-scale erosion rates measured by ^{10}Be anywhere in southern Peninsular India. This result serves as a cautionary reminder of the dangers of attempting to infer tectonics from topography without additional supportive evidence. The AHe data indicate no more than 1-1.5 km of crustal unroofing along the western coastal strip. The final section of this thesis presents the quantitative assessment of the river profile analysis and links the characteristics of the drainage basins and channel length profiles with fluvial knickpoints as marker of transient landscape evolution. The

spatial variations in catchment morphometry is interpreted as a dynamic response to complex interactions and feedbacks between relict post-orogenic topography along and across the escarpment margins and vigorous drainage piracy in more recent times.

Zusammenfassung

Landschaften, die entlang von passiven Kontinentalrändern geformt wurden, umfassen grosse Teile der Erde, aber ihre Entstehung und Entwicklung sind bisher wenig untersucht, was der hauptsächliche Beweggrund dieser Doktorarbeit ist. Trotz des hohen Alters und der Lage an einem passiven Kontinentalrand hat die heutige erhöhte Topographie der Westghat Berge auf der südlichen Indischen Halbinsel wichtige Fragen, betreffend der langfristigen Mechanismen der topographischen Entstehung und Entwicklung, aufgeworfen. Ich benutze eine Kombination von topographischen Analysen basierend auf digitalen Höhenmodellen, Einzugsgebiets-gemittelten und lokalen Erosionsraten quantifiziert mit ^{10}Be-Konzentrationen in Flusssanden und Festgestein, und Niedertemperatur-Thermochronometrie, insbesondere Apatit (U-Th-Sm)/He mit inversen Zeit-Temperatur-Simulationen. Ich untersuche dabei (1) die Grössenordnung und Verteilung der Erosionsrate quer über die Schichtstufenlandschaft der südlichen Indischen Halbinsel über Zeiträume von Jahrtausenden, (2) die wichtigsten Einflussfaktoren auf die Landschaftserosion der südlichen Indischen Halbinsel, (3) den Zeitablauf und die Grössenordnung der Gesteinsabkühlung im Spätstadium entlang der Schichtstufe, (4) die Einwirkungen der Mesozoischen Extensionstektonik auf die Landschaft und (5) die Flusssysteme auf regionaler Stufe.

Der erste Teil dieser Doktorarbeit besteht aus der Quantifizierung der Landschaftserosion über Zeiträume von Jahrtausenden mit einer aussergewöhnlichen Abdeckung der Landschaft aus der Luft. Erosionsraten, welche über das Einzugsgebiet gemittelt wurden, variieren von 9.6 ± 0.8 m Ma^{-1} im Inlandplateau bis 114.3 ± 25.4 m Ma^{-1} auf der westlichen Seite der Schichtstufe. Erosionsraten des anstehenden Felses variieren von 2.4 ± 0.2 m Ma^{-1} auf der oberen Seite des Gebirgsrückens bis 143.4 ± 2.4 m Ma^{-1} in aktiven Kanalbetten auf dem Inlandplateau. Einzugsgebiets-gemittelte Erosionsraten, ermittelt von westwärts entwässernden Einzugsgebieten quer über der Schichtsufe, sind signifikant höher als diejenigen welche von ostwärts entwässernden Einzugsgebieten über dem Hochland ermittelt wurden. Dieser erkennbare Unterschied weist darauf hin, dass die langfristige Abtragung des Hochlandes bei niedrigeren Raten fortschreitet als diejenige der Schichtstufenzone. Die Beziehung zwischen Topographie, Klima und Erosion wird durch das Ermitteln von regionalen Erosionsmustern über Zeiträume von Jahrtausenden, Niederschlags- und Vegetationsanalysen festgestellt. Einzugsgebiets-gemittelte Erosionsraten enthüllen eine moderate Korrelation mit mittleren Hangwinkeln und lokalen Reliefs, während sie einen starken Zusammenhang mit der Kanalsteilheit aufweisen. Das zeigt, dass die topographische Steilheit der wichtigste Einflussfaktor auf die räumliche Variabilität der Erosionsraten ist. Der starke Gradient im Niederschlag spielt in dieser Region nur eine untergeordnete Rolle. ^{10}Be-hergeleitete, durchschnittliche Erosionsraten in den Hochländern entsprechen den langfristigen Erosionsraten, welche vorher mit Apatit-Spaltspurendatierung hergeleitet wurden. Diese Resultate weisen insgesamt auf eine grossräumige Gleichgewichtstopographie hin, welche mit der Zeit nur langsam abnimmt. Der Gleichgewichtszustand widerspiegelt wohl den Ausgleich zwischen Erosion und Isostasie-getriebener Hebung der südlichen Indischen Halbinsel.

Der zweite Teil dieser Doktorarbeit dokumentiert die Analyse von Apatit (U-Th-Sm)/He (AHe)-Altern von anstehendem Gestein. Diese neuen AHe Alter variieren zwischen 38.1 ± 6.8 und 364.2 ± 44.6 Ma sie sind in der Palakkad-Lücke jünger als 50 Ma und im Inneren des Dekkan Plateaus älter als 200 Ma. Das Modellieren der thermischen Geschichte basierend auf AHe Daten weist auf erhöhte Gesteinsabkühlung und Exhumation im Innern des Dekkan Plateaus im Perm-Trias hin, gefolgt von einer bis

heute andauernden graduellen Abkühlung. Die alte (>200 Ma) AHe Altersverteilung über das mehr als 2600 m hohe Nilgiri Plateau weist auf sehr langsame, langfristige Erosions-/Exhumationsraten während der letzten ∼400 Ma hin. Dies stimmt mit den kleinsten Erosionsraten über Zeiträume von Jahrtausenden überein, die mit Hilfe von ^{10}Be überall auf der südlichen Indischen Halbinsel gemessen wurden. Dieses Resultat soll davor warnen, aus der Topographie allein, ohne zusätzlich stützende Beweise, auf die Tektonik zu schliessen. Die AHe Daten deuten darauf hin, dass die Abtragung der Kruste entlang des westlichen Küstenabschnitts nicht mehr als 1-1.5 km beträgt. Der letzte Teil der Doktorarbeit präsentiert die quantitative Auswertung der Flussprofilanalyse und verbindet die Charakteristiken der Wassereinzugsgebiete und Kanallängsprofile mit Fluss-Knickpunkten als Marker einer transienten Landschaftsentwicklung. Die räumlichen Wechsel in der Morphometrie des Einzugsgebietes werden als eine dynamische Antwort auf komplexe Wechsel- und Rückwirkungen zwischen der früheren post-orogenen Topographie entlang und quer zu den Rändern der Schichtstufe und der starken Entwässerung in jüngerer Zeit interpretiert.