

# VU Research Portal

## The role of fluid flow in the thermal history of sedimentary basins

Luijendijk, E.

2012

### **document version**

Publisher's PDF, also known as Version of record

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

### **citation for published version (APA)**

Luijendijk, E. (2012). *The role of fluid flow in the thermal history of sedimentary basins: Inferences from thermochronology and numerical modeling in the Roer Valley Graben, southern Netherlands.*

### **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](mailto:vuresearchportal.ub@vu.nl)

---

## Samenvatting

---

De temperatuur van de ondergrond speelt belangrijke rol in veel geologische processen. Temperatuur bepaalt de weerstand van de aardkorst bij deformatie en speelt een belangrijke rol bij de vorming van rifts en het opbreken van de aardkorst. Daarnaast is de temperatuur van de ondergrond ook een cruciale factor voor de winning van geothermische energie en de vorming van olie en gas. De kennis over de geologische geschiedenis van de aarde is voor een groot deel gebaseerd op gegevens van de temperatuur van de aardkorst in het verleden met behulp van thermochronologische technieken. Thermochronologie leidt de temperatuurgeschiedenis van gesteenten af uit de temperatuur-afhankelijke diffusie van isotopen die ontstaan door radioactief verval. Deze temperatuurgeschiedenis is weer te koppelen aan de diepte en de begraving- en opheffingsgeschiedenis van gesteenten. De ontwikkeling van thermochronologische technieken heeft de kennis van geologische processen zoals vorming van gebergten en sedimentaire bekkens sterk verbeterd.

Het afleiden van de geologische geschiedenis uit thermochronologische gegevens is echter sterk afhankelijk van aannames van de geothermische gradiënt, de toename van de temperatuur met de diepte. De kennis van de temperatuur van de aardkorst is beperkt en berust voor een groot deel op schaarse temperatuurmetingen uit diepe putten. Er zijn veel verschillende processen die deze temperaturen kunnen beïnvloeden, variërend van de dikte van de aardkorst en de lithosfeer tot de invloed van topografie en het klimaat. Een potentieel belangrijke maar moeilijk te voorspellen factor is de thermische invloed van grondwaterstroming.

In deze thesis probeer ik de kennis te verbeteren van hoe grondwaterstroming de temperaturen beïnvloed, en hoe dit bestudeerd kan worden door middel van een combinatie van thermochronologische technieken en computermodellen van grondwaterstroming. Dit onderzoek richt zich op sedimentaire bekkens, omdat hier uit sedimenten veel onafhankelijke informatie over de geologische en thermische geschiedenis gehaald kan worden. Hierdoor kan dit onderzoek zich richten op het isoleren van de thermische effecten van grondwaterstroming. Als studiegebied is voor de Roerdalslenk gekozen in zuid-Nederland en aangrenzende delen van België en Duitsland.

## **Temperaturen van de ondergrond**

Hoofdstuk 2 richt zich op een reconstructie van de temperaturen in de ondergrond van de Roerdalslenk met behulp van nieuwe temperatuurdata en een nieuw computermodel. Dit model leidt de temperatuur van de ondergrond af uit temperatuurmetingen vlak na boring van putten die verstoord zijn door het boorproces. Het model geeft sterk verbeterde schattingen van de temperatuur van de ondergrond, en maakt ook een schatting van de onzekerheid van deze data mogelijk. De resultaten laten geen signaal zien van de extensie en verdunning van de aardkorst en de lithosfeer in de Roerdalslenk. Er is wel een onverwachte variatie van de temperatuur langs de as van het bekken, met lage temperaturen in het zuidoosten van de slenk en hoge geothermische gradiënt in het noordwesten. Tevens zijn er enkele lokale thermische anomalieën gevonden van  $> +10$  °C in het noordwesten van het bekken. Met computermodellen wordt aangetoond dat deze variatie niet verklaard kan worden door verschillen in thermische geleidbaarheid van de sedimenten in de slenk. Een mogelijk alternatieve verklaring is de thermische invloed van diepe grondwaterstroming.

## **Thermochronologie en inversie van de Roerdalslenk**

Dit hoofdstuk richt zich op het gebruik van thermochronologische data om de thermische en geologische geschiedenis van sedimentaire bekkens te reconstrueren. De interpretatie van thermochronologische gegevens uit sedimentaire bekkens wordt sterk bemoeilijkt doordat de gegevens zowel door de temperatuurgeschiedenis van het bekken als de brongebieden van de sedimenten worden beïnvloed. De invloeden van de brongebieden zijn vaak moeilijk te scheiden, in het bijzonder doordat monsters vaak mineralen bevatten uit meerdere brongebieden. In hoofdstuk 3 wordt een nieuw computermodel gepresenteerd waarbij modellen van de geologische geschiedenis van bekkens worden gecombineerd met meerdere scenarios voor de evolutie van de brongebieden. Door expliciet de onzekerheid van de thermische evolutie van 1 of meerdere brongebieden mee te nemen in de analyse wordt de bruikbaarheid van thermochronologische data in sedimentaire bekkens sterk vergroot.

Dit nieuwe model is gekoppeld aan fission-track data uit tot 4 km diepe putten uit de Roerdalslenk. Fission-track analyse is een thermochronologische methode waarbij temperaturen worden afgeleid uit de verdeling van splitsporen in kristalroosters die ontstaan door het verval van uraniumisotopen. Vooraf werd verwacht dat het sterkste thermische in de Roerdalslenk samenhangt met diepe begraving en daaropvolgende erosie van sedimenten tijdens de inversie van de Roerdalslenk in het laat Krijt. De model resultaten geven aan dat de sterkste opheffing en erosie ca. 1 km bedroeg en plaatsvond in het noordoostelijk deel van het bekken, nabij de nog steeds actieve Peelrandbreuk. De helft van de bestudeerde putten bevat echter fission-track monsters die indicaties geven voor temperaturen die veel hoger zijn dan verklaard kan worden uit de begravinggeschiedenis van het bekken. In twee

van de putten duiden de gegevens op een omkering van de geothermische gradiënt. Dit kan alleen verklaard worden door een lokale warmtepuls, mogelijk veroorzaakt door magmatische intrusies of hiermee samenhangende hydrothermale stroming.

## **Fission-track thermochronologie**

Hoofdstuk 4 richt zich op de onzekerheid van het afleiden van temperatuurgeschiedenis van gesteenten uit fission-track gegevens. Bestaande modellen die het gedrag van fission-tracks op geologische tijdschalen beschrijven zijn voornamelijk gekalibreerd aan de hand van monsters uit enkele putten uit het Otway Basin, een sedimentair bekken in zuidoost Australië. Hierbij wordt verondersteld dat deze monsters zich momenteel op de maximale begravingdiepte en temperatuur bevinden. Nieuw onderzoek laat echter zien dat de zuidoostkant van het Australische continent is opgeheven sinds het Mioceen (~20 miljoen jaar geleden) en dat er in het Otway bekken zeker enkele honderden meters aan sedimenten zijn geërodeerd. Hoofdstuk 4 laat zien dat wanneer rekening wordt gehouden met ca. 500 - 1000 m erosie van sedimenten de fission-track modellen niet meer overeenkomen met de gegevens uit het Otway bekken, maar dat bestaande modellen temperaturen ca. 20 °C onderschatten. Deze resultaten worden bevestigd door een tweede fission-track dataset uit zuid Texas, die tot nu toe niet gebruikt is om fission-track modellen te kalibreren, maar die mogelijk een beter ijkpunt biedt voor de methode. De onderschatting van de temperaturen in de huidige modellen zorgt er mogelijk voor dat studies die de timing en mate van opheffing van de aardkorst afleiden uit fission-track data .

## **Thermische invloed van diepe grondwaterstroming**

Hoofdstuk 5 richt zich op het thermisch effect van grondwaterstroming die gedreven wordt door hoogteverschillen. Door de grote hoeveelheid processen die temperatuur beïnvloeden is het vaak moeilijk afwijkende temperaturen toe te schrijven aan grondwaterstroming. Tevens wordt het simuleren van grondwaterstroming met computermodellen bemoeilijkt door de grote onzekerheid en de sterke variatie van de doorlatendheid van sedimenten.

In de Roerdalslenk ligt het grensvlak tussen zoet en zout grondwater tot 1 km dieper dan de overgang van terrestrische naar mariene sedimenten. De verzoeting van mariene sedimenten duidt op een relatief sterke en diepe stroming van grondwater in de slenk. In hoofdstuk 5 wordt verkend of de verzoeting van mariene sedimenten verklaard kan worden door diepe grondwaterstroming en of deze grondwaterstroming ook een verklaring kan bieden voor de onverwachte variatie van de temperaturen langs de as van de slenk.

Dit grondwaterstroming systeem is in kaart gebracht door een 2D numeriek model van grondwaterstroming. Het model simuleert de evolutie van het grondwatersysteem tijdens de geleidelijke terugtrekking van de kustlijn uit het bekken, vanaf het Mioceen (17 miljoen jaar geleden) tot het heden. De doorlatendheid is

geschat met een nieuw algoritme dat de doorlatendheid van sedimenten schat uit hoge resolutie gegevens van de variatie van klei-gehalten van sedimenten uit geofysische metingen. De resultaten laten zien dat de diepe zoet-zout grens kan alleen gesimuleerd worden door een relatief hoge permeabiliteit aan te nemen. De gemodellerde grondwaterstroming zorgt voor een sterke afkoeling van gemiddeld 15 °C over de gehele diepte van het bekken. De resultaten laten zien dat grondwaterstroming zowel de diepe zoet-zout grens als de variatie in de temperaturen langs de as van het bekken kan verklaren. Dit laat zien dat grondwaterstroming een sterk thermisch effect kan hebben, zelfs in gebieden met een laag reliëf.

## **Thermochronologie van een hydrothermaal systeem**

Bestaande thermochronologische onderzoeken laten vaak sterke thermische anomalieën zien die worden toegeschreven aan hydrothermale stroming. Tevens zijn er veel indicaties voor Mesozoïsche hydrothermale mineralisatie in de west Europese plaat. In veel gevallen zijn de hydrologische setting en de processen die leiden tot deze hydrothermale systemen onbekend.

In hoofdstuk 6 wordt verkend of de afwijkende fission-track gegevens verklaard kunnen worden door magmatische of hydrothermale warmtepuls die samenhangt met onafhankelijk gedateerde magmatische intrusies in de Roerdalslenk. De fission-track data worden geïnterpreteerd met een model waarbij het thermische effect van een magmatische of hydrothermale warmtepuls wordt gesimuleerd. Met dit model worden een groot aantal relevante parameters verkend zoals de temperaturen van hydrothermale of magmatische warmtebron, de ouderdom en de duur van opwarming en de stroomsnelheid van een hydrothermale puls.

De resultaten laten zien dat de gegevens niet verklaard kunnen worden door een thermische puls die samenvalt met de onafhankelijk gedateerde magmatische intrusies uit het midden Krijt (130 miljoen jaar geleden), maar wijzen op een recentere opwarming ca. 60 tot 80 miljoen jaar geleden. De temperaturen die afgeleid zijn uit de fission-track gegevens zijn minstens 75 °C warmer dan de achtergrondwaarden. Dit duidt op de stroming van warm grondwater van een diepte van enkele kilometers, waarschijnlijk langs relatief goed doorlatende breuken. De duur en het volume van de hydrothermale stroming kunnen niet verklaard door het langs breuken weglekken van grondwater dat onder hoge druk is gebracht door de compactie van sedimenten, de vorming van aardgas of tektonische compressie. De meest voor de hand liggende verklaring is dat diepe circulatie van grondwater langs breuken gedreven wordt door hoogteverschillen die veroorzaakt worden door de inversie van de Roerdalslenk in het laat Krijt. De sterke breukbeweging tijdens inversie en de daarmee samenhangende toename van de doorlatendheid van deze breuken is tevens een mogelijke verklaring voor de diepe circulatie van grondwater.

## Conclusies

Samenvattend laten zowel de thermochronologische en temperatuurdata als de modelstudies een sterk thermische effect zien van zowel regionale grondwaterstroming in de bovenste ~1.5 km van de aardkorst en diepe hydrothermale stroming langs breuken. Hoewel dit proefschrift zich richt op de Roerdalslenk hebben de resultaten sterke implicaties voor sedimentaire bekkens in het algemeen, aangezien de resultaten aangeven dat zelfs een beperkt relief diepe grondwaterstroming kan veroorzaken met een sterk thermisch effect. Tevens laten de resultaten het sterke thermische effect zien van diepe hydrothermale stroming langs permeabele breuken. Deze thermische effecten van grondwaterstroming in sedimentaire bekkens bemoeilijken potentieel de geologische interpretatie van thermochronologische of temperatuurdata. Echter, het onderzoek laat ook zien dat de combinatie van thermochronologie en numeriek modelleren van het thermische effect van grondwaterstroming nieuwe kansen biedt voor het bestuderen van grondwaterstroming op geologische tijdschaal.