

ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗΣ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

με θέμα:

«Ο Σεισμός του Darfield, μεγέθους M_w=7.1 και ο μετασεισμός του Christchurch M_w=6.2, στη Νέα Ζηλανδία»



Ο φοιτητής: Βασίλειος Κελέκης Α.Ε.Μ.: 4155

Επιβλέπουσα Καθηγήτρια: κα Κυρατζή Αναστασία

Περιεχόμενα

1.	Εισαγωγή – Ευχαριστίες	1
2.	Αντικείμενο Διπλωματικής	2
3.	Γενικά Στοιχεία	3
	3.1. Γεωγραφικά - Γεωμορφολογικά Δεδομένα Περιοχής	3
	3.2. Δημογραφικά Στοιχεία	3
4.	Γεωλογικά – Γεωτεκτονικά Στοιχεία	5
	4.1. Γενικά Γεωλογικά Δεδομένα Νέας Ζηλανδίας	5
	4.2. Γεωλογικά Δεδομένα περιοχής Canterbury	8
5.	Σεισμός Darfield (04/09/2010), Mw=7.1	14
	5.1. Γενικά στοιχεία σεισμού	14
	5.2. Σεισμολογικά δεδομένα σεισμού Darfield	18
	5.3. Μετασεισμική δραστηριότητα	24
	5.4. Επιφανειακές διαρρήξεις σεισμού Darfield (04/09/2010)	29
	5.5. Πλευρικές εξαπλώσεις και φαινόμενα ρευστοποίησης	
	σεισμού Darfield (04/09/2010)	40
6.	Μετασεισμός Christchurch (22/02/2011), Mw=6.2	45
	6.1. Γενικά στοιχεία σεισμού	45
	6.2. Σεισμολογικά δεδομένα σεισμού Christchurch	46
7.	Συμπεράσματα	51

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Εισαγωγή – Ευχαριστίες

Η παρούσα Διπλωματική Εργασία ανατέθηκε στο φοιτητή του Τμήματος Γεωλογίας, της Σχολής Θετικών Επιστημών του Α.Π.Θ., Βασίλειο Κελέκη (Α.Ε.Μ. 4155) από την Καθηγήτρια του τομέα Γεωφυσικής του Τμήματος Γεωλογίας της Σχολής Θετικών Επιστημών του Α.Π.Θ. κα Κυρατζή Αναστασία.

Στο σημείο αυτό κρίνεται σκόπιμο να ευχαριστήσω την επιβλέπουσα καθηγήτρια κα Κυρατζή Αναστασία για την ανάθεση του θέματος, για την πολύτιμη συμβολή του στη σύνταξη της εργασίας, για τη βιβλιογραφική καθοδήγηση που μου παρείχε και για την αμέριστή της συμπαράσταση.

2. Αντικείμενο Διπλωματικής

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελεί η βιβλιογραφική έρευνα των ισχυρών σεισμικών ακολουθιών που εκδηλώθηκαν στις 04/09/2010 στο Darfield και στις 22/02/2011 στο Christchurch της Νέας Ζηλανδίας. Η ισχυρή σεισμική ακολουθία έγινε αντικείμενο μελέτης από πολλά πανεπιστήμια του κόσμου, λόγω της ενεργοποίησης ρηγμάτων-ρηξιγενών ζωνών, που έως τότε δεν είχαν και μελετηθεί, επειδή δεν δραστηριοποιήθηκαν για διάστημα τουλάχιστον 16000 ετών.

Στόχος της παρούσας διπλωματικής είναι η παρουσίαση των γεωλογικών, γεωφυσικών και τεκτονικών δεδομένων και συμπερασμάτων που εξήχθησαν από τη μελέτη των σεισμικών ακολουθιών. Παρουσιάζονται τα σημαντικότερα στοιχεία που προέκυψαν έπειτα από την αποδελτίωση αρκετών δημοσιευμένων εργασιών σε διάφορα επιστημονικά περιοδικά, μαζί με ένα ιδιαίτερα πλούσιο φωτογραφικό υλικό και τα σημαντικότερα, κατά την κρίση μας, διαγράμματα και χάρτες, με σεισμολογικά και γεωλογικά δεδομένα. Αναλύονται τα μακροσεισμικά αποτελέσματα των δύο ισχυρών σεισμών και προσεγγίζονται τα εκτεταμένα φαινόμενα πλευρικής εξάπλωσης και ρευστοποίησης που εκδηλώθηκαν κατά τη διάρκεια των σεισμών.

Στο τέλος παρατίθενται οι βιβλιογραφικές αναφορές που αναφέρονται στο κείμενο, καθώς και οι κυριότερες των επιστημονικών εργασιών που αποδελτιώθηκαν, στα πλαίσια της εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

3. Γενικά στοιχεία

3.1. Γεωγραφικά – Γεωμορφολογικά Δεδομένα Περιοχής

Η Νέα Ζηλανδία αποτελείται από δύο βασικά νησιά (που αποκαλούνται απλά Βόρειο και Νότιο Νησιά και έναν αριθμό μικρότερων νησιών. Η συνολική έκταση της Νέας Ζηλανδίας είναι 268.680 km². Η χώρα εκτείνεται σε περισσότερα από 1.600 km κατά μήκος του κεντρικού, βόρειου-βορειοανατολικού άξονά της. Έχει επίσης μεγάλο μήκος ακτών των οποίων το μήκος φτάνει τα 15.134 km.

Η περιοχή ενδιαφέροντος εντοπίζεται στο κεντρικό και ανατολικό τμήμα της Νέας Ζηλανδίας και συγκεκριμένα στις περιοχές Darfield και Christchurch, όπου εντοπίζονται τα επίκεντρα των ισχυρών σεισμικών ακολουθιών που εκδηλώθηκαν στις 04/09/2010 και στις 22/02//2011 αντίστοιχα. Το Darfield εντοπίζεται στο κεντρικό-πεδινό τμήμα του Νότιου Νησιού της Νέας Ζηλανδίας και απέχει 328 km ΝΔ της πρωτεύουσα Wellington (η οποία εντοπίζεται στο Βόρειο Νησί). Το Christchurch εντοπίζεται επίσης στο Νότιο Νησί και συγκεκριμένα στην ανατολική ακτή, 42 km Ανατολικά του Darfield και 306 km ΝΔ της πρωτεύουσα Wellington.

Ακολουθούν δορυφορικές εικόνες από το Google Earth, όπου είναι ευδιάκριτες οι προαναφερθείσες περιοχές.

Το Νότιο Νησί είναι η μεγαλύτερη μάζα γης, και χωρίζεται κατά μήκος από τις Νότιες Άλπεις, η υψηλότερη κορυφή των οποίων είναι το Αοράκι/Όρος Κουκ, στα 3.754 μέτρα. Στο Νότιο Νησί υπάρχουν περισσότερες από 18 κορυφές με ύψος μεγαλύτερο των 3.000 μ. Το Βόρειο Νησί είναι λιγότερο ορεινό από το Νότιο, αλλά χαρακτηρίζεται από ηφαιστειακή δράση. Το ψηλότερο βουνό στο Βόρειο Νησί, το Ρουαπέχου (2.797 μ.), είναι δραστήριο κωνικό ηφαίστειο (<u>http://el.wikipedia.org</u>).

3.2. Δημογραφικά Στοιχεία

Η Νέα Ζηλανδία διαθέτει πληθυσμό 4,2 εκατομμύρια κατοίκους. Περίπου 70% είναι λευκοί Ευρωπαϊκής καταγωγής. Ένα μεγάλο ποσοστό των λευκών Νεο Ζηλανδών είναι σκωτσέζικης καταγωγής. Οι Μαορί είναι η δεύτερη μεγαλύτερη εθνική ομάδα (14,7%, συμπεριλαμβανομένων και αυτών που έχουν εν μέρει Μαορί καταγωγή) (http://el.wikipedia.org).



4. Γεωλογικά – Γεωτεκτονικά Στοιχεία

4.1. Γενικά Γεωλογικά Δεδομένα Νέας Ζηλανδίας

Η γεωλογική δομή της Νέας Ζηλανδίας σηματοδοτείται από την ηφαιστειακή δραστηριότητα, τους ισχυρούς και συχνούς σεισμούς και τις γεωθερμικές περιοχές, αποτέλεσμα της θέσης της στο όριο μεταξύ των τεκτονικών πλακών της Αυστραλίας στα ΒΔ και του Ειρηνικού στα ΝΑ.

Η Νέα Ζηλανδία αποτελεί παλαιό αποκομμένο τέμαχος της υπερ-ηπείρου Γκοντβάνα, μαζί με τη Νότια Αμερική, την Αφρική, τη Μαδαγασκάρη, την Ινδία, την Ανταρκτική και την Αυστραλία. Τα πετρώματα που καλύπτουν σήμερα τη Νέα Ζηλανδία βρίσκονται μεταξύ της ανατολικής Αυστραλίας και της Δυτικής Ανταρκτικής.

Τα παλαιότερα πετρώματα που έχουν χρονολογηθεί στη Νέα Ζηλανδία, έχουν ηλικία Μέσο Κάμβριο (510 Ma), αν και εντοπίζονται παλαιότερα πετρώματα στα νησιά Oakland. Το βραχώδες υπόβαθρο της χώρας χωρίζεται στη «Δυτική Επαρχία», που αποτελείται κυρίως από γρανίτη και γνεύσιους και στην μια «Ανατολική Επαρχία», που αποτελείται κυρίως από γραουβάκες και σχιστόλιθους. Οι επαρχίες υποδιαιρούνται περισσότερες μικρότερες ζώνες, που αποτελούν τεμάχη φλοιού με διαφορετικές γεωλογικές προελεύσεις και ιστορίες, που έχουν συγκεντρωθεί και συγκολληθεί σχηματίζοντας τη Νέα Ζηλανδία. Ιδιαίτερα χαρακτηριστικός για τη Νέα Ζηλανδία είναι η έντονη ηφαιστειότητα που εκδηλώθηκε στο Τεταρτογενές και η οποία ξεκίνησε πριν 1,7 εκατ. χρόνια (Ma). Μεγάλες ηφαιστειακές εκρήξεις προκάλεσαν τη ροή λάβας ανδεσιτικής κυρίως σύστασης και τη δημιουργία ασπιδόμορφων ηφαιστείων, τα κυριότερα των οποίων είναι το όρος Egmont, τις κορυφές του Tongariro National Park

Η περίπλοκη γεωλογική δομή της Νέας Ζηλανδίας είναι αποτέλεσμα της έντονης τεκτονικής δραστηριότητας που εκδηλώνεται, η οποία οφείλεται στο γεγονός ότι η χώρα βρίσκεται στο όριο σύγκρουσης και υποβύθισης δύο μεγάλων τεκτονικών πλακών, της πλάκας της Αυστραλίας στα ΒΔ και της πλάκας του Ειρηνικού στα ΝΑ, καθώς ταυτόχρονα με την υποβύθιση εντοπίζεται και έντονη η οριζόντια συνιστώσα, προκαλώντας δεξιόστροφη μετακίνηση της χώρας, της τάξης των 37-47mm/έτος (Εικόνα 4.2). Αποτέλεσμα των μετακινήσεων αυτών είναι η εκδήλωση ισχυρών σεισμών οι οποίοι είναι πολύ συχνό φαινόμενο για την ιστορία της Νέας Ζηλανδίας (Εικόνα 4.1).



Εικόνα 4.2 Χάρτης ισχυρότερων σεισμών Νέας Ζηλανδίας, από το 1848 (<u>http://www.gns.cri.nz/Home/Learning/Science-Topics/Earthquakes/New-</u> Zealand-Earthquakes/Where-were-NZs-largest-earthquakes).



Εικόνα 4.3 Χάρτης ρηχών (<40km) σεισμών Νέας Ζηλανδίας, τα τελευταία 10 χρόνια.

http://info.geonet.org.nz/dis play/quake/Earthquake

Εικόνα 4.4 Χάρτης βαθιών (>40km) σεισμών Νέας Ζηλανδίας, τα τελευταία 10 χρόνια.

http://info.geonet.org.nz/dis play/quake/Earthquake



Εικόνα 4.5 Τροποποιημένη δορυφορική εικόνα που απεικονίζει τη Νέα Ζηλανδία να βρίσκεται στο όριο σύγκρουσης και υποβύθισης δύο μεγάλων τεκτονικών πλακών, της πλάκας της Αυστραλίας στα ΒΔ και της πλάκας του Ειρηνικού στα ΝΑ, προκαλώντας δεξιόστροφη μετακίνηση, της τάξης των 37-47mm/έτος. (http://en.wikipedia.org/wiki/Geology of New Zealand#mediaviewer/File:NZ faults. png).

4.2. Γεωλογικά Δεδομένα περιοχής Canterbury

Η Νέα Ζηλανδία είναι μια νησιωτική χώρα που παρουσιάζει πολύ έντονη σεισμικότητα, λόγω της ιδιαίτερης θέσης που κατέχει από γεωδυναμική άποψη. Βρίσκεται πάνω στο όριο δύο τεκτονικών πλακών, της Αυστραλιανής και της Ειρηνικής το οποίο αναπτύσσεται με διεύθυνση ΒΑ-ΝΔ. Κατά μήκος του ορίου αυτού, που

διέρχεται μερικές δεκάδες χιλιόμετρα ανατολικά από το βόρειο νησί ενώ διασχίζει το νότιο, συμβαίνουν πολύπλοκες τεκτονικές διεργασίες.

Συγκεκριμένα, στο βόρειο νησί και στο βόρειο τμήμα του νότιου νησιού, που ανήκουν στην Αυστραλιανή πλάκα, ο ωκεάνιος φλοιός της Ειρηνικής πλάκας βυθίζεται κάτω από τον ηπειρωτικό φλοιό της Αυστραλιανής πλάκας με ταχύτητα που αναφέρεται ως 47 mm/year και αποτέλεσμα την εκδήλωση ηφαιστειακής δραστηριότητας. Αντίθετα, στο μεγαλύτερο τμήμα του νότιου νησιού, το οποίο ανήκει στην Ειρηνική πλάκα, ο ηπειρωτικός φλοιός της Αυστραλιανής πλάκας συγκρούεται με τον ηπειρωτικό φλοιό της Ειρηνικής με ταχύτητα 37 mm/year και αποτέλεσμα την ορογένεση των νοτίων Άλπεων. Στο ενδιάμεσο τμήμα και στην οπισθοχώρα από τη ζώνη σύγκρουσης επικρατούν κινήσεις και ρήγματα οριζόντιας ολίσθησης. Οι ενεργές αυτές γεωτεκτονικές διεργασίες ξεκίνησαν με διάφορες μορφές και ρυθμούς πριν από 500 περίπου εκατομμύρια χρόνια και προκάλεσαν συνθήκες για δημιουργία αφενός πλουσίων φυσικών πόρων (μεταλλεύματα, λιγνίτες, πετρέλαιο, αέριο) και αφετέρου ενός πολύ όμορφου φυσικού περιβάλλοντος που όπως συμβαίνει κατά κανόνα στις γεωλογικά ενεργές περιοχές, συνδέεται με αυξημένη σεισμική και γενικότερα γεωλογική επικινδυνότητα.

Αναφορικά με τη γεωλογική δομή που χαρακτηρίζει την ευρύτερη περιοχή του Canterbury και Christchurch, όπου εκδηλώθηκαν οι δύο ισχυροί σεισμοί που εξετάζονται στην παρούσα διπλωματική εργασία, ισχύουν τα κάτωθι:

Η Περιφέρεια του Canterbury της Νέας Ζηλανδίας αντιστοιχεί στο τμήμα του νότιου νησιού, στα ανατολικά των Νοτίων Άλπεων, από τον ποταμό Waiau στο βορρά, στο ποταμό Waitaki στο νότο. Στα δυτικά των Νοτίων Άλπεων βρίσκεται το ρήγμα Alpine, μια πολύ σημαντική ρηξιγενή ζώνη για το νησί, που περνά μέσα από το νότιο νησί διασχίζοντας το Fiordland στο νότο, και την ευρύτερη περιοχή του Marlborough στο βορρά, όπου διακλαδώνεται σε πολλά επί μέρους ρήγματα, όπως τα Wairau, Awatere, Clarence, Hope, όπως διακρίνεται στην Εικόνα 4.3 (Elliott, et al., 2011, από Bird, 2003). Η πλάκα του Ειρηνικού βρίσκεται στα ανατολικά του ρήγματος Alpine και η Αυστραλιανή πλάκα βρίσκεται στα δυτικά. Η πλάκα του Ειρηνικού ολισθαίνει και μετακινείται προς τα ΝΝΔ περίπου 38mm/yr, σε σχέση με την Αυστραλιανή πλάκα, και ανεβαίνει 10mm/yr, δημιουργώντας τις Νότιες Άλπεις. Το ρήγμα Alpine δεν αναπτύχθηκε έως τις αρχές του Μειόκαινου (23 Ma). Δέκα εκατομμύρια χρόνια πριν (10Ma), οι Νότιες Άλπεις αποτελούσαν χαμηλούς λόφους και διαμορφώθηκαν στα σημερινά όρη, ως αποτέλεσμα της έντονης ορογενετικής δράσης, κατά τη διάρκεια των τελευταίων 5 εκατομμύριων ετών (5Ma).

Όλα τα πετρώματα του υποβάθρου στην περιοχή του Canterbury, αποτελούνται από γραουβάκες (υψηλής διαγένεσης ψαμμίτες και ιλυόλιθοι), που αποτέθηκαν σε βαθύ

θαλάσσιο περιβάλλον και εξελίχθηκαν στην υπερ-ήπειρο Γκοντβάνα πριν τη δημιουργία της θάλασσας της Τασμανίας στο τέλος του Κρητιδικού (80Ma).

Όλα τα πετρώματα του βραχώδους υποβάθρου ανατολικά του ρήγματος Alpine και νότια του Timaru έχουν μεταμορφωθεί σε σχιστόλιθους.

Ανατολικά των Νότιων Άλπεων εντοπίζεται η πεδιάδα του Canterbury, που αποτελείται από ιζηματογενή πετρώματα, αποτέλεσμα διάβρωσης, μεταφοράς και απόθεσης των πετρωμάτων των Νοτίων Άλπεων (Forsyth, et al., 2008).

Νοτιοανατολικά του Christchurch, εντοπίζεται η χερσόνησος Banks, που αποτελείτται από δύο μεγάλα βασαλτικής σύστασης ηφαίστεια, ηλικίας Μειοκαίνου.

Η πεδιάδα του Canterbury είναι αποτέλεσμα πλήρωσης αλλουβιακής και ποταμοχειμάριας προέλευσης υλικών. Η σχετικά ταχεία ανύψωση των Νοτίων Άλπεων, σε σύγκριση με την περιοχή προς τα ανατολικά, οδήγησε σε ταχεία εναπόθεση κατά τη διάρκεια τα τέλη του Τεταρτογενούς και οι πλημμύρες του Canterbury Plains από προσχώσεις και ποτάμιες αποθέσεις. Οι προσχωσιγενείς αποθέσεις αμμοχάλικων της πεδιάδας του Canterbury συνήθως έχουν τουλάχιστον 500 μ. πάχος. Ορισμένα εδάφη κοντά στο Christchurch περιλαμβάνουν αργιλικά εδάφη και άλλα υλικά προϊόντα διάβρωσης των ηφαιστειακών πετρώματων της χερσονήσου Banks (Jongens, et al., 2012).

Ακολουθεί χάρτης αποτύπωσης των κυριότερων ρηγμάτων (Εικόνα 4.6), απλοποιημένος και πιο αναλυτικός γεωλογικός χάρτης της ευρύτερης περιοχής (Εικόνα 4.7).



Εικόνα 4.6 Τροποποιημένη εικόνα τρισδιάστατου αναγλύφου που απεικονίζει τη Νέα Ζηλανδία να βρίσκεται στο όριο σύγκρουσης και υποβύθισης δύο μεγάλων τεκτονικών πλακών, της πλάκας της Αυστραλίας στα ΒΔ και της πλάκας του Ειρηνικού στα ΝΑ, προκαλώντας δεξιόστροφη μετακίνηση, της τάξης των 37-47mm/έτος (Elliott, et al., 2011, από Bird, 2003).



Εικόνα 4.7 Απλοποιημένος γεωλογικός χάρτης ευρύτερης περιοχής ενδιαφέροντος. GF = το ίχνος του ρήγματος που προκάλεσε το σεισμό μεγέθους Mw=7.1 στις 04/09/2010 (Jongens, et al., 2012).



5. Σεισμός Darfield (04/09/2010), Mw=7.1

5.1 Γενικά στοιχεία σεισμού

Ο ισχυρός σεισμός που εκδηλώθηκε στις 04/09/2010 στις 04:35 π.μ. τοπική ώρα στην περιοχή Darfield (η παλαιότερη ονομασία του σεισμού ήταν σεισμός του Canterbury) της Νέας Ζηλανδίας, είχε μέγεθος Mw=7.1 και επίκεντρο στην πόλη Darfield, 45 km δυτικά από την πόλη Christchurch (Εικόνα 5.4), στο μέσον περίπου του νότιου νησιού (συντεταγμένες επικέντρου 43.530°N, 172.120°A). Το εστιακό βάθος, σύμφωνα με την Γεωλογική Υπηρεσία της Νέας Ζηλανδίας, ήταν 10 km (5 km σύμφωνα με την Γεωλογική Υπηρεσία των Η.Π.Α.). Ο σεισμός δεν είχε ευτυχώς ανθρώπινα θύματα, αλλά προξένησε πολλές βλάβες σε κατοικίες και τεχνικά έργα και σημαντικές εδαφικές παραμορφώσεις και αστοχίες.

Ο σεισμός συνέβη σε μια περιοχή που είχε στο παρελθόν εκδηλώσει λίγους σεισμούς σε σύγκριση με άλλες περιοχές του νότιου νησιού. Υπάρχουν κάποια χαρτογραφημένα ρήγματα στην περιοχή, αλλά η διάρρηξη συνέβη κατά μήκος μιας προηγουμένως άγνωστης ρηξιγενούς γραμμής με διεύθυνση Ανατολή-Δύση. Η ρηξιγενής αυτή γραμμή εντοπίζεται καλυμμένη κάτω από τα πρόσφατα χαλίκια που αποτέθηκαν στις πεδινές περιοχές του Darfield στο τέλος της τελευταίας παγετώδους περιόδου, περίπου πριν από 16.000 χρόνια. Καθώς τα χαλίκια στο παρελθόν δεν έδειξαν κανένα σημάδι ότι έχουν διαταραχθεί από κάποιο σεισμοτεκτονικό γεγονός, είναι πιθανό ότι το ρήγμα που προκάλεσε το σεισμό δεν είχαν μετακινηθεί για τουλάχιστον 16.000 χρόνια (<u>http://www.qns.cri.nz/</u>).

Η μετακίνηση κατά μήκος του ρήγματος έχει διαρρήξει την εδαφική επιφάνεια στις πεδινές περιοχές του Darfield, δημιουργώντας ένα ορατό ίχνος που εκτείνεται ανατολικά προς τα δυτικά για περίπου 24 χιλιόμετρα, από το Greendale έως σχεδόν το Rolleston (Εικόνες 5.1 & 5.2). Δρόμοι, περιφράξεις, αγροτικοί δρόμοι, προστατευτικά και αρδευτικά κανάλια που διασχίζουν το ίχνος ρήγματος μετατοπίστηκαν κατά θέσεις, πάνω από τρία μέτρα (3m). Από τις ορατές μετατοπίσεις, είναι προφανές ότι η κίνηση κατά μήκος του ρήγματος ήταν ως επί το πλείστον οριζόντια. Σε σχέση με το ίχνος του ρήγματος, η περιοχή βόρεια του ρήγματος έχει μετακινηθεί προς τα ανατολικά, ενώ η περιοχή νότια της βλάβης έχει μετακινηθεί προς τα δυτικά. Ωστόσο, πιο κοντά στους πρόποδες των Νοτίων Άλπεων, υπάρχουν ενδείξεις για κάποια ανοδική κατακόρυφη κίνηση. Οι κινήσεις κατά μήκος του ίχνους του ρήγματος ταιριάζουν με τις διευθύνσεις κίνησης όπως προκύπτουν από υποδεικνύεται από τα καταγραφόμενα σεισμικά κύματα (http://www.gns.cri.nz/).





Εικόνα 5.2 Τρισδιάστατο ψηφιακό μοντέλο αναγλύφου ευρύτερης περιοχής Darfield, όπου απεικονίζονται τα χαρτογραφηθέντα ρήγματα. Στην πεδινή περιοχή εντοπίζεται με κόκκινη γραμμή το ίχνος του σεισμικού ρήγματος Greendale, με διεύθυνση Α-Δ.

(http://maps.gns.cri.nz/website/af/viewer.htm)



Εικόνα 5.3 Χάρτης απεικόνισης επικέντρου σεισμού Darfield (04/09/2010, Mw=7.1) με πράσινο αστέρι και σεισμού Christchurch (22/02/2011, Mw=6.3), με κόκκινο αστέρι. Με κόκκινους κύκλους απεικονίζονται οι μετασεισμοί που εκδηλώθηκαν στην περιοχή μέχρι τις 22/02/2011, δηλ. μέχρι το σεισμό του Christchurch, ενώ με πράσινους οι μετασεισμοί πριν απ΄ αυτόν, έως και τις 11/03/2011.

(http://assets.royalsociety.org.nz/media/Information-paperThe-Canterbury-Earthquakes.pdf)



Εικόνα 5.4 Δορυφορική εικόνα Google Earth, στην οποία απεικονίζεται με ροζ κύκλο το επίκεντρο του σεισμού του Darfield (04/09/2010).

5.2 Σεισμολογικά δεδομένα σεισμού Darfield

Σύμφωνα με την επίλυση του μηχανισμού γένεσης (Εικόνα 5.5) ο σεισμός συνδέεται με την δράση ρήγματος οριζόντιας μετατόπισης που βρίσκεται στο φλοιό της Ειρηνικής πλάκας. Πρόκειται για δεξιόστροφο ρήγμα οριζόντιας μετατόπισης με διεύθυνση περίπου Α-Δ, όπως επιβεβαιώνεται και από τις παρατηρήσεις της επιφανειακής εκδήλωσης του ρήγματος, που αναπτύσσεται σε ένα συνολικό μήκος 24km περίπου. Οι περισσότεροι από τους μετασεισμούς κοντά στο επίκεντρο είχαν παρόμοιους μηχανισμούς γένεσης. Προς το δυτικό τμήμα του ρήγματος διαπιστώθηκε μία ισχυρή συνιστώσα ανάστροφης κίνησης.

Η επιφανειακή μετατόπιση στο ρήγμα του Greendale, που αποτελεί και το σεισμικό ρήγμα του σεισμού του Darfield, ήταν κυρίως δεξιόστροφη οριζόντιας μετατόπισης, με μέση οριζόντια μετατόπιση της τάξης των 2,5 m και μέγιστες μετατοπίσεις της τάξης των 5 m οριζοντίως και 1,5 m καθέτως, όπως μετράται στην επιφάνεια (Quigley et al., 2010).

Σεισμολογικά δεδομένα, GPS δεδομένα και αποτελέσματα επεξεργασίας δορυφορικών εικόνων (InSAR) δείχνουν ότι ο σεισμός ήταν μια πολύπλοκη ρηξιγενής διαδικασία που περιλαμβάνει την ενεργοποίηση πολλών ρηγμάτων (Beavan et al., 2010, Holden et al., 2011, Beavan et al., 2012). Τα αποτελέσματα από την αναστροφή δεδομένων της ισχυρής σεισμικής κίνησης (Holden et al., 2011) δείχνουν ότι ο σεισμός προκλήθηκε από τη μετακίνηση ενός τυφλού επωθητικού ρήγματος, που ονομάζεται Charing Cross (Εικόνα 4.10), 6 km βόρεια του ίχνους του ρήγματος Greendale, με την αρχική διάρρηξη να προχωρά προς τα νοτιοδυτικά του υποκέντρου μέχρι να διασταυρωθεί με το ρήγμα Greendale.

Η διάρρηξη που προκάλεσε ο σεισμός του Darfield φαίνεται να έχει εξαπλωθεί τόσο ανατολικά όσο και δυτικά κατά μήκος του ρήγματος Greendale, αλλά κατά κύριο λόγο προς ανατολάς (Holden et al., 2011). Τόσο τα γεωδαιτικά (Beavan et al., 2010 & Beavan et al., 2012) όσο και τα σεισμολογικά μοντέλα (Holden et al., 2011) δείχνουν ότι το μεγαλύτερο μέρος της μετατόπισης έγινε πολύ ρηχά και περιορίζεται κυρίως στα πρώτα 5km από την επιφάνεια. Μοντέλα που προέκυψαν για το σεισμικό ρήγμα, τα οποία αναπτύχθηκαν από την αντιστροφή των μετρήσεων InSAR δείχνουν ολίσθηση σε ορισμένες από τα τμήματα των ρηγμάτων να φτάνουν από 8m έως 4 km βάθος, υποδεικνύοντας μεγάλες πιέσεις της τάξης των 10 MPα (Elliott et al., 2012), ενώ τα βάθη των εκδηλωθέντων μετασεισμών, σύμφωνα με τους Syracuse, et al. (2012) κατά μήκος του κεντρικό τμήματος του ρήγματος Greendale, δείχνουν βάθη διάρρηξης από 5,9 km έως 14 km, αρκετά δηλαδή χιλιόμετρα κάτω από τις περιοχές της μετακίνησης που προκύπτει από Beavan et al., (2010).



Εικόνα 5.5 Ο μηχανισμός γένεσης του κύριου σεισμού (μεγάλη μπάλα) και των κυριότερων μετασεισμών (<u>http://info.geonet.org.nz/display/quake/M+7.1%2C+Darfield+%28Canterbury%29%2C+</u> 4+September+2010).



Σύμφωνα με τους Holden et al. (2010), συμπεραίνεται πως η προς τα δυτικά μεταδιδόμενη διάρρηξη του ρήγματος Greendale, έχει προκαλέσει ενεργοποίηση και ολίσθηση σε ένα τεμνόμενο τυφλό επωθητικό ρήγμα, κοντά στη Hororata, στο

δυτικότερο τμήμα του ρήγματος Greendale. Το συμπέρασμα αυτό επιβεβαιώθηκε τόσο από τα γεωδαιτικά μοντέλα, όσο και από τα μοντέλα ισχυρής κίνησης.

Η χωρική κατανομή των μετασεισμών, στην εγγύς περιοχή του ρήγματος Horotata (Εικόνα 5.7), επιβεβαιώνουν την παρουσία σεισμικής δραστηριότητας σε ρήγμα με μεγάλη γωνία κλίσης προς τα ΒΔ, η οποία ταιριάζει με τις παραμέτρους που προέκυψαν από λύσεις στιγμιαίων τανυστών για ορισμένους από τους μεγαλύτερους μετασεισμούς της εγγύς περιοχής (Ristau, 2008, Sibson et al., 2011).

Η προς Ανατολάς προκληθείσα διάρρηξη του ρήγματος Greendale, συνεχίστηκε για τουλάχιστον 20km, όπως αποδείχθηκε από τις επιφανειακές παραμορφώσεις που εκδηλώθηκαν και επιβεβαιώθηκαν από κινηματικά και γεωδαιτικά μοντέλα (Beavan et al., 2012).

Η παρουσία ενός δευτερεύοντος δεξιόστροφου ρήγματος οριζόντιας μετατόπισης, που εκτείνεται προς τα βορειοανατολικά έχει επίσης αναφερθεί (Beavan et al., 2010, Beavan et al., 2012), καθώς και ένα τμήμα του ρήγματος με διεύθυνση ANA κοντά στο ανατολικό άκρο του ρήγματος Greendale (Beavan et al., 2012).



Εικόνα 5.7 Επίκεντρα σεισμών που εμφανίζονται για τις εξής περιόδους:

A: 01/09-01/12/2010, **B**: 01/12/2010-21/02/2011, **C**: 22/02-12/06/2011, **D**: 13/06-22/12/2011, **E**: 23/12/2011-01/11/2012 (Bannister & Gledhill 2012).



Εικόνα 5.7 (συνέχεια). Το μέγεθος του συμβόλου που αντιστοιχεί σε κάθε σεισμό μεταβάλλεται εκθετικά με το τοπικό μέγεθος *M_L* (Bannister & Gledhill 2012).



Εικόνα 5.8 Επίκεντρα μετασεισμών στην περιοχή δυτικά του επικέντρου του σεισμού του Darfield, από τα οποία διακρίνεται το τυφλό επωθητικό ρήγμα στη Horotata. Το μέγεθος του συμβόλου που αντιστοιχεί σε κάθε σεισμό μεταβάλλεται εκθετικά με το τοπικό μέγεθος *M*_L. Το ρήγμα αυτό θεωρείται πως ενεργοποιήθηκε ως τμήμα της περίπλοκης διάρρηξης του Darfield. Κατά θέσεις η ολίσθηση φτάνει τα 2,8m σε βάθος 1km (Bannister & Gledhill 2012).

5.3 Μετασεισμική δραστηριότητα

Η κατανομή των μετασεισμών που εκδηλώθηκαν στις πρώτες εβδομάδες μετά τον κύριο σεισμό του Darfield, υποδεικνύουν μια συστάδα μετασεισμών που συγκεντρώνονται ΝΑ και ΒΔ του Rolleston (Εικόνα 5.9), στο ανατολικότερο τμήμα του επιφανειακού ίχνους του ρήγματος Greendale. Αυτό υποδεικνύει πως η διάρρηξη του ρήγματος Greendale σταμάτησε στην θέση που διασταυρώθηκε με ένα προηγουμένως άγνωστο τυφλό δεξιόστροφο ρήγμα, το οποίο 1-2 εβδομάδες μετά τον κύριο σεισμό, ενεργοποιήθηκε. Παρόλα αυτά η μεταγενέστερη υψηλή σεισμική ενεργότητα της εγγύς περιοχής του Rolleston και του Lincoln στους μήνες που ακολούθησαν (Εικόνα 4.14), διασκορπισμένη και περίπλοκη, ενώ οι μηχανισμοί γένεσης υποδηλώνουν τόσο οριζόντιας μετατόπισης, όσο και κανονικά ρήγματα. Κατά συνέπεια λεπτομέρειες για τη ρηξιγενή δομή στην εγγύς περιοχή του Rolleston, είναι δύσκολο να εξακριβωθεί.



Εικόνα 5.9 Επίκεντρα μετασεισμών που εκδηλώθηκαν στο διάστημα 04-30/09/2010, στο ανατολικό τμήμα των επιφανειακών διάρρηξεων (κόκκινες γραμμές), του ρήγματος Greendale. Η χωρική κατανομή των επικέντρων υποδεικνύει την παρουσία ενός αριστερόστροφου ρήγματος διεύθυνσης ΒΔ-ΝΑ, το οποίο πιθανότατα διέκοψε τη διάρρηξη του Darfield. Το μέγεθος του συμβόλου που αντιστοιχεί σε κάθε σεισμό μεταβάλλεται εκθετικά με το τοπικό μέγεθος *M*_L (Bannister & Gledhill 2012).

Σύμφωνα με τα δεδομένα που προέκυψαν από την GeoNet, η οποία εγκατέστησε δίκτυο σεισμογράφων στην περιοχή, πάνω από 7300 μετασεισμοί έγιναν αισθητοί, εκ των οποίων περισσότεροι από 100 είχαν ένταση επάνω από 8, σύμφωνα με την κλίμακα έντασης Mercalli (Πίνακας 5.1) και ορισμένες έντασης 9 (Bannister & Gledhill, 2012). Οι υψηλότερες εντάσεις έγιναν αισθητές κυρίως στην επικεντρική περιοχή, αλλά και ανατολικά του Christchurch. Η καταγραφόμενη εδαφική επιτάχυνση έφτασε τα 1.26g στο σεισμολογικό σταθμό του Greendale και το 0.3g στο κέντρο του Christchurch, 35km από το επίκεντρο. Οι μακράς περιόδου εδαφικές κινήσεις είχαν μέγιστο τα 2,5s. Αυτές οι κορυφές μπορούν να αποδοθούν ως επιπτώσεις της ενίσχυσης της σεισμικής κίνησης από τη βαθιά ιζηματογενή λεκάνη κάτω από το Christchurch (Webb et al., 2011), αλλά ταυτόχρονα υποδεικνύουν την ύπαρξη ενός μακράς περιόδου παράγοντα στην πηγή του σεισμού.



172.4°

172.6°E

Εικόνα 5.10 Επίκεντρα μετασεισμών της περιοχής βόρεια του Lincoln, έως το τέλος louvíou 2011. Οι σεισμοί πριν τον loúvio του 2011 απεικονίζονται με γκρι κύκλους, ενώ με κόκκινο χρώμα απεικονίζονται οι σεισμοί του louvíou 2011 και μεταγενέστερα (Bannister & Gledhill 2012).

Ι. Μη αισθητός	Δεν γίνεται αισθητός. Καταγράφεται μόνο από σεισμογράφους.
ΙΙ. Ελάχιστα αισθητός	Αισθητός από μερικούς ανθρώπους που βρίσκονται σε ανάπαυση στους υψηλότερους ορόφους κτιρίων.
III. Ασθενής	Αισθητός μέσα στα σπίτια, ως δονήσεις σαν να περνάει ελαφρύ φορτηγό. Μπορεί να μην αναγνωριστεί ως σεισμός.
ΙV. Μέτριος	Αισθητός μέσα στα σπίτια, ως δονήσεις σαν να περνάει βαρύ φορτηγό δίπλα στο σπίτι. Λιγότερο αισθητός στην ύπαιθρο. Τίθενται σε κίνηση κρεμασμένα αντικείμενα. Τζάμια τρίζουν. Κρότοι πιάτων και παραθύρων, χτύπος στις πόρτες. Σταματημένα αυτοκίνητα κλυδωνίζονται. Την νύχτα μερικοί ξυπνούν.
V. Σχετικά Ισχυρός	Αισθητός από όλους μέσα στα σπίτια, ως δονήσεις σαν να περνάει τραίνο δίπλα στο σπίτι. Ενδεχομένως μη αισθητός στην ύπαιθρο υπό ορισμένες συνθήκες. Αιώρηση κρεμασμένων αντικειμένων. Ανατροπή μερικών μικρών αντικειμένων και σπάσιμο πιάτων. Ανοιχτές πόρτες ταλαντεύονται. Υγρά από δοχεία χύνονται. Την νύχτα όλοι ξυπνούν.
VI. Ισχυρός	Αισθητός από όλους. Πολλοί τρομοκρατούνται και τρέχουν έξω από τα κτίρια. Οι άνθρωποι περπατούν με αστάθεια. Μετακίνηση ή ανατροπή πολυάριθμων μεγάλων αντικειμένων και επίπλων. Τζάμια σπάζουν. Βλάβες σε σοβάδες, κεραμίδια, καπνοδόχους. Μικρές καμπάνες ηχούν. Ζημιές λίγες, ελαφρές.
VII. Πολύ Ισχυρός	Δύσκολη η όρθια στάση. Πτώση πολυάριθμων κεραμιδιών, καπνοδόχων. Μικρές ζημιές σε ισχυρές κατασκευές. Σοβάδες και τοιχοποιία ρηγματώνονται στις συνηθισμένες κατασκευές. Στις κακές κατασκευές πέφτουν σοβάδες, αποκολλώνται τούβλα και πέτρες. Γίνεται αισθητός από οδηγούς αυτοκινήτων. Μεγάλες καμπάνες ηχούν. Κυματισμός στις λίμνες, θόλωμα νερού από λάσπη.
VIII. Καταστροφικός	Επηρεάζεται η οδήγηση των αυτοκινήτων. Αρκετές ζημιές και μερική κατάρρευση στις συνηθισμένες κατασκευές. Μέτριες ζημιές στην τοιχοποιία των καλών κατασκευών και μεγάλες στις κακές κατασκευές. Κλαδιά σπάνε από τα δένδρα. Αλλαγές στη ροή και στη θερμοκρασία του νερού σε πηγές και σε πηγάδια.
ΙΧ. Πολύ Καταστροφικός	Γενικός πανικός. Σοβαρές βλάβες στην τοιχοποιία των καλών κατασκευών. Γενική καταστροφή στις κακές κατασκευές. Μικρού μεγέθους κτίρια αποσπώνται από τα θεμέλια. Υπόγειοι αγωγοί σπάζουν. Εμφανίζονται ρωγμές στο έδαφος. Σε περιοχές με υπόγεια ύδατα, αναβλύζει από το έδαφος λεπτή άμμος, ιλύς και νερό.
Χ. Εξαιρετικά Καταστροφικός	Τα περισσότερα κτίρια καταστρέφονται. Πτώση μερικών καλών κατασκευών, ανθεκτικών ξύλινων κτιρίων και γεφυρών. Σχεδόν όλες οι κατασκευές τοιχοποιίας και τα προκατασκευασμένα κτίσματα καταρρέουν μέχρι θεμελίων. Σοβαρές ζημιές στο οδικό δίκτυο και σε φράγματα, υδροφράκτες και αναχώματα. Οι σιδηροτροχιές κάμπτονται ελαφρά. Μεγάλες κατολισθήσεις.
ΧΙ. Ασύλληπτα Καταστροφικός	Ελάχιστα κτίρια μένουν όρθια. Πτώση σχεδόν όλων των ανθρώπινων κατασκευών. Υπόγειοι αγωγοί και γραμμές μεταφοράς ενέργειας καταστρέφονται εντελώς. Καταστροφή οδικού δικτύου, πτώση γεφυρών και ανισόπεδων κόμβων. Οι σιδηροτροχιές κάμπτονται έντονα. Πολυάριθμες κατολισθήσεις, ρήγματα και παραμορφώσεις του εδάφους.
ΧΙΙ. Ολική Καταστροφή (ή Κατακλυσμιαίος)	Ολική καταστροφή. Κατάρρευση όλων των κτιρίων μέχρι θεμελίων. Τεράστιες παραμορφώσεις του φλοιού της Γης. Το έδαφος κινείται σε κύματα ή ανυψώνεται και υποχωρεί αρκετά μέτρα και τα σεισμικά κύματα φαίνονται στην επιφάνεια. Αλλαγές στο ανάγλυφο του εδάφους και τη γραμμή του ορίζοντα. Μεγάλες ποσότητες βράχων αλλάζουν θέση. Αλλαγή ροής ποταμών. Δημιουργία καταρρακτών. Παραμόρφωση της όρασης. Μεγάλα αντικείμενα εκτινάσσονται στον αέρα. Το επίπεδο XII έχει καταγραφεί μόλις μία φορά στην ανθρώπινη ιστορία.

Πίνακας 5.1 Κλίμακα έντασης σεισμών Mercalli.

http://el.wikipedia.org/wiki

Πίνακας 5.2 Συσχέτιση κλίμακας Richter και κλίμακας Mercalli.

<u>Κλίμακα Ρίχτερ</u>	Τυπικό μέγιστο Κλίμακας Mercalli
0 – 3,0	I
3,0 - 3,9	<u>II</u> - <u>III</u>
4,0 - 4,9	IV - V
5,0 - 5,9	VI - VII
6,0 - 6,9	VII - 🔀
7,0 – 7,9	VIII - XI
8,0 - 8,9	VIII - XII
9,0 - 9,9	X - XII
10,0+	Αν συνέβαινε, μάλλον 📶

Περισσότεροι από 4300 μετασεισμοί ακολούθησαν το σεισμό του Darfield (04/09/2010), έως και το Φεβρουάριο του 2011. Τα τοπικά μεγέθη των σεισμών έφταναν το M_L =5.4, σύμφωνα με το δίκτυο σεισμογράφων της GeoNet. Τα επίκεντρα των μετασεισμών ήταν συγκεντρωμένα στο ανατολικότερο τμήμα του ρήγματος Greendale (Gledhill et al., 2011) και περιελάμβαναν οκτώ σεισμικά συμβάντα μεγέθους M_L =5 (Εικόνες 4.10 & 4.11), παρόλο που δεν προκάλεσαν σημαντικές βλάβες στην πόλη Christchurch. Η μετασεισμική δραστηριότητα ελαττώθηκε γρήγορα κοντά στο κεντρικό και δυτικό τμήμα του ρήγματος Greendale (Εικόνες 5.6 & 5.7).

Τέσσερεις μήνες μετά τον κύριο σεισμό στο Darfield και συγκεκριμένα στις 25/12/2010 στις 21:30 (UTC) εκδηλώθηκε μετασεισμός μεγέθους *M_W*=5.4, σε απόσταση < 2km από το κέντρο της πόλης Christchurch (Εικόνες 5.6 & 5.7), αποτέλεσμα δεξιόστροφης οριζόντιας μετακίνησης (Bannister, 2011). Ο σεισμός προκάλεσε σημαντικές καταστροφές στο κέντρο της πόλης, με μέγιστη εδαφική επιτάχυνση (PGA) έως 0.4g, όπως μετρήθηκε στο Βοτανικό Κήπο Christchurch και 0.2g στην υπόλοιπη πόλη (Webb et al., 2011). Εκδηλώθηκαν επίσης 23 σεισμοί έντασης 7 (κλίμακα Mercalli).

Αυτός ο σεισμός συνοδεύτηκε από μια σύντομη ακολουθία των σεισμών κατά τις επόμενες ώρες, οι δυο μεγαλύτερες μεγέθους M_L =4.6 και M_L =4.4 (Webb et al., 2011), και στη συνέχεια με περισσότερες από 30 εκδηλώσεις σε κοντινή απόσταση μέσα στις επόμενες 3-4 εβδομάδες. Ο αρχική σεισμός M_W =4.7 εκδηλώθηκε σε βάθος 4,0 km, με επίκεντρο 1,8 km βορειοδυτικά του κέντρου της πόλης Christchurch (Bannister, 2011), ενώ τα περισσότερα από τα σεισμικά γεγονότα που ακολούθησαν σημειώθηκαν σε βάθη μεταξύ 3,5 και 7 km, σε έκταση μικρότερη του 1km² σε περιοχή, με επίκεντρα 1km βορειοανατολικά από το κέντρο της πόλης. Το βάθος κατανομής των μετασεισμών είναι σταθερό και εντοπίζονται σε ένα ρήγμα με μεγάλη κλίση της τάξης των 74°.

Ακολουθεί το διάγραμμα χρονοσειράς των εκδηλωθέντων σεισμών της ευρύτερης περιοχής του Canterbury για το διάστημα Σεπτέμβριος 2010 – Φεβρουάριος 2012, όπως καταγράφηκαν από το δίκτυο σεισμογράφων που εγκατέστησε η GeoNet στην περιοχή, συναρτήσει του τοπικού μεγέθους *M*_L (Εικόνα 5.11).



Εικόνα 5.11 Χρονοσειρά εκδηλωθέντων σεισμών, από Σεπτέμβριο 2010 έως Φεβρουάριο 2012 στην ευρύτερη περιοχή του Canterbury, όπως μετρήθηκαν από το δίκτυο σεισμογραφών που εγκατέστησε η GeoNet στην περιοχή. Το διάγραμμα δίνεται συναρτήσει του τοπικού μεγέθους *M*_L (Bannister & Gledhill 2012).

5.4 Επιφανειακές διαρρήξεις σεισμού Darfield (04/09/2010)

Ιδιαίτερα έντονες εντοπίστηκαν οι επιφανειακές διαρρήξεις και οι μετατοπίσεις που προκλήθηκαν με το σεισμό του Darfield (*M_W* = 7.1), επηρεάζοντας οδικά δίκτυα και δίκτυα κοινής ωφελείας.

Ο σεισμός προκάλεσε μια επιφανειακή ζώνη διάρρηξης και παραμόρφωσης μήκους 29,5 ± 0,5km και εύρους 30 έως 300m. Η οριζόντια μετατόπιση που προκλήθηκε έχει μέγιστη τιμή 5,2 ± 0,2m και η κατακόρυφη μετατόπιση 1,45 ± 0,2m (Quigleyet al., 2010a, 2012) (Εικόνα 5.12). Τα συμπεράσματα που εξήχθησαν από τη μελέτη της επιφανειακής διάρρηξης του σεισμικού ρήγματος Greendale, σε συνδυασμό σε σεισμολογικά και γεωδαιτικά δεδομένα, συνέβαλαν σημαντικά στον προσδιορισμό του πολύπλοκου μηχανισμού διάρρηξης του σεισμού του Darfield (Beavan et al., 2010, Gledhill et al., 2010, 2011, Holden et al., 2011).

Στην Εικόνα 5.12, δίνονται οι χαρτογραφηθείσες επιφανειακές διαρρήξεις του ρήγματος Greendale, όπως αποτυπώθηκαν με τη χρήση τεχνικής LIDAR (Light Detection And Ranging), με ακρίβεια 0,5m, κατά μήκος του ρήγματος Greendale, ενώ στην Εικόνα 4.15 δίνεται μια λεπτομερέστερη άποψη τμήματος του ρήγματος (Villamor et al., 2012).

Η πολυπλοκότητα στην εκδηλωθείσα επιφανειακή διάρρηξη αποτελεί χαρακτηριστικό γνώρισμα του σεισμού του Darfield (04/09/2011). Ο σεισμός που σημειώθηκε στο Darfield οφείλεται σε προηγουμένως άγνωστα ρήγματα. Η σχετικά ταχεία ανύψωση των Νοτίων Άλπεων, σε σύγκριση με την περιοχή προς τα ανατολικά, είχε ως αποτέλεσμα την ταχεία εναπόθεση στα τέλη του Τεταρτογενούς προσχωσιγενών – ποταμοχειμάριων αποθέσεων στην πεδιάδας του Canterbury. Τα προσχωσιγενή υλικά, αποτελούμενα από αμμοϊλύες και χαλίκια έχουν πάχος τουλάχιστον 500m. Σε όλο το διάστημα της απόθεσης των υλικών αυτών και για διάστημα περίπου 16.000 χρόνια, δεν εκδηλώθηκε σεισμός που να οφείλεται στο ρήγμα του Greendale, με αποτέλεσμα τα ιζήματα να μην υποστούν κάποια παραμόρφωση (Green et al., 2010).

Ενώ το μεγαλύτερο μέρος της εκλυόμενης σεισμικής ενέργειας ήταν αποτέλεσμα οριζόντιας μετατόπισης του ρήγματος Greendale, η διάρρηξη είχε πιο περίπλοκο χαρακτήρα, περιλαμβάνοντας διάφορα άλλα ρήγματα που βρίσκονται στα ανατολικά και δυτικά των τμημάτων του ρήγματος Greendale.

Η πολυπλοκότητα που προαναφέρθηκε, τεκμηριώνεται από τα διαγράμματα ισχυρής εδαφικής κίνησης που κατεγράφησαν σε διάφορους σεισμολογικούς σταθμούς στην εγγύς περιοχή, σύμφωνα με τον Bradley, B.A. (2012). Ακολουθούν οι Εικόνες 5.16α, β & γ, όπου απεικονίζονται τα διαγράμματα χρονοσειρών της οριζόντιας, παράλληλης και κατακόρυφης καταγραφόμενης επιτάχυνσης σε διάφορους σεισμολογικούς σταθμούς, ενώ στις Εικόνες 5.17α & β δίνονται οι χρονοσειρές της ισχυρής εδαφικής κίνησης και της ταχύτητας μετάδοσης των σεισμικών κυμάτων.



Εικόνα 5.12 Αποτύπωση επιφανειακών διαρρήξεων, κατά μήκος του ρήγματος Greendale, όπως προέκυψαν από δεδομένα LIDAR (Light Detection And Ranging) [Villamor et al., (2012)].



Εικόνα 5.13 Λεπτομερέστερη απεικόνιση της περιοχής που περιλαμβάνεται σε λευκό πλαίσιο στην εικόνα G της Εικόνας 4.16 του κειμένου [Villamor et al., (2012)].



Εικόνα 5.13 (Συνέχεια) Στην εικόνα G της παρούσας, απεικονίζονται οι διελεύσεις που αποκάλυψαν σημεία (κόκκινα & κίτρινα) με εμφανή οριζόντια μετατόπιση, όπως διαπιστώθηκε επί τόπου (Villamor et al., 2012).



Εικόνα 5.14α Αεροφωτογραφία επιφανειακής διάρρηξης τμήματος του ρήγματος Greendale, όπου διακρίνεται η χαρακτηριστική "en echelon" πορεία του ρήγματος. (Quigley et al., 2010).



Εικόνα 5.14β Αεροφωτογραφία επιφανειακής διάρρηξης τμήματος του ρήγματος Greendale, όπου διακρίνεται η χαρακτηριστική "en echelon" πορεία του ρήγματος. (<u>http://info.geonet.org.nz/display/guake/Landslides+and+faulting</u>).



Εικόνα 5.15 Δεξιόστροφη μετατόπιση φράχτη και δεντροστοιχίας, περίπου 3.5m, αποτέλεσμα της μετατόπισης του ρήγματος Greendale (Quigley et al., 2010).



Εικόνα 5.16α Διαγράμματα χρονοσειρών παρατηρούμενης οριζόντιας επιτάχυνσης σε διάφορους σεισμολογικούς σταθμούς της εγγύς περιοχής (Bradley 2012).



Εικόνα 5.16β Διαγράμματα χρονοσειρών παρατηρούμενης παράλληλης επιτάχυνσης σε διάφορους σεισμολογικούς σταθμούς της εγγύς περιοχής (Bradley 2012).



Εικόνα 5.16γ Διαγράμματα χρονοσειρών παρατηρούμενης κατακόρυφης επιτάχυνσης σε διάφορους σεισμολογικούς σταθμούς της εγγύς περιοχής (Bradley 2012).



της



Εικόνα 5.18 Οριζόντια μετατόπιση δρόμου στη διέλευση του ρήγματος (<u>http://www.geodifhs.com/uploads/3/1/6/8/3168846/zealand_seismos.pdf</u>).



Εικόνα 5.19 Παραμόρφωση γραμμών τρένου στη διέλευση του ρήγματος. (<u>http://www.asce.org/uploadedFiles/Technical Groups and Institutes/TCLEE/T</u> <u>CLEE%20Preliminary%202010%20NZ%20EQ%20Report.pdf</u>)



Εικόνα 5.20 Προσωπικό του *Institute of Geological and Nuclear Sciences Limited* (GNS Science), λίγες ημέρες μετά το κύριο σεισμό, μετρά δεξιόσροφη οριζόντια μετατόπιση σε φράχτη, 10km ανατολικά του Greendale (Litchfield, N.J., et al., 2014 - http://www.eqc.govt.nz/sites/public_files/3780-Detailed-analysis-Greendale-fault%281of2%29.pdf).

Η κατανομή των επιφανειακών διαρρήξεων εντοπίζεται σχεδόν συμμετρική κατά μήκος του ρήγματος Greendale. Περίπου 6km διαρρήξεων, στα ακραία τμήματα του ρήγματος, έχουν συνολική μετατόπιση μικρότερη από 1,5m και ένα τμήμα μήκους 8km έχει μετατόπιση >4m, με μέγιστη τιμή τα 5m (Εικόνα 5.21). Το σεισμικό ρήγμα έχει σημαντικά μεγάλη επιφανειακή μετατόπιση κατά μήκος της διάρρηξής του (τόσο η μέση όσο και η μέγιστη), συγκριτικά με το μήκος της επιφανειακής διάρρηξης (Quigley et al., 2010).

Net surface rupture displacement	Cumulative length of surface rupture
< 1.5 m	12 km
1.5 to 2.5 m	3 km
2.5 to 4 m	6.5 km
> 4 m	8 km
Average ~2.5 m	Total ~29.5 km
Maximum ~5 m	

Εικόνα 5.21 Συγκριτικός πίνακας επιφανειακής μετατόπισης και αντίστοιχου μήκους διάρρηξης (Quigley et al., 2010).

Στην ευρύτερη περιοχή του Darfield είχε εγκατασταθεί το 2004 από το Institute of Geological and Nuclear Sciences Limited (GNS Science), δίκτυο 190 γεωδαιτικών σημείων, τα οποία μετά το σεισμό προσέφεραν πολύ σημαντικές πληροφορίες

αναφορικά με την προκληθείσα μετατόπιση, σε διανυσματική μορφή. Σύμφωνα με τους Blick et al., (2011), το δίκτυο χρησιμοποιήθηκε για τον προσδιορισμό τόσο των κατακόρυφων, όσο και των οριζόντιων μετατοπίσεων, οπότε προέκυψε ο χάρτης της Εικόνας 4.25.

Τα αποτελέσματα των μετρηθέντων μετατοπίσεων έδειξαν σημαντική μετατόπιση σε μια ευρεία περιοχή (Εικόνα 5.22). Κοντά στο ρήγμα Greendale μετρήθηκαν οριζόντιες κινήσεις πάνω από 2m και κατακόρυφες κινήσεις πάνω από 1m. Κατά μήκος της πόλης του Christchurch οι κινήσεις παρουσίασαν γενικά ομοιόμορφη κατανομή, αλλά μερικά σημάδια έδειξαν ανώμαλες κινήσεις, τόσο κάθετα όσο και οριζόντια. Τα σημεία αυτά βρίσκονται σε περιοχές όπου η εντοπισμένη μετατόπιση των γεωδαιτικών σημείων ήταν αποτέλεσμα εδαφικής ρευστοποίησης.



Εικόνα 5.22 Οριζόντιες (μαύρα διανύσματα) και κατακόρυφες (μπλε διανύσματα) μετατοπίσεις που προκλήθηκαν από το σεισμό του Darfield στην ευρύτερη περιοχή του σεισμικού ρήγματος (Blick, et al., 2011).

(http://www.fig.net/pub/monthly_articles/september_2011/september_2011_blick_beavan_et_al.pdf).

5.5 Πλευρικές εξαπλώσεις και φαινόμενα ρευστοποίησης σεισμού Darfield (04/09/2010)

Κατά τη διάρκεια του ισχυρού σεισμού του Darfield το 2010, εκτεταμένα φαινόμενα πλευρικής εξάπλωσης και ρευστοποίησης εδαφών συνέβησαν σε διάφορα μέρη της πόλης του Christchurch (πιο εκτεταμένα στα προάστια, στα ανατολικά του κέντρου της πόλης, αλλά και σε πιο εντοπισμένες περιοχές στα βόρεια και νοτιοδυτικά από την πόλη), στην πόλη του Kaiapoi και σε παραλιακούς οικισμούς κοντά στον ποταμό Waimakariri. Η ρευστοποίηση του εδάφους και η συνοδεύουσα αυτής παραμόρφωση και αστοχία, οδήγησε σε σημαντικές ζημιές σε κατοικημένα σπίτια και κρατικές εγκαταστάσεις.

Ιδιαίτερα έντονες ήταν οι βλάβες που προκλήθηκαν από την πλευρική εξάπλωση, η οποία ήταν πολύ εκτεταμένη και ιδιαίτερα σοβαρή σε περιοχές του νότιου Kaiapoi (και πολύ σοβαρή, στις περιοχές του Bexley, Spencerville, και του βόρειου Kaiapoi (Green et al., 2010).

Ως πλευρική εξάπλωση (lateral spreading) ορίζεται η πλευρική μετακίνηση εδαφικού υλικού, που διευκολύνεται από διατμητικές και εφελκυστικές ρωγμές (Κούκης & Σαμπατακάκης, 2007).

Η προκαλούμενη, κατά τη διάδοση των σεισμικών κυμάτων, εφαρμογή κυκλικών διατμητικών τάσεων οδηγεί τους κορεσμένους χαλαρούς αμμώδεις σχηματισμούς σε συμπύκνωση. Όμως σε αστράγγιστες συνθήκες, η αδυναμία μεταβολής του όγκου τους έχει ως αποτέλεσμα τη μεταφορά της πίεσης στο νερό των πόρων. Αυτή η διαδικασία επιφέρει την αύξηση της πίεσης των πόρων με αποτέλεσμα τη μείωση έως και μηδενισμό της διατμητικής αντοχής του εδαφικού σχηματισμού και την μετατροπή της κατάστασής του σε ρευστή. Το έδαφος θα επανέλθει στην στερεή του κατάσταση μετά την εκτόνωση της πίεσης του νερού των πόρων, με την ροή του νερού προς την επιφάνεια. Συγχρόνως, πραγματοποιείται αύξηση της πυκνότητας του εδαφικού σχηματισμού και μείωση του όγκο του. Ο όρος ο οποίος χρησιμοποιήθηκε για την παραπάνω διαδικασίας είναι «ρευστοποίηση εδαφικών περιγραφή της σχηματισμών» (soil liquefaction) (Παπαθανασίου 2006).

Το μεγαλύτερο ποσοστό των πλευρικών εξαπλώσεων που εκδηλώθηκαν στο σεισμό του Darfield, αποδίδεται στην εδαφική ρευστοποίηση. Ιδιαίτερα έντονα φαινόμενα ρευστοποίησης και πλευρικής εξάπλωσης εντοπίστηκαν στις πόλεις Christchurch και Kaipoi, οι οποία καλύπτεται από ποτάμιες-ποταμοχειμάριες αποθέσεις Ολοκαίνου, πολύ χαμηλής συνοχής, με υψηλό ποσοστό φυσικής υγρασίας. Ακολουθεί χάρτης κινδύνου σε ρευστοποίηση εδαφών (Εικόνα 5.24), της ευρύτερης περιοχής του Christchurch. Αρκετές βλάβες, αποτέλεσμα ρευστοποίησης, εντοπίστηκαν και στην πόλη Dagupan. Η πόλη καλύπτεται από ολοκαινικές αποθέσεις παλαιών ποταμών και παλαιοχειμάρρων, η κοίτη των οποίων άλλαξε. Τα υλικά της περιοχή αυτής αποτελούνται από χαλαρές αποθέσεις ιλύος και άμμου, ιδιαίτερα επιδεκτικών προς ρευστοποίηση κατά τη διάρκεια σεισμών (Orense 2011).



Εικόνα 5.23 Κοκκομετρική διαβάθμιση αμμώδους υλικού που συλλέχθηκε από κρατήρες άμμου, σε σημεία ρευστοποιήσεων, στην πόλη Dagupan, μετά το σεισμό του Darfield -04/09/2010 (Orense 2011).



Εικόνα 5.24 Χάρτης κινδύνου σε ρευστοποίηση της ευρύτερης περιοχής του Christchurch. (http://ecan.govt.nz/publications/General/solid-facts-christchurch-liquefaction.pdf)



Εικόνα 5.25α Φαινόμενο ρευστοποίησης στην περιοχή του Christchurch, αποτέλεσμα του ισχυρού σεισμού του Darfield.

(https://www.flickr.com/photos/leptinella/4955664673/in/photostream/)



Εικόνα 5.25β Φαινόμενο ρευστοποίησης στην περιοχή του Christchurch, αποτέλεσμα του ισχυρού σεισμού του Darfield. (<u>https://www.flickr.com/photos/leptinella/4966846475/</u>)



Εικόνα 5.26α Επιμήκεις ρωγμές σε αναχώματα λόγω πλευρικής εξάπλωσης στις όχθες του ποταμού Waimakariri (Eidinger et al., 2010).



Εικόνα 5.26β Πλευρική εξάπλωση αποτέλεσμα ρευστοποίησης (Green & Cubrinovski 2010).

6. Μετασεισμός Christchurch (22/02/2011), *M*_w=6.2

6.1 Γενικά στοιχεία σεισμού

Ο ισχυρός μετασεισμός του Christchurch στις 22/02/2011 (23:51 μ.μ. τοπική ώρα) είχε μέγεθος M_W =6.2 (M_L =6.3), προκάλεσε μεγάλες καταστροφές στην πόλη και αφαίρεσε τη ζωή από 185 ανθρώπους. Ακολούθησε σχεδόν έξι μήνες μετά το σεισμό μεγέθους M_W =7.1 του Darfield της 4ης Σεπτεμβρίου 2010, η οποία προκάλεσε σημαντικές καταστροφές στο Christchurch και την κεντρική περιοχή Canterbury, αλλά καμία ανθρώπινη απώλεια.

Το επίκεντρο του σεισμού εντοπίζεται κοντά στην πόλη Lyttelton (συντεταγμένες 43.5834°N 172.7012°A), 2km δυτικά του λιμανιού της πόλης του Lyttelton, και 10km νοτιοανατολικά από το κέντρο του Christchurch, τη δεύτερη πιο πυκνοκατοικημένη πόλη της Νέας Ζηλανδίας και σύμφωνα με την κλίμακα Mercalli (Πίνακας 5.1), η μέγιστη ένταση που σημειώθηκε ήταν 9.

(http://en.wikipedia.org/wiki/2011 Christchurch earthquake).

Χαρακτηριστικό του ισχυρού σεισμού ήταν η μεγάλη τιμή της μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης (PGA), που έφτασε έως τα 1.88g εντός της πόλης και 2.2g στο επίκεντρο του σεισμού.

Ο σεισμός προκάλεσε εκτεταμένες ζημιές σε όλο το Christchurch, ειδικά στο κέντρο της πόλης και στα ανατολικά προάστια. Οι κτιριακές υποδομές που είχαν ήδη πληγεί και αποδυναμωθεί από τον ισχυρό σεισμό του Darfield, 5,5 μήνες νωρίτερα (04/09/2010), καθώς και από την έντονη μετασεισμική του ακολουθία, επλήγησαν σφοδρά, από τον ρηχό σεισμό μεγέθους με αποτέλεσμα οι καταρρεύσεις και αστοχίες κτιριακών υποδομών να είναι πολύ εκτεταμένες.

Εκτεταμένα φαινόμενα ρευστοποίησης και πλευρικής εξάπλωσης επηρέασαν τα ανατολικά προάστια, ενώ παράχθηκαν κατά τη διάρκεια του σεισμού, λόγω ρευστοποίησης, περίπου 400.000 τόνους αμμοϊλύος, προκαλώντας σοβαρές βλάβες σε οδικά δίκτυα, δίκτυα κοινής ωφελείας και κτίρια. Μεγάλες καταπτώσεις βράχων και κατολισθήσεις αναφέρθηκαν στην περιοχή του Lyttleton και στα ανατολικά προάστια του Sumner και Redcliffs, ορισμένα από τα οποία σε προκάλεσαν καταστροφές σε σπίτια και τουλάχιστον πέντε θανάτους.

Ο ρηχός αυτός σεισμός, μεγέθους *M*_L=6.3, έγινε αισθητός σε όλο το Νότιο Νησί της Νέας Ζηλανδίας και στο κάτω και κεντρικό Βόρειο Νησί. Ενώ ο αρχικός σεισμός κράτησε μόνο περίπου 10 sec, η περιοχή και το βάθος της θέσης του στο Christchurch,

σε συνάρτηση με τους των προηγούμενους σεισμούς, ήταν οι αιτίες της τόσο μεγάλης καταστροφής.

Η αποζημίωση που δόθηκε στους κατοίκους των πληγεισών περιοχών έφτασε το ποσό των 15 δισ. δολαρίων Νέας Ζηλανδίας, ενώ το συνολικό κόστος στο κράτος ανήλθε στο ποσό των 40 δισ. δολαρίων Νέας Ζηλανδίας. Αυτό κατατάσσει το σεισμό στον πιο κοστοβόρο στην ιστορία της Νέας Ζηλανδία και στον τρίτο πιο κοστοβόρο στην ιστορία της Νέας Ζηλανδία και στον τρίτο πιο κοστοβόρο στην παγκόσμια ιστορία. Μερικοί οικονομολόγοι έχουν υπολογίσει η οικονομία της Νέας Ζηλανδίας θα ανακάμψει πλήρως σε 50 έως 100 χρόνια. Ακολούθησε ένας μεγάλο μετασεισμός στις 13 Ιουνίου (ο οποίος προκάλεσε σημαντικές πρόσθετες βλάβες) και μια σειρά μεγάλων σεισμών στις 23 Δεκεμβρίου 2011.

6.2 Σεισμολογικά δεδομένα σεισμού Christchurch

Το επίκεντρο του σεισμού του Christchurch δίνεται στην Εικόνα 5.3. Η Εικόνα 6.2 απεικονίζει το μηχανισμό γένεσης του κύριου σεισμού και των κυριότερων μετασεισμών που ακολούθησαν τις επόμενες 10 ημέρες (Hancox et al., 2011). Ο κύριος σεισμός και δύο ακόμη μετασεισμοί έχουν μηχανισμούς που αντιστοιχούν σε ανάστροφο (επωθητικό) ρήγμα. Δύο σεισμικά γεγονότα μακρύτερα προς τα δυτικά έχουν κυρίως ανάστροφη συνιστώσα κίνησης μπορούν να θεωρηθούν ως μέρος της μετασεισμικής ακολουθία του Σεισμού του Darfield (04/09/2010 *M*_w=7.1) και όχι του σεισμού του Christchurch. Οι περισσότεροι από τους υπόλοιπους μηχανισμούς γένεσης παραπέμπουν σε οριζόντιας μετατόπισης ρήγματα, αν και η διεύθυνση του επιπέδου του ρήγματος είναι κυμαινόμενη.



Εικόνα 6.1α Εκτεταμένη ρευστοποίηση στο κέντρο του Christchurch, κατά το σεισμό του Christchurch στις 22/02/2011.



Εικόνα 6.1β Πλευρική εξάπλωση που προκλήθηκε με το σεισμό του Christchurch (22/02/2011). https://www.blendspace.com/lessons/etybZQvLizNylQ/christchurch-earthquake-effects-on-the-natural-environment



Εικόνα 6.1γ Πλευρική εξάπλωση που προκλήθηκε με το σεισμό του Christchurch στις 22/02/2011 (Hancox et al., 2011).



<u>011</u>).

Ο σεισμός του Christchurch, μεγέθους M_L =6.3, ήταν πιθανώς ένας μετασεισμός του ισχυρού σεισμού του Darfield μεγέθους M_W =7.1 (04/09/2010) [Shcherbakov et al., 2012]. Ενώ το Γεωλογικό Ινστιτούτο της Νέας Ζηλανδίας GNS Science τον περιγράφει ως «τεχνικά ένα μετασεισμό» της προηγούμενης σεισμικής εκδήλωσης, άλλοι σεισμολόγοι, συμπεριλαμβανομένων εκείνων που προέρχονται από τις ΗΠΑ και την Geoscience της Αυστραλίας, υποστηρίζουν πως αποτελεί μια ξεχωριστή εκδήλωση, λόγω της θέσης εκδήλωσης της διάρρηξης σε ένα χωριστό σύστημα ρηγμάτων από το ρήγμα Greendale, που προκάλεσε το σεισμό του Darfield. Ο σεισμός του Christchurch προκάλεσε μια σημαντική ακολουθία μετασεισμών, πολλοί από τους οποίους θεωρούνται μεγάλου μεγέθους για το συγκεκριμένο μέγεθος του σεισμού. Κατά την πρώτη εβδομάδα εκδηλώθηκαν 361 μετασεισμοί (μέγεθους M_L >3), ενώ το μεγαλύτερο μέγεθος που καταγράφηκε έφτασε M_L =5.9, το οποίο συνέβη σε λιγότερο από 2 ώρες μετά τον κύριο σεισμό. Ένας ισχυρός μετασεισμός μεγέθους M_L =5.3 εκδηλώθηκε στις 16 Απριλίου 2011 και αποτέλεσε για αρκετές εβδομάδες το μεγαλύτερο μετασεισμό και προκάλεσε τις μεγαλύτερες βλάβες, συμπεριλαμβανομένων των διακοπών ρεύματος και αρκετών μεγάλων καταπτώσεις βράχων.

Ένας άλλος μετασεισμός έπληξε την περιοχή του Christchurch στις 10 Μαΐου 2011 προερχόμενος από το ρήγμα Greendale μεγέθους *M*_L=5.3. Προκάλεσε διακοπή ρεύματος για λίγα λεπτά και επιπλέον ζημιές σε κτίρια στο κέντρο της πόλης. Δεν αναφέρθηκαν θάνατοι ή τραυματισμοί, ενώ έγινε αισθητός στις πόλεις Dunedin και Greymouth, που απέχουν 385km και 170km από το επίκεντρο του σεισμού.

Στις 6 Ιουνίου 2011, μια μεγάλη σεισμική δόνηση σημειώθηκε, μεγέθους *M_L*=5.5. Η σεισμική δόνηση έγινε αισθητή στις πόλεις Kaikoura και Oamaru που απέχουν 150km και 220km από το επίκεντρο του σεισμού.3

Στις 13 Ιουνίου, εκδηλώθηκε μια σειρά μετασεισμών με τον μεγαλύτερο να έχει μέγεθος *M*_L=6.3 και εστιακό βάθος 6km, ενώ το επίκεντρο του σεισμού εντοπίζεται 10km ανατολικά της πόλης του Christchurch. Η παροχή ρεύματος διεκόπη στην πόλη για 54.000 οικίες και εκτεταμένες ζημιές και φαινόμενα ρευστοποίησης εκδηλώθηκαν στις ήδη πληγείσες περιοχές. Ο καθεδρικός ναός του Christchurch υπέστη περαιτέρω ζημιές και τουλάχιστον 46 άνθρωποι τραυματίστηκαν.

Οι αρχικές εκθέσεις των σεισμολόγων ανέφεραν πως η ισχυρή σεισμική δόνηση του Christchurch, μεγέθους *M*_L=6.3, εκδηλώθηκε σε εστιακό βαθος 5km, ενώ αργότερα το βάθος αυτό αναθεωρήθηκε. Πρόσφατες εκθέσεις αναφέρουν πως η διάρρηξη του σεισμικού ρήγματος εκδηλώθηκε σε μια προηγουμένως άγνωστη γραμμή ρήγματος που τοποθετείται 17km από ανατολή προς δύση από το Scarborough Hill, βορειοανατολικά του Christchurch, έως το Halswell, σε εστιακά βάθη από 3km έως 12km. Το Γεωλογικό Ινστιτούτο της Νέας Ζηλανδίας (GNS Science), θεωρεί πως ο σεισμός προκλήθηκε από ένα ρήγμα 16km, που εντοπίζεται στο νότιο άκρο της επαρχίας Avon-Heathcote, είχε εστιακό βάθος 1-2km και κλίνει με γωνία 65°, κάτω από την περιοχή του Port Hills. Παρόλο που η διάρρηξη δεν εκδηλώθηκε επιφανειακά, δορυφορικές εικόνες έδειξαν μετατόπιση νότια του ρήγματος περίπου 50cm δυτικά και προς τα πάνω. Στην περιοχή του Port Hills μετρήθηκαν ανυψωτικές κινήσεις της επιφάνειας του εδάφους έως και 40cm.

Ο σεισμός προκλήθηκε από οριζόντια μετατόπιση του ρήγματος, έχοντας και μια μικρή κατακόρυφη ανάστροφη συνιστώσα. Η ένταση του σεισμού στο Christchurch, σύμφωνα με την κλίμακα Mercalli, ήταν 8 (βλ. Πίνακα 5.1). Η κατακόρυφη εδαφική επιτάχυνση μετρήθηκε μεγαλύτερη από την οριζόντια. Η μέγιστη εδαφική επιτάχυνση (PGA) στο κεντρικό Christchurch ξεπέρασε τα 1.8g, ενώ η μέγιστη καταγραφόμενη τιμή άγγιξε τα 2.2g στην περιοχή του Δημοτικού Σχολείου στην Heathcote Valley, με ένταση σεισμού10+ σύμφωνα με την κλίμακα Mercalli (βλ. Πίνακα 5.1). Αυτή η τιμή PGA είναι η μέγιστη καταγραφόμενη στη Νέα Ζηλανδία. Η μέγιστη καταγραφόμενη τιμή PGA στο

σεισμό του Darfield (04/09/2010), ήταν 1.26g κοντά στο Darfield. Η μέγιστη τιμή PGA (2.2q) που καταγράφηκε στο σεισμό του Christchurch, αποτελεί μία από τις μεγαλύτερες εδαφικές επιταχύνσεις στον κόσμο και είναι ασυνήθιστα υψηλή για ένα σεισμό μεγέθους M_L=6.3, καθώς αποτελεί και την μεγαλύτερη καταγραφόμενη στην κατακόρυφη συνιστώσα. Προς σύγκριση, αναφέρεται πως ο σεισμός της Αϊτής (12/01/2010), μεγέθους M_w =7.0, παρουσίασε PGA 0.5g. Η σεισμική επιτάχυνση πραγματοποιήθηκε κυρίως στην κατακορυφη συνιστώσα, κάτι το οποίο έγινε ιδιαίτερα αισθητό από τους κατοίκους, ορισμένοι εκ των οποίων πετάχτηκαν κυριολεκτικά στον αέρα. Η προς τα πάνω (θετική) επιτάχυνση ήταν υψηλότερη από την προς τα κάτω, η οποία παρουσίασε μέγιστη τιμή 0.9q. Η μέγιστη καταγραφόμενη οριζόντια επιτάχυνση μετρήθηκε 1.7g. Η εδαφική επιτάχυνση που σημειώθηκε στο σεισμό του Christchurch, θα μπορούσε να ισοπεδώσει ολοκληρωτικά, τις περισσότερες πόλεις του κόσμου, κάτι το οποίο δεν έγινε στη συγκεκριμένη περίπτωση, λόγω των πολύ αυστηρών αντισεισμικών κανονισμών που επικρατούν στη Νέα Ζηλανδία, αλλά και του γεγονότος πως η πιο σφοδρή σεισμική κίνηση διήρκησε μόλις 12 sec, οπότε αποφεύχθηκαν οι εκτεταμένες ζημιές.

Παρόλο που ο σεισμός του Christchurch ήταν μικρότερου μεγέθους από αυτόν του Darfield, ήταν πιο καταστροφικός και θανατηφόρος για τους εξής λόγους:

- Το επίκεντρο του σεισμού ήταν πολύ κοντά στην πόλη του Christchurch και ρηχό, στα 5km μόλις από την επιφάνεια του εδάφους, ενώ ο σεισμός του Darfield είχε επίκεντρο στα 10km βάθος.
- Ο σεισμός του Christchurch έγινε μεσημεριανή ώρα καθημερινής ημέρας.
- Οι κτιριακές υποδομές ήταν ήδη δομικά εξασθενημένες από το σεισμό του
 Darfield και τους πολλούς μετασεισμούς που ακολούθησαν.
- Η μέγιστη εδαφική επιτάχυνση ήταν γενικά εξαιρετικά υψηλή, όσο και ειδικά, σε σχέση με το μέγεθος του σεισμού.
- Τα κτίρια επλήγησαν τόσο από έντονη κατακόρυφη, όσο και από οριζόντια εδαφική μετακίνηση, κάτι το οποίο δομικά είναι καταστροφικό.
- Η εδαφική ρευστοποίηση ήταν σημαντικά μεγαλύτερη και εκτενέστερη, συγκριτικά με το σεισμό του Darfield. Συγκεκριμένα, περισσότεροι από 200.000 τόνοι ιλύος, απαιτήθηκε να καθαριστούν. Η εκτεταμένη ρευστοποίηση προκάλεσε σημαντικές εδαφικές μετατοπίσεις, υποσκάπτοντας πολλές θεμελιώσεις κτιρίων και καταστρέφοντας κτιριακές υποδομές.

Παρόλο που οι σεισμοί του 2010 & 2011 εκδηλώθηκαν κατά την ενεργοποίηση «τυφλών» και μέχρι τότε άγνωστων ρηγμάτων, η Επιτροπή Σεισμών της Νέας Ζηλανδίας (New Zealand's Earthquake Commission), συνέταξε το 1991 μια εκτενή αναφορά, η οποία προέβλεπε την εκδήλωση μέσου μεγέθους σεισμών στην περιοχή του Canterbury, οι οποίοι συσχετίζονταν με τις αντίστοιχες πιθανότητες εκδήλωσης φαινομένων ρευστοποίησης (Elder, McCahon, Yetton, 1991).

7. Συμπεράσματα

Συμπερασματικά αναφέρονται τα εξής:

- Οι ισχυρές σεισμικές ακολουθίες που εκδηλώθηκαν στις 04/09/2010 στο Darfield και στις 22/02/2011 στο Christchurch της Νέας Ζηλανδίας, έγιναν αντικείμενο μελέτης από πολλά πανεπιστήμια του κόσμου, λόγω της ενεργοποίησης ρηγμάτων-ρηξιγενών ζωνών, που έως τότε δεν είχαν και μελετηθεί, επειδή δεν δραστηριοποιήθηκαν για διάστημα τουλάχιστον 16000 ετών.

- Η περίπλοκη γεωλογική δομή της Νέας Ζηλανδίας είναι αποτέλεσμα της έντονης τεκτονικής δραστηριότητας που εκδηλώνεται, η οποία οφείλεται στο γεγονός ότι η χώρα βρίσκεται στο όριο σύγκρουσης και υποβύθισης δύο μεγάλων τεκτονικών πλακών, της πλάκας της Αυστραλίας στα ΒΔ και της πλάκας του Ειρηνικού στα ΝΑ, καθώς ταυτόχρονα με την υποβύθιση εντοπίζεται και έντονη η οριζόντια συνιστώσα, προκαλώντας δεξιόστροφη μετακίνηση της χώρας, της τάξης των 37-47mm/έτος. Αποτέλεσμα των μετακινήσεων αυτών είναι η εκδήλωση ισχυρών σεισμών οι οποίοι είναι πολύ συχνό φαινόμενο για την ιστορία της Νέας Ζηλανδίας.

Ο ισχυρός σεισμός που εκδηλώθηκε στις 04/09/2010 στην περιοχή Darfield της
 Νέας Ζηλανδίας, είχε μέγεθος Mw=7.1 και επίκεντρο στην πόλη Darfield, 45 km δυτικά
 από την πόλη Christchurch

Το εστιακό βάθος, σύμφωνα με την Γεωλογική Υπηρεσία της Νέας Ζηλανδίας,
 ήταν 10 km. Ο σεισμός δεν είχε ευτυχώς ανθρώπινα θύματα, αλλά προξένησε πολλές
 βλάβες σε κατοικίες και τεχνικά έργα και σημαντικές εδαφικές παραμορφώσεις και
 αστοχίες.

- Ο σεισμός συνέβη σε μια περιοχή που είχε στο παρελθόν εκδηλώσει λίγους σεισμούς σε σύγκριση με άλλες περιοχές του νότιου νησιού. Υπάρχουν κάποια χαρτογραφημένα ρήγματα στην περιοχή, αλλά η διάρρηξη συνέβη κατά μήκος μιας προηγουμένως άγνωστης ρηξιγενούς γραμμής με διεύθυνση Ανατολή-Δύση.

- Η επιφανειακή μετατόπιση στο ρήγμα του Greendale, που αποτελεί και το σεισμικό ρήγμα του σεισμού του Darfield, ήταν κυρίως δεξιόστροφη οριζόντιας μετατόπισης, με μέση οριζόντια μετατόπιση της τάξης των 2,5 m και μέγιστες μετατοπίσεις της τάξης των 5 m οριζοντίως και 1,5 m καθέτως, όπως μετρήθηκε στην επιφάνεια.

 Η κατανομή των μετασεισμών που εκδηλώθηκαν στις πρώτες εβδομάδες μετά τον κύριο σεισμό του Darfield, υποδεικνύουν μια συστάδα μετασεισμών που συγκεντρώνονται στο ανατολικότερο τμήμα του επιφανειακού ίχνους του ρήγματος Greendale.

Η διάρρηξη του ρήγματος Greendale σταμάτησε στην θέση που διασταυρώθηκε
 με ένα προηγουμένως άγνωστο τυφλό δεξιόστροφο ρήγμα, το οποίο 1-2 εβδομάδες
 μετά τον κύριο σεισμό, ενεργοποιήθηκε.

- Οι μηχανισμοί γένεσης των μετασεισμών υποδηλώνουν τόσο οριζόντιας μετατόπισης, όσο και κανονικά ρήγματα.

Πάνω από 7300 μετασεισμοί έγιναν αισθητοί, εκ των οποίων περισσότεροι από
 100 είχαν ένταση επάνω από 8, σύμφωνα με την κλίμακα έντασης Mercalli και
 ορισμένες έντασης 9.

 - Η καταγραφόμενη εδαφική επιτάχυνση έφτασε τα 1.26g στο σεισμολογικό σταθμό του Greendale και το 0.3g στο κέντρο του Christchurch, 35km από το επίκεντρο. Οι μακράς περιόδου εδαφικές κινήσεις είχαν μέγιστο τα 2,5s.

Περισσότεροι από 4300 μετασεισμοί ακολούθησαν το σεισμό του Darfield (04/09/2010), έως και το Φεβρουάριο του 2011. Τα τοπικά μεγέθη των σεισμών έφταναν το M_L=5.4.

Ο σεισμός προκάλεσε μια επιφανειακή ζώνη διάρρηξης και παραμόρφωσης μήκους 29,5 ± 0,5km και εύρους 30 έως 300m. Η οριζόντια μετατόπιση που προκλήθηκε έχει μέγιστη τιμή 5,2 ± 0,2m και η κατακόρυφη μετατόπιση 1,45 ± 0,2m.

- Κατά τη διάρκεια του ισχυρού σεισμού του Darfield το 2010, εκτεταμένα φαινόμενα πλευρικής εξάπλωσης και ρευστοποίησης εδαφών συνέβησαν σε διάφορα μέρη της πόλης του Christchurch. Η ρευστοποίηση του εδάφους και η συνοδεύουσα αυτής παραμόρφωση και αστοχία, οδήγησε σε σημαντικές ζημιές σε κατοικημένα σπίτια και κρατικές εγκαταστάσεις.

Ιδιαίτερα έντονα φαινόμενα ρευστοποίησης και πλευρικής εξάπλωσης
 εντοπίστηκαν στις πόλεις Christchurch και Kaipoi, οι οποία καλύπτεται από ποτάμιες ποταμοχειμάριες αποθέσεις.

- Ο ισχυρός μετασεισμός του Christchurch στις 22/02/2011, είχε μέγεθος M_W =6.2 (M_L =6.3), προκάλεσε μεγάλες καταστροφές στην πόλη και αφαίρεσε τη ζωή από 185 ανθρώπους. Ακολούθησε σχεδόν έξι μήνες μετά το σεισμό μεγέθους M_W =7.1 του Darfield της 04/09/2010.

 - Χαρακτηριστικό του ισχυρού σεισμού ήταν η μεγάλη τιμή της μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης (PGA), που έφτασε έως τα 1.88g εντός της πόλης και 2.2g στο επίκεντρο του σεισμού.

- Ο σεισμός προκάλεσε εκτεταμένες ζημιές σε όλο το Christchurch, ειδικά στο κέντρο της πόλης και στα ανατολικά προάστια.

 Εκτεταμένα φαινόμενα ρευστοποίησης και πλευρικής εξάπλωσης επηρέασαν τα ανατολικά προάστια, ενώ παράχθηκαν κατά τη διάρκεια του σεισμού, λόγω ρευστοποίησης, περίπου 400.000 τόνους αμμοϊλύος, προκαλώντας σοβαρές βλάβες σε οδικά δίκτυα, δίκτυα κοινής ωφελείας και κτίρια.

Ο σεισμός του Christchurch, μεγέθους *M*_L=6.3, ήταν πιθανώς ένας μετασεισμός
 του ισχυρού σεισμού του Darfield μεγέθους *M*_W=7.1 (04/09/2010)

 - Η διάρρηξη του σεισμικού ρήγματος του Christchurch εκδηλώθηκε σε μια προηγουμένως άγνωστη γραμμή ρήγματος που τοποθετείται 17km από ανατολή προς δύση από το Scarborough Hill, βορειοανατολικά του Christchurch.

- Η μέγιστη καταγραφόμενη οριζόντια επιτάχυνση μετρήθηκε 1.7g.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- **Bannister, S. (2011).** *Relocation analysis of the Christchurch city 'Boxing Day' earthquakes.* GNS Science Consultancy report 2011/36. 9 p.

- Bannister, S., and Gledhill, K. (2012). Evolution of the 2010 - 2012 Canterbury earthquake sequence New Zealand. Journal of Geology and Geophysics Vol. 55, No. 3, pp. 295-304.

- Barrell, D.J.A., Litchfield, N.J., Townsend, D.B., Quigley, M., Van Dissen, R.J., Cosgrove, R., Cox, S.C., Furlong, K., Villamor, P., Begg, J.G., Hemmings-Sykes, S., Jongens, R., Mackenzie, H., Noble, D., Stahl, T., Bilderback, E., Duffy, B., Henham, H, Klahn, A., Lang, E.M.W., Moody, L., Nicol, R., Pedley, K., & Smith, A. (2011). Strike-slip ground-surface rupture (Greendale Fault) associated with the 4 September 2010 Darfield earthquake, Canterbury, New Zealand. Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, Vol. 44, pp. 283-291.

- Beavan, J., Fielding, E., Motagh, M., Samsonov, S., Donnelly, N. (2011). Fault location and slip distribution of 22 February 2011 Mw 6.2 Christchurch, New Zealand, earthquake from geodetic data. Seismological Research Letters, Vol 82, pp. 789-798.

- Beavan, J., Motagh, M., Fielding, E., Donnelly, N., Collett, D. (2012). Fault slip models of the 2010 2011 Canterbury earthquakes from geodetic data, and observations of post-seismic ground deformation. New Zealand Journal Geology and Geophysics, Vol 55, pp.789-799.

- Beavan, R.J., Samsonov, S., Motagh, M., Wallace, L.M., Ellis, S.M., Palmer, N.G. (2010). *The Darfield (Canterbury) earthquake: geodetic observations and preliminary source model.* Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering, Vol 43, pp. 228-235.

- BLICK, G., BEAVAN, J., CROOK, C., DONNELLY, N. (2011). The Impact of the 2010 Darfield (Canterbury) Earthquake on the Geodetic Infrastructure in New Zealand. International Federation of Surveyors.

(<u>http://www.fig.net/pub/monthly_articles/september_2011/september_2011_blic</u> <u>k_beavan_et_al.pdf</u>). - **Bradley, B.A. (2012).** Strong ground motion characteristics observed in the 4 September 2010 Darfield, New Zealand earthquake. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol. 42, pp.32-46.

- **Bradley, B.A. (2012).** Ground motions observed in the Darfield and Christchurch earthquakes and the importance of local site response effects. New Zealand Journal Geology and Geophysics, Vol 55, pp.279-286.

- **Bird, P. (2003).** *An updated digital model of plate boundaries.* Geochemistry, Geophysics, and Geosystems, Vol. 4(3), 1027.

- Browne, G.H., Field, B.D., Barrell, D.J.A., Jongens, R., Bassett, K.N. and Wood, R.A. (2012). *The geological setting of the Darfield and Christchurch earthquakes.* New Zealand Journal Geology and Geophysics, Vol. 55, pp.193-197.

- Campbell, J.K., Pettinga, J.R. & Jongens, R. (2012). The tectonic and structural setting of the 4 September 2010 Darfield (Canterbury) earthquake sequence, New Zealand. New Zealand Journal Geology and Geophysics, Vol. 55, pp.155-168.

- Cubrinovski, M., Robinson, K., Taylor, M., Hughes, M., Orense, R., (2012). Lateral spreading and its impacts in urban areas in the 2010 2011 Christchurch earthquakes. New Zealand Journal Geology and Geophysics, Vol. 55, pp.255-269.

- Davy, B., Stagpoole, V., Barker, D. & Yu, J. (2012). Subsurface structure of the Canterbury region interpreted from gravity and aeromagnetic data. New Zealand Journal Geology and Geophysics, Vol. 55, pp.185-191.

- Downes, G. and Yetton, M. (2012). *Pre-2010 historical seismicity near Christchurch, New Zealand: the 1869 Mw 4.7-4.9 Christchurch and 1870 Mw 5.6-5.8 Lake Ellesmere earthquakes.* New Zealand Journal Geology and Geophysics, Vol. 55, pp.199-205.

- Eidinger, J., Tang, A., O'Rourke, T. (2010). Report of the 4 September 2010 Mw7.1 Canterbury (Darfi4 September 2010 Mw7.1 Canterbury (Darfield), New *Zealand Earthquake.* ASCE Technical Council on Lifeline Earthquake Engineering (TCLEE).

(http://www.asce.org/uploadedFiles/Technical_Groups_and_Institutes/TCLEE/ TCLEE%20Preliminary%202010%20NZ%20EQ%20Report.pdf)

- Elder, D.M.G., McCahon, I.F., Yetton, M. (1991). The earthquake hazard in Christchurch: a detailed evaluation.

(<u>http://www.eqc.govt.nz/research/research-papers/earthquake-hazard-christchurch</u>)

- Elliott, J. R., Nissen, E., England, P.C., Jackson, J. A., Lamb, S., Li, Z., Oehlers, M., Palamartchouk, K. & Parsons, B.E. (2011). Satellite Constraints & Field Observations of slip in the Canterbury Earthquakes, New Zealand: Implications for future seismic hazard in Christchurch. ESA Fringe Conference, Frascati, Italy, 19-23 Sept.

- Forsyth, P.J., Barrell, D.J.A., Jongens, R. (compilers) 2008. *Geology of the Christchurch area.* Institute of Geological & Nuclear Sciences 1:250.000 geological map 16. Lower Hutt, GNS Science. 1 sheet 67 p.

- Gledhill, K., Ristau, J., Reyners, M., Fry, B., Holden, C. (2011). The Darfield (Canterbury, New Zealand) Mw7.1 earthquake of September 2010: a preliminary seismological report. Seismological Research Letters, Vol 82, pp. 378-386.

- Green, R.A. & Cubrinovski, M. (2010). GEOTECHNICAL RECONNAISSANCE OF THE 2010 DARFIELD (NEW ZEALAND) EARTHQUAKE.

(http://www.geerassociation.org/GEER Post%20EQ%20Reports/Darfield%20N ew%20Zealand 2010/GEER Darfield 2010 11-14-2010.pdf).

- Hancox, G., Perrin, N. and Dissen R.V. (2011). Report on Landslide Reconnaissance Flight on 24 February 2011 following the Mw6.3 Christchurch Earthquake of 22 February 2011. GNS SCIENCE IMMEDIATE REPORT (http://info.geonet.org.nz/display/quake/M+6.3%2C+Christchurch%2C+22+February+ 2011).

- Holden, C., Beavan, J., Fry, B., Reyners, M., Ristau, J., Van Dissen, R., Villamor, P., Quigley, M. (2011). *Preliminary source model of the Mw 7.1 Darfield*

earthquake from geological, geodetic and seismic data. Ninth Pacific Conference on Earthquake Engineering, Building an Earthquake-Resilient Society, Paper 164, p. 7. Auckland, New Zealand.

- Holt, R.A., Savage, M.K., Townend, J., Syracuse, E.M., Thurber, C.H. (2013). *Crustal stress and fault strength in the Canterbury Plains, New Zealand.* Earth and Planetary Science Letters, Vol. 383 (2013), pp.173–181.

- Jongens, R., Barrell, D.J.A., Campbell, J.K. & Pettinga, J.R., (2012). Faulting and folding beneath the Canterbury Plains identified prior to the 2010 emergence of the Greendale Fault. New Zealand Journal of Geology and Geophysics, Vol. 55, No. 3, pp. 169-176.

- Litchfield, N.J., Van Dissen, R.J., Hornblow, S., Quigley, M., Archibald, G. (2014). Detailed analysis of Greendale Fault ground surface rupture displacements and geometries. GNS Science Report 2013/18. 166 p. (http://www.eqc.govt.nz/sites/public_files/3780-Detailed-analysis-Greendalefault%281of2%29.pdf)

- **Orense, R.P. (2011).** Soil liquefaction during the 2010 Darfield and 1990 Luzon Earthquakes: A comparative study. Proceedings of the Ninth Pacific Conference on Earthquake Engineering Building an Earthquake-Resilient Society 14-16 April, 2011, Auckland, New Zealand (<u>http://www.nzsee.org.nz/db/2011/043.pdf</u>)

- Orense, R.P., Kiyota, T., Yamada, S., Curbinovski, M., Hosno, Y., Okamura, M., Yasuda, S. (2011). *Comparison of liquefaction features observed during the 2010 and 2011 Christchurch earthquakes.* Seismological Research Letters, Vol 82, pp. 905-918.

- Quigley, M.C., Van Dissen, R., Litchfield, N., Villamor, P., Duffy, B., Barrell, D., Furlong, K., Stahl, T., Bilderback, E., Noble, D. (2012). Surface rupture during the 2010 Mw 7.1 Darfield (Canterbury) earthquake: implications for fault rupture dynamics and seismic-hazard analysis. Geology, Vol 40, pp. 55-58.

- Quigley, M., Van Dissen, R., Villamor, P., Litchfield, N., Barrell, D., Furlong, K., Stahl, T., Duffy, B., Bilderback, E., Noble, D., Townsend, D., Begg, J., Jongens, R., Ries, W., Claridge, J., Klahn, A., Mackenzie, H., Smith, A., Hornblow, S., Nicol, R., Cox, S., Langridge, R., Pedley, K. (2010) SURFACE RUPTURE OF THE GREENDALE FAULT DURING THE DARFIELD (CANTERBURY) EARTHQUAKE, NEW ZEALAND: INITIAL FINDINGS. BULLETIN OF THE NEW ZEALAND SOCIETY FOR EARTHQUAKE ENGINEERING, Vol. 43, No. 4, December 2010.

- Quigley, M.C., Villamor, P., Furlong, K., Beavan, J., Van Dissen, R., Litchfield, N., Stahl, T., Duffy, B., Bilderback, E., Noble, D., Barrell, D., Jongens, R., Cox, S. (2010b). *Previously unknown fault shakes New Zealand's South Island*. EOS, Vol 91, pp. 469-470.

- Reid, C.M., Thompson, N.K., Irvine, J.R.M. and Laird, T.E. (2012). Sand volcanoes in the Avon Heathcote Estuary produced by the 2010-2011 Christchurch Earthquakes: implications for geological preservation and expression. New Zealand Journal of Geology and Geophysics, Vol. 55, No. 3, pp. 169-176.

- **Ristau, J. 2008.** *Implementation of routine regional moment tensor analysis in New Zealand.* Seismological Research Letters, Vol 79, pp. 400-415.

- Shcherbakov, R., Nguyen, M., Quigley, M. (2012). *Statistical analysis of the* 2010 *Mw7.1 Darfield Earthquake aftershock sequence.* New Zealand Journal of Geology and Geophysics Vol. 55, No. 3, September 2012, pp. 305-311.

- Sibson, R., Ghisetti, F., Ristau, J. (2011). Stress control of an evolving strike-slip fault system during the 2010-2011 Canterbury, New Zealand, earthquake sequence. Seismological Research Letters, Vol 82, pp. 824-832.

- Smith, W.D., Berryman, K.R. (1986). *Earthquake hazard in New Zealand: inferences from seismology and geology.* Royal Society of New Zealand Bulletin 24: 223–243.

- Syracuse, E., Holt, R., Savage, M., Johnson, J., Thurber, C., Unglert, K., Allan, K., Karaliyadda, S., Henderson, M. (2012). *Temporal and spatial evolution of hypocentres and anisotropy from the Darfield aftershock sequence: Implications for fault geometry and age.* New Zealand Journal of Geology and Geophysics, Vol 55, pp. 287-293. - Syracuse, E., Holt, R., Savage, M., Johnson, J., Thurber, C., Unglert, K., Allan, K., Karaliyadda, S., Henderson, M. (2012). *High-resolution relocation of aftershocks of the Mw 7.1 Darfield, New Zealand, earthquake and implications for fault activity.* JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH: SOLID EARTH, VOL. 118, pp.1–12.

- Villamor, P., Barrell, D., Litchfield, N., Van Dissen, R., Hornblow, S. and Levick, S. (2011). *Greendale Fault investigation of surface rupture characteristics for fault avoidance zonation*. GNS Science Consultancy Report 2011-121. 58p. (http://ecan.govt.nz/publications/Reports/fault-final-report-greendale.pdf)

- Villamor, P., Litchfield, N., Barrell, D., Van Dissen, R., Hornblow, S., Quigley, M., Levick, S., Ries, W., Duffy, B., Begg, J., Townsend, D., Stahl, T., Bilderback, E., Noble, D., Furlong, K., & Grant, H. (2012). New Map of the 2010 Greendale Fault surface rupture, Canterbury, New Zealand: application to land use planning. New Zealand Journal of Geology and Geophysics, Vol. 55, No. 3, September 2012, pp. 223-230.

- Webb, T.H., (compiler), Bannister, S., Beavan, J., Berryman, K., Brackley, H., Cousings, J., Fry, B., Gerstenberger, M., et al. (2011). *The Canterbury Earthquake Sequence and Implications for Seismic Design Levels*. GNS Science Consultancy Report 2011/183. 88p Lower Hutt, New Zealand, GNS Science.

- Κούκης, Χ.Γ., Σαμπατακάκης, ΣΤ.Ν. (2007). ΓΕΩΛΟΓΙΑ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ. Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα.

- Μαρίνος, Π., Ροντογιάννη, Θ., Χρηστάρας, Β., Τσιαμπάος, Γ., Σαμπατακάκης Ν. Ο ΣΕΙΣΜΟΣ 7,1 της 4/9/2010 ΤΟΥCANTERBURY ΝΕΑΣ ΖΗΛΑΝΔΙΑΣ ΣΥΝΤΟΜΗ ΑΝΑΦΟΡΑ ΚΑΙ ΕΠΙ ΤΟΠΟΥ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ. (http://www.geodifhs.com/uploads/3/1/6/8/3168846/zealand_seismos.pdf)

- Παπαθανασίου, Β.Γ. (2006). ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΕΔΑΦΩΝ
 ΣΤΟΝ ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΧΩΡΟ. Διδακτορική Διατριβή, Α.Π.Θ., Τμήμα Γεωλογίας.

http://blogs.agu.org/landslideblog/2011/03/08/distorted-railway-lines-in-thechristchurch-earthquake/

http://www.eqc.govt.nz/node/1016

http://info.geonet.org.nz/display/quake/Earthquake

http://en.wikipedia.org/wiki/2011_Christchurch_earthquake

http://www.gns.cri.nz/

http://www.gns.cri.nz/Home/Our-Science/Natural-Hazards/Recent-Events/Canterbury-quake

http://data.gns.cri.nz/geology/

http://maps.gns.cri.nz/website/af/viewer.htm

http://www.gns.cri.nz/Home/Our-Science/Earth-Science/Regional-Geology/Geological-Maps/1-250-000-Geological-Map-of-New-Zealand-QMAP/Digital-Data-and-Downloads

http://assets.royalsociety.org.nz/media/Information-paperThe-Canterbury-Earthquakes.pdf

http://www.teara.govt.nz/en/geology-overview

http://info.geonet.org.nz/display/quake/Earthquake

http://maps.gns.cri.nz/website/af/viewer.htm

http://www.sciencedirect.com