

Những chủ đề suy ngẫm

Đây là một trong ba bài luận được đưa vào CPMD tập trung vào chi tiết về các chủ đề liên quan như các kết quả đáng báo động của các nghiên cứu về sụt lún đất (Bài luận I.), các phát triển chủ đạo quốc tế trong quy hoạch không gian vùng bờ (Bài luận II) và lồng ghép dịch vụ biến đổi khí hậu theo yêu cầu trong quy hoạch cơ sở hạ tầng (Bài luận III). Đây được coi là các chủ đề quan trọng trong tương lai gần và sự phản ánh các chủ đề này nên được tìm thấy trong kế hoạch sắp tới. Các bài luận được viết bởi các chuyên gia trong các lĩnh vực chuyên môn của họ, những chuyên gia này cũng am hiểu các điều kiện đặc biệt ở Đồng bằng sông Cửu Long.

Bài luận I.

Sụt lún đất và hệ thống nước ngầm tại Đồng bằng sông Cửu Long – hiện trạng và tính bất ổn

Armin Pechstein¹ và Philip S.J. Minderhoud^{2,3}

¹ Viện Khoa học địa chất và Tài nguyên thiên nhiên liên bang, Cục Khoa học Đất và Nước ngầm, Hannover, Đức

² Khoa Địa vật lý, Đại học Utrecht, P.O. Box 80115, 3508 TC Utrecht, Hà Lan

³ Phòng Hệ thống đất và nước ngầm, Deltares, Viện Nghiên cứu đồng bằng, P.O. Box 85467, 3508 AL, Utrecht, Hà Lan

i. Hiện trạng địa chất thủy văn và tình hình sử dụng nước ngầm tại Đồng bằng sông Cửu Long

Trong thời kỳ Kainozoi và Đệ Tứ, dãy núi Proto-Himalaya được nâng cao nhanh chóng, kéo theo tình trạng sụt lún đất ở các lưu vực kiến tạo quanh đó, làm cho một lượng lớn vật chất dồn vào các nhánh sông Mê Công (Wagner và đồng nghiệp, 2012). Tình trạng sụt lún kiến tạo đang tiếp diễn ở lưu vực sông Mê Công, tốc độ xói lở cao cùng với các chu kỳ biến tiến và biến thoái đã bồi lắng nên bề trầm tích có độ dày từ 180 đến hơn 500 m trên móng tiền Kainozoi. Nhìn chung, độ dày của phức hệ trầm tích, hay còn là độ sâu của lưu vực Mê Công vốn trải dài theo hướng Tây Bắc, tăng theo hướng từ Tây Bắc đến Đông Nam và từ phía Tây hướng về sông Hậu (sông Bassac).

Các chu trình biến tiến biến thoái lặp đi lặp lại đã hình thành nên tầng trầm tích chưa cố kết tại lưu vực sông Mê Công với hệ thống tầng chứa nước nhiều lớp. Quá trình này tạo nên phức hệ đan xen giữa các tầng chứa nước có khả năng thẩm thấu cao và các lớp trầm tích chắn nước có khả năng thẩm thấu thấp. Các tầng chứa nước chủ yếu gồm cát từ mịn đến thô, đôi khi có bùn xen kẽ với sét. Các tầng chứa nước này chứa và dẫn nước ngầm, và do vậy chúng là các lớp trầm tích cung cấp nước ngầm. Các tầng chắn nước đan xen thường cấu tạo bởi bột, sét và sét bột. Các tầng này hoạt động như các lớp chắn có khả năng thẩm thấu rất thấp, chia tách giữa các tầng chứa nước khác nhau. Các tầng chứa nước và tầng chắn nước được hình thành theo cách phức hợp xuyên suốt toàn vùng đồng bằng. Đôi khi những tầng này bị gián đoạn và có sự biến thiên lớn về độ dày cũng như các đặc tính thủy văn. Nhìn chung, các tầng chứa nước chính ở Đồng bằng sông Cửu Long được hình thành từ thời kỳ Miocen đến Holocen (DGSM, 2004). Tổng quan về các hệ tầng địa chất và địa chất thủy văn chính của lưu vực Mê Công được trình bày tại Bảng 1.

Kể từ những năm 1990, vai trò của nước ngầm ngày càng trở nên quan trọng, đáp ứng nhu cầu sinh hoạt, sản xuất nông nghiệp và công nghiệp tại Đồng bằng sông Cửu Long. Tầng nước nông Holocen *qh* chủ yếu là nước mặn đến nước lợ, và hiếm khi được sử dụng cho mục

đích cấp nước. Tầng nước này thường ít phát triển, cấu tạo bởi các lớp cát và bột xen kẽ trong phức hợp sét của tầng chắn nước Q_2 và Q_1^3 . Do vậy, trong khoảng từ 12 đến 40 m tầng mặt của trầm tích ở vùng đồng bằng thường phân bố sét từ rất mềm đến rất cứng chứa lượng nước cao (Giao và đồng nghiệp, 2004; Hoàng và đồng nghiệp, 2016). Các tầng chứa nước có áp, tuổi từ Pleistocen đến Pliocen, nằm dưới sâu hơn, là nguồn cung nước ngọt chính tại Đồng bằng sông Cửu Long. Tầng chứa nước được khai thác nhiều nhất là qp_{2-3} , tiếp đến là tầng chứa nước n_2^2 .

Nước ngầm được khai thác bằng các giếng khoan có kích thước từ nhỏ đến trung bình, công suất bơm nhỏ hơn 200 m³/ngày, chủ yếu được sử dụng cho sản xuất nông nghiệp, nuôi trồng thủy sản và sinh hoạt tại các khu vực nông thôn. Các giếng bơm có công suất cao hơn cần phải được cấp phép khai thác và thường tập trung ở các khu đô thị và thành thị (DWRPIS, 2010). Do công suất khai thác lớn nên tại các khu vực tập trung đông dân cư, nước ngầm đang suy giảm nghiêm trọng, tạo nên các nón trũng nước ngầm cục bộ. Tình trạng suy giảm nước ngầm cũng đang ở mức báo động tại các vùng nông thôn, do bơm hút trên diện rộng. Tuy nhiên, tổng trữ lượng nước ngầm được khai thác tại các vùng nông thôn cao hơn trữ lượng nước khai thác tại khu vực thành thị.

Bảng 1: Các đơn vị địa chất và địa chất thủy văn của Đồng bằng sông Cửu Long (DSGM, 2004)

| Hệ thống | Thời kỳ | Tướng và Địa chất ^a | Tầng chứa nước | Tầng chắn nước | Tuổi đá gốc [triệu năm] | Độ sâu trung bình [m]* |
|---------------|-------------------|--|-------------------|------------------------------|-------------------------|------------------------|
| Đệ Tứ | Holocen | m Q_2^{1-2} , am Q_2^{1-2} , | | Q_2 | 0,012 | 9 |
| | | am Q_2^{2-3} , amb Q_2^3 , a Q_2^3 | qh | | | 29 |
| | Pleistocen thượng | m Q_1^3 | | Q_1^3 | 0,126 | 53 |
| | | am Q_1^3 | qp ₃ | | | 70 |
| | Pleistocen trung | m Q_1^{2-3} | | Q_1^{2-3} | 0,781 | 97 |
| | | am Q_1^{2-3} | qp ₂₋₃ | | | 123 |
| Pleistocen hạ | m Q_1^1 | | Q_1^1 | 1,806/ 2,588 ^b | 149 | |
| | am Q_1^1 | qp ₁ | | | 180 | |
| Neogen | Pliocen trung | m N_2^2 | | N_2^2 | 3,600 | 212 |
| | | am N_2^2 | n_2^2 | | | 242 |
| | Pliocen hạ | m N_2^1 | | N_2^1 | 5,332 | 271 |
| | | am N_2^1 | n_2^1 | | | 302 |
| | Miocen thượng | m N_1^3 | | N_1^3 | 11,608 | 332 |
| | | am N_1^3 | n_1^3 | | | 382 |

^a (a) – bồi tích; (m) – biển; (b) – đầm lầy, bãi lầy

^b Nền đệ tứ đã được IUGS-ICS xác định lại vào năm 2009, có tuổi là 2.58 triệu năm, bao gồm cả tầng Pliocen thượng được hình thành trước đó

*Độ sâu trung bình được xác định bằng cách khái quát hóa vùng đồng bằng theo mô hình 3D (Minderhoud và đồng nghiệp, 2017)

Ước tính công suất khai thác nước ngầm theo ngày từ năm 2013 và dự đoán cho giai đoạn từ 2015-2020 của các tỉnh ven biển phía nam sông Hậu (sông Bassac) được tổng hợp trong Bảng 2. Theo đó, nhu cầu nước ngầm dự báo sẽ liên tục tăng. Tuy nhiên, việc bổ cập nước ngầm trực tiếp còn chậm và hạn chế. Các tầng sét nông Holocen có chức năng trám bít hiệu quả đối với các lớp nằm dưới sâu hơn và ít nhiều phân chia hệ thống nước mặt với hệ thống

nước ngầm. Các vùng nguồn bổ cập nước ngầm, cụ thể cho các tầng chứa nước sâu hơn, vẫn chưa xác định được chính xác. Bằng phương pháp định tuổi cacbon phóng xạ, tuổi của nước ngầm ước tính trong khoảng từ 10,000 đến hơn 40,000 năm (Dung Ho và đồng nghiệp, 1992; Hoàng và Baumle, 2017). Do vậy, nguồn nước ngọt tại Đồng bằng sông Cửu Long được cho là hữu hạn, và hệ thống chứa nước này có khả năng bị suy kiệt. Các cột nước ngầm đang liên tục hạ thấp trên toàn vùng đồng bằng (Wagner và đồng nghiệp, 2012). Theo ước tính của Erban và đồng nghiệp (2014), nước ngầm tại các tầng chứa nước đang khai thác trên phần lớn diện tích vùng Đồng bằng sông Cửu Long hạ thấp từ 0,3-0,7 m mỗi năm trong vòng hai thập kỷ trở lại đây. Tuy nhiên, việc đánh giá chi tiết hệ thống nước ngầm và tài nguyên nước tại Đồng bằng sông Cửu Long khá phức tạp do mạng lưới giếng quan trắc nước ngầm trong vùng còn hạn chế.

Bảng 2: Mức độ khai thác nước ngầm tính theo m³/ngày trong năm 2013 và ước tính cho năm 2015 và 2020 (Cao và đồng nghiệp, 2013).

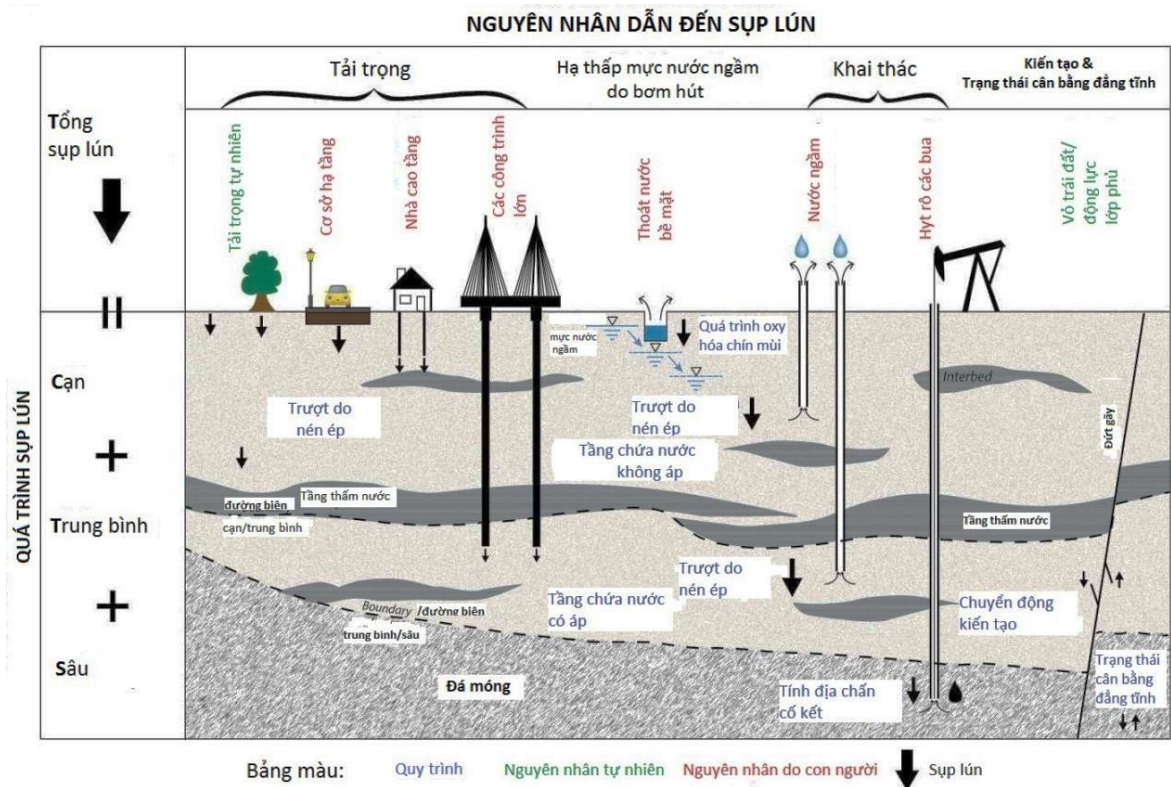
| Tỉnh | 2013 | 2015 | 2020 |
|------------|---------|---------|---------|
| Bạc Liêu | 248.728 | 297.122 | 340.429 |
| Cà Mau | 159.118 | 223.920 | 308.237 |
| Kiên Giang | 197.441 | 253.641 | 300.116 |
| Sóc Trăng | 244.850 | 323.362 | 396.745 |

Tuy nhiên, tình trạng suy giảm nước ngầm kéo dài và áp suất thủy lực làm gia tăng rủi ro xâm nhập mặn vào các tầng chứa nước và gây ra ô nhiễm nước ngầm nói chung. Để giảm thiểu những rủi ro này và bảo vệ sinh kế cho người dân vùng đồng bằng, trong tương lai cần phải xây dựng và điều chỉnh các chiến lược quản lý nước nhằm hạn chế tối đa việc sử dụng nước ngầm. Hành động này đang ngày càng trở nên cấp bách, khi các nghiên cứu gần đây đã chỉ ra rằng khai thác nước ngầm cũng gây ra sụt lún đất tại vùng đồng bằng.

ii. Sụt lún đất và vai trò của việc khai thác nước ngầm

Sụt lún đất tại các vùng đồng bằng là quá trình tự nhiên xảy ra sau khi các lớp trầm tích bị nén chặt trong quá trình chôn vùi theo thời gian bên trên các lớp trầm tích mới hình thành. Ngoài ra, các vùng đồng bằng thường phân bố ở các khu vực ven biển có lớp vỏ trái đất đang chuyển động hạ thấp. Tốc độ nén tự nhiên và quá trình kiến tạo thường khá nhỏ, nhưng hiện tượng sụt lún đất còn có thể bị gây ra bởi các nguyên nhân nhân sinh.

Hình 1 tóm tắt dưới dạng đồ thị nguyên nhân dẫn đến sụt lún đất và minh họa các quá trình khác nhau có thể gây ra sụt lún đất ở môi trường đồng bằng. Các lớp trầm tích mềm, chịu nén phân bố ở tầng nông dưới mặt có thể được cố kết dưới tác động trực tiếp của các yếu tố tự nhiên và nhân sinh. Việc hạ thấp mực nước ngầm có thể dẫn đến quá trình nén và phân giải sinh hóa (ô xi hóa) của các vật chất hữu cơ khi trầm tích giàu hữu cơ tiếp xúc với không khí (Galloway và đồng nghiệp, 2016). Hơn nữa, việc khai thác nước ngầm từ các tầng chứa sâu hơn làm gia tăng tình trạng sụt lún tại nhiều vùng đồng bằng và các vùng ven biển trên toàn thế giới, như giải thích dưới đây. Tác động kết hợp của các cơ chế nêu trên gây ra tổng sụt lún (lũy kế) trên bề mặt đồng bằng.



Hình 1: Tổng quan nguyên nhân gây sụt lún trong môi trường đồng bằng (Minderhoud và đồng nghiệp, 2015)

Theo nhiều nghiên cứu, tình trạng mực nước ngầm hạ thấp liên tục, cụ thể là giảm áp suất chất lỏng trong tầng chứa nước, có thể dẫn đến sụt lún (Abidin và đồng nghiệp, 2011; Higgins và đồng nghiệp, 2013; Phien-wej và đồng nghiệp, 2006; Saito và đồng nghiệp, 2007, Teatini và đồng nghiệp, 2006). Do áp suất nước lỗ rỗng của tầng chứa nước giảm, các lớp sét và bột mịn chịu nén bị thoát nước và cuối cùng bị nén chặt. Sau đó các lớp dưới mặt bị nén, gây ra sụt lún đất ở bề mặt [Galloway và Burbey, 2011; Gambolati và Teatini, 2015]. Tốc độ sụt lún cao nhất được ghi nhận tại các khu vực đông dân cư, nơi có mực nước ngầm bị suy giảm mạnh do khai thác quá mức từ các lớp trầm tích chưa cố kết, nơi những lớp sét mềm chịu nén bao phủ bên trên tầng chứa nước cát và sạn. Tuy nhiên, các ví dụ từ Thượng Hải (Dong và đồng nghiệp, 2014, We và đồng nghiệp, 2010), Đài Loan (Chen và đồng nghiệp, 2007), hoặc Tokyo (Santo và đồng nghiệp, 2006) – những nơi đã trải qua tình trạng sụt lún lên tới 4m (Bảng 3) cho thấy rằng nguy cơ gia tăng sụt lún có thể giảm bớt thông qua việc điều tiết và hạn chế bơm hút nước ngầm.

Bảng 3: Các trường hợp sụt lún do khai thác nước ngầm (do Gambolati và Teatini tổng hợp, 2015)

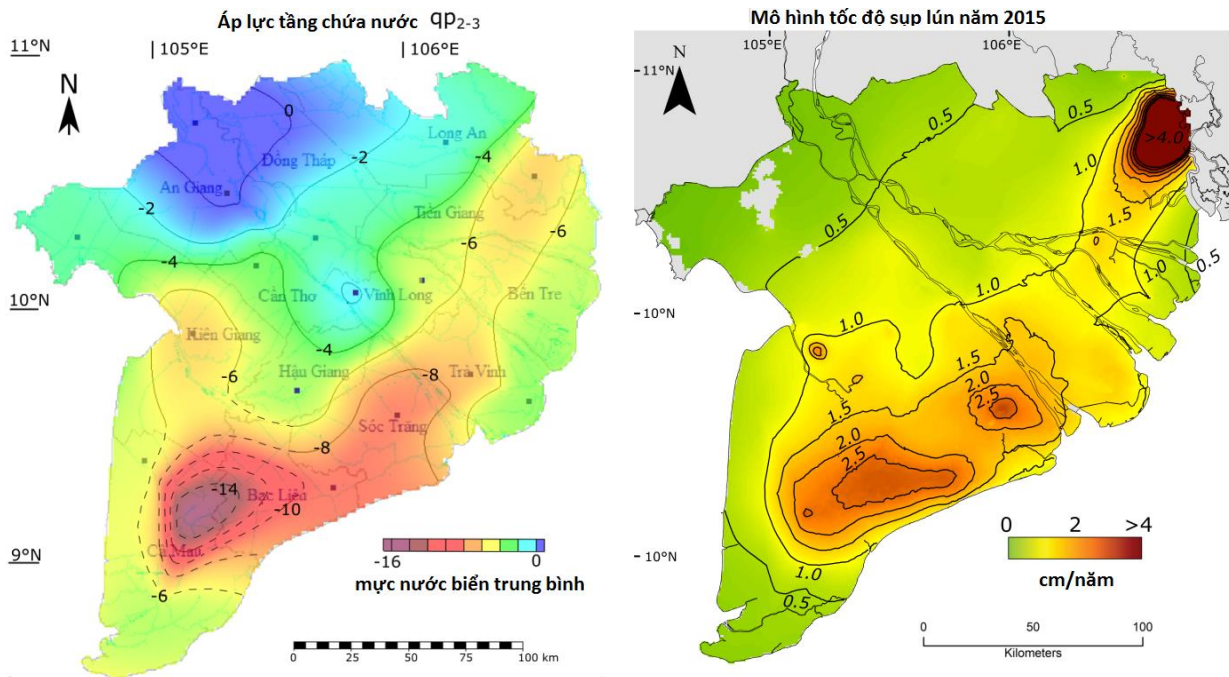
| Địa điểm | Sụt lún tối đa [m] | Mức độ sụt lún gần đây ^a [cm/year] | Độ sâu bơm hút nước [m] |
|-----------------|--------------------|---|-------------------------|
| Băng Cốc | 2,1 (1933-2002) | 2 (2005-2010) | 30-300 |
| TP. Hồ Chí Minh | 0,4 (1996-2005) | 4 (2010-2014) | 50-240 |
| Jakarta | 4,1 (1974-2010) | 26 (2007-2011) | 40-240 |
| Thượng Hải | 2,6 (1958-2002) | 1,5 (2006-2011) | 10-330 |
| Đài Bắc | 2 (1955-1991) | -0,7 (1989-2003) | 50-250 |
| Tokyo | 4,3 (1900-1975) | -0,3 (1991-2005) | 0-400 |

^a **Tốc độ sụt lún lớn nhất đo được trong kỳ xác định. Giá trị âm của sụt lún biểu thị nền đất được nâng lên.**

Đã có một số nghiên cứu về tình trạng sụt lún đất tại Đồng bằng sông Cửu Long và mối tương quan giữa sụt lún đất với khai thác nước ngầm [Erban et al., 2013, 2014; Fujihara et al., 2016; Karlsrud and Vangelsten, 2017; Minderhoud et al., 2015, 2017]. Hiện nay, dữ liệu Ra đa khẩu độ tổng hợp giao thoa InSAR (Interferometric Synthetic Aperture Radar) dựa vào ảnh vệ tinh là nguồn số liệu duy nhất về sự nâng cao bề mặt theo chuỗi thời gian, cho phép ước tính tốc độ sụt lún. Theo Erban và đồng nghiệp (2014), kết quả đánh giá theo chuỗi thời gian tương ứng từ 2006 – 2010 cho thấy tổng tốc độ sụt lún tại các trạm quan trắc nước ngầm trên toàn Đồng bằng sông Cửu Long đạt khoảng 1-4 cm/năm, trung bình là 1,6 cm/năm. Nếu tiếp tục bơm hút nước ngầm với công suất như hiện nay, dự báo tốc độ sụt lún đến năm 2050 sẽ là khoảng 0,88 m (0,35 – 1,4m). Karlsrud và Vangelsten (2017) ước tính tốc độ sụt lún tại Cà Mau bằng phương pháp tính toán độ cố kết 1-D cho các lớp sét ở 40m tầng mặt tại thành phố Cà Mau, xác định được tốc độ sụt lún tương đương do bơm hút nước ngầm ước tính đạt khoảng 2-4 cm/năm. Trong nghiên cứu mới nhất, Minderhoud và đồng nghiệp (2017) áp dụng cách tiếp cận theo phạm vi toàn vùng đồng bằng để tính toán mô hình lưu lượng nước ngầm của toàn bộ hệ thống các tầng chứa nước, kết hợp với mô hình sụt lún địa kỹ thuật. Các tác giả nhận thấy rằng tốc độ sụt lún tăng nhanh kể từ khi nước ngầm bị khai thác quá mức vào những năm 1990, với tốc độ hiện tại là từ 1-2 cm/năm ở khu vực nông thôn và khoảng 3 cm ở các thành phố và khu công nghiệp, tốc độ sụt lún trung bình là 1,2 cm/năm.

Hình 2 là bản đồ đẳng trị mực nước ngầm của tầng chứa nước đang được khai thác với cường độ cao qp_{2-3} . Bản đồ này được nội suy từ các số liệu đo đạc cột nước ngầm của Trung tâm Quy hoạch và Điều tra tài nguyên nước Quốc Gia (NAWAPI), nhưng không xem xét số liệu tương ứng của TP.HCM – phía đông bắc của vùng đồng bằng. Ngoài ra, hình 2 cũng biểu thị tốc độ sụt lún do khai thác nước ngầm theo tính toán của Minderhoud và đồng nghiệp (2017). Có thể thấy, kết quả mô hình hóa tốc độ sụt lún hiển thị rõ những khu vực có mực nước ngầm thấp nhất do bơm hút nước ngầm quá mức, như Sóc Trăng, Bạc Liêu và Cà Mau. Cần lưu ý rằng, tốc độ sụt lún do Minderhoud và đồng nghiệp (2017) mô hình hóa chỉ phản ánh hiện tượng sụt lún do khai thác nước ngầm, và do vậy giá trị có phần thấp hơn tổng tốc độ sụt lún được ước tính bằng số liệu InSAR theo Erban và đồng nghiệp (2014).

Ngoài sụt lún đất do khai thác nước ngầm, Giao và đồng nghiệp (2014) cũng đã nghiên cứu hiện tượng sụt lún tầng nông tại các diện tích rừng ngập mặn ven biển sử dụng thiết bị đo đạc cao trình trầm tích (SET). Kết quả cho thấy tốc độ lún của các tầng sét nông Holocen là từ 1,42 đến 2,63 cm/năm tại rừng ngập mặn nguyên sinh, và tốc độ tối đa là 3,8 cm/năm ở các khu vực không có rừng hoặc rừng đã bị phá hủy. Tốc độ sụt lún ở những khu vực mà rừng bị phá hủy đạt giá trị cao hơn là do có sự phân hủy mùn thực vật ở dưới đất.



Hình 2: Bản đồ đẳng trị mực nước ngậm cho tầng chứa nước qp₂₋₃ (bên trái), được nội suy từ các số liệu đo đạc trong mùa mưa 2016, và tốc độ sụt lún đất do khai thác nước ngầm (bên phải) được Minderhoud và đồng nghiệp (2017) mô hình hóa cho năm 2015. Số liệu nước ngầm do NAWAPI cung cấp, khu vực đo đạc cột nước ngầm được mô tả bằng các hình vuông. Lưu ý rằng nón trũng xung quanh thành phố Cà Mau được đo đạc và báo cáo trong các dữ liệu vào báo cáo quan trắc trước đó (như Erban và đồng nghiệp, 2014; Nguyen, 2010) là số liệu ước tính (các đường nét đứt) do chưa có số liệu cập nhật cho năm 2016.

Tốc độ sụt lún được Minderhoud và đồng nghiệp (2017) mô hình hóa là số liệu duy nhất hiện có cho toàn vùng Đồng bằng sông Cửu Long, do các phân tích theo công nghệ InSAR của Erban và đồng nghiệp (2014) chỉ đưa ra số liệu cho phần phía nam của vùng này. Tuy nhiên, cách tiếp cận theo hướng mô hình hóa này phụ thuộc vào giá trị bình quân số liệu đo đạc và ước tính các đặc tính địa kỹ thuật của lớp dưới mặt (hằng số về tính chịu nén và tỷ số quá cố kết) các chỉ số này gần như thay đổi theo không gian. Do vậy, các kết quả mô hình hóa nên được xem là ước tính tốc độ sụt lún do khai thác nước ngầm, và tốc độ sụt lún thực tế có thể biến động theo từng khu vực. Tuy vậy, tốc độ sụt lún đất được mô hình hóa theo không gian cho Đồng bằng sông Cửu Long khá phù hợp với mô hình mực nước ngầm thực tế (Hình 2). Theo đó, các kết quả mô hình hóa cho thấy khai thác nước ngầm là một trong những nguyên nhân chính dẫn đến sụt lún đất tại vùng này.

iii. Kết luận & khuyến nghị

Do phần lớn diện tích Đồng bằng sông Cửu Long nằm ở độ cao chưa đến 2m so với mực nước biển và đối mặt với nguy cơ lũ lụt, nên tốc độ sụt lún được báo cáo đang ở mức báo động cao. Tốc độ sụt lún này lớn hơn nhiều mực nước biển dâng, ước tính vào khoảng 3-5 mm/năm (Hak và đồng nghiệp, 2016; Lovelock và đồng nghiệp, 2015; Takegi và đồng nghiệp, 2016). Do đó, cần có hành động kịp thời nhằm giảm thiểu đến mức thấp nhất có thể tác động của tình trạng sụt lún đang ngày càng trầm trọng và các hệ lụy như ngập lụt, suy thoái nước ngầm, và thiệt hại đối với nhà cửa, cơ sở hạ tầng. Theo đó, cần thực hiện các hành động sau:

- Khai thác nước ngầm từ các tầng chứa nước có áp được xác định là nguyên nhân chính dẫn đến sụt lún đất. Do đó, cần giảm thiểu hoạt động khai thác này bằng cách thực thi các biện pháp nhằm hạn chế bơm hút nước ngầm. Để thay thế nguồn nước ngầm hiện đang là nguồn cung nước ngọt chính, trong tương lai cần xây dựng và thúc đẩy các chiến lược cung cấp và phân bổ nước.
- Không nên xây dựng những công trình lớn và không có nền móng vững chắc tại khu vực ven biển, nơi có lớp trầm tích chịu nén cao gần bề mặt. Những công trình này có khả năng bị sụt lún cao do trọng lượng lớn làm gia tăng độ cố kết của các lớp trầm tích bên dưới. Điều này cũng nên được xem xét khi lập kế hoạch và xây dựng các biện pháp công trình chống lũ như đê, kè vì quá trình gia tăng độ nén này có thể làm suy giảm nghiêm trọng tuổi thọ của các công trình chống lũ.
- Cần xem xét cụ thể hơn phạm vi không gian, quy mô cũng như nguyên nhân gây ra sụt lún. Do đó, thách thức trong tương lai là phải khắc phục được tình trạng khan hiếm dữ liệu đáng tin cậy về đặc tính địa kỹ thuật của đất và quan trắc nước ngầm, cũng như xác định được tình trạng sụt lún tại chỗ. Dữ liệu này gồm số liệu đo đạc tại chỗ nhằm kiểm định số liệu ước tính mức độ sụt lún theo phương pháp mô hình hóa và theo công nghệ vệ tinh (InSAR), có thể bằng cách như lắp đặt các công cụ đo GPS, bộ phản xạ InSAR và thiết bị đo tốc độ sụt lún.
- Ngoài ra, khuyến nghị nên nghiên cứu về tình trạng sụt lún tầng nông và ảnh hưởng của thoát nước và điều tiết nước tầng mặt đối với nước ngầm.
- Nên xây dựng và áp dụng các công cụ dự báo sụt lún ở khu vực đồng bằng thông qua mô hình hóa để xây dựng kịch bản sụt lún theo các chiến lược quản lý (nước ngầm) khác nhau nhằm hỗ trợ cho các nhà hoạch định chính sách và các nhà quy hoạch vùng đồng bằng.
- Cuối cùng, nâng cao nhận thức cho người dân địa phương và các nhà hoạch định chính sách cũng là vấn đề quan trọng để mọi người hiểu được rằng sụt lún đất tại Đồng bằng sông Cửu Long là một vấn đề cấp bách và cần phải có giải pháp ngăn chặn.

iv. Tài liệu tham khảo

Abidin, H.Z., Andreas, H., Gumilar, I., Fukuda, Y., Pohan, Y.E., Deguchi, T., 2011. Land subsidence of Jakarta (Indonesia) and its relation with urban development. *Nat. Hazards* 59, 1753. doi:10.1007/s11069-011-9866-9

Anderson, H.R., 1978. Hydrogeologic reconnaissance of the Mekong Delta in South Vietnam and Cambodia (No. 1608-R). U.S. Govt. Print. Off.,.

Cao, X.V., Ngo, V.D., Bui, V.T., 2013. Influence of Climate Change on Water Resources in the Mekong Delta (No. 2). Division for Water Resources Planning and Investigation for the south of Vietnam (unpublished).

Chen, C.-T., Hu, J.-C., Lu, C.-Y., Lee, J.-C., Chan, Y.-C., 2007. Thirty-year land elevation change from subsidence to uplift following the termination of groundwater pumping and its geological implications in the Metropolitan Taipei Basin, Northern Taiwan. *Eng. Geol.* 95, 30–47. doi:10.1016/j.enggeo.2007.09.001

DGSM, 2004. Research of geological structure and classification of N-Q sediments in Mekong Delta. Division for Geological Mapping for the South of Viet Nam (unpublished).

- Dong, S., Samsonov, S., Yin, H., Ye, S., Cao, Y., 2014. Time-series analysis of subsidence associated with rapid urbanization in Shanghai, China measured with SBAS InSAR method. *Environ. Earth Sci.* 72, 677–691. doi:10.1007/s12665-013-2990-y
- Dung Ho, H., Aranyosy, J.F., Louvat, D., Hua, Q., Viet Nguyen, T., Chinh Nguyen, K., 1992. Environmental isotope study related to the origin, salinization and movement of groundwater in the Mekong Delta (Viet Nam), in: *Isotope Techniques in Water Resources Development 1991, Proceedings of a Symposium on Isotope Techniques in Water Resources Development*. IAEA, Vienna.
- DWRPIS, 2010. Analysis of the groundwater abstraction status, and assessment of available groundwater resources for water supply, Report 2. Division for Water Resources Planning and Investigation for the south of Vietnam (unpublished).
- Erban, L.E., Gorelick, S.M., Zebker, H.A., 2014. Groundwater extraction, land subsidence, and sea-level rise in the Mekong Delta, Vietnam. *Environ. Res. Lett.* 9, 084010. doi:10.1088/1748-9326/9/8/084010
- Erban, L.E., Gorelick, S.M., Zebker, H.A., Fendorf, S., 2013. Release of arsenic to deep groundwater in the Mekong Delta, Vietnam, linked to pumping-induced land subsidence. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 110, 13751–13756. doi:10.1073/pnas.1300503110
- Fujihara, Y., Hoshikawa, K., Fujii, H., Kotera, A., Nagano, T., Yokoyama, S., 2016. Analysis and attribution of trends in water levels in the Vietnamese Mekong Delta. *Hydrol. Process.* 30, 835–845. doi:10.1002/hyp.10642
- Galloway, D.L., Burbey, T.J., 2011. Review: Regional land subsidence accompanying groundwater extraction. *Hydrogeol. J.* 19, 14591486. doi:10.1007/s10040-011-0775-5
- Galloway, D.L., Erkens, G., Kuniatsky, E.L., Rowland, J.C., 2016. Preface: Land subsidence processes. *Hydrogeol. J.* 24, 547–550. doi:10.1007/s10040-016-1386-y
- Gambolati, G., Teatini, P., 2015. Geomechanics of subsurface water withdrawal and injection. *Water Resour. Res.* 51, 3922–3955. doi:10.1002/2014WR016841
- Giao, P.H., Thoang, T.T., Vu, N.H.H., 2014. Geotechnical characterization of the subsoil profile underlying the land subsidence monitoring points in southern Vietnam delta.
- Hak, D., Nadaoka, K., Bernado, L.P., Le Phu, V., Hong Quan, N., Quang Toan, T., Hieu Trung, N., Van Ni, D., Van Pham Dang, T., 2016. Spatio-temporal variations of sea level around the Mekong Delta: their causes and consequences on the coastal environment. *Hydrol. Res. Lett.* 10, 60–66. doi:10.3178/hrl.10.60
- Higgins, S., Overeem, I., Tanaka, A., Syvitski, J.P.M., 2013. Land subsidence at aquaculture facilities in the Yellow River delta, China. *Geophys. Res. Lett.* 40, 3898–3902. doi:10.1002/grl.50758
- Hoang, T.H., Bäumle, R., 2017. Final report - IGPVN Activities and Achievements, Proposal of Recommendations and Measures for Water Resources Management in Soc Trang (Technical report No. III-1). Federal Institute for Geosciences and Natural Resources (BGR), Hannover.
- Hoang, T.M., van Lap, N., Oanh, T.T.K., Jiro, T., 2016. The influence of delta formation mechanism on geotechnical property sequence of the late Pleistocene–Holocene sediments in the Mekong River Delta. *Heliyon* 2. doi:10.1016/j.heliyon.2016.e00165
- Karlsrud, K., Vangelsten, B.V., 2017. Subsidence and land loss in the Ca Mau Province - Vietnam. Causes, consequences and mitigation options. *Geotech. Eng. J. SEAGS AGSSEA* 48.
- Lovelock, C.E., Cahoon, D.R., Friess, D.A., Guntenspergen, G.R., Krauss, K.W., Reef, R., Rogers, K., Saunders, M.L., Sidik, F., Swales, A., Saintilan, N., Thuyen, L.X., Triet, T., 2015. The vulnerability of Indo-Pacific mangrove forests to sea-level rise. *Nature* 526, 559–563. doi:10.1038/nature15538

- Minderhoud, P.S.J., Erkens, G., Pham, V.H., Bui, V.T., Erban, L.E., Stouthamer, E., 2017. Impacts of 25 years of groundwater extraction on subsidence in the Mekong delta, Vietnam. *Environ. Res. Lett.* 12. doi:10.1088/1748-9326/aa7146
- Minderhoud, P.S.J., Erkens, G., Pham, V.H., Vuong, B.T., Stouthamer, E., 2015. Assessing the potential of the multi-aquifer subsurface of the Mekong Delta (Vietnam) for land subsidence due to groundwater extraction. *Proc. Int. Assoc. Hydrol. Sci.* 372, 73–76. doi:10.5194/piahs-372-73-2015
- Nguyen, V.T., 2010. Report on investigation and assessment to define restricted areas and limited areas for the new construction of groundwater extraction in the province of Ca Mau. [in Vietnamese, unpublished].
- Phien-wej, N., Giao, P.H., Nutalaya, P., 2006. Land subsidence in Bangkok, Thailand. *Eng. Geol.* 82, 187–201. doi:10.1016/j.enggeo.2005.10.004
- Saito, Y., Chaimanee, N., Jarupongsakul, T., Syvitski, J.P.M., 2007. Shrinking megadeltas in Asia: Sea-level rise and sediment reduction impacts from case study of the Chao Phraya Delta, , pp. 3–9. *Inprint Newsl. IGBP/HDP Land Ocean Interact. Coast. Zone* 3–9.
- Sato, C., Haga, M., Nishino, J., 2006. Land Subsidence and Groundwater Management in Tokyo. *IRES Vol6 No2*.
- Takagi, H., Thao, N.D., Anh, L.T., 2016. Sea-Level Rise and Land Subsidence: Impacts on Flood Projections for the Mekong Delta's Largest City. *Sustainability* 8, 959. doi:10.3390/su8090959
- Teatini, P., Ferronato, M., Gambolati, G., Gonella, M., 2006. Groundwater pumping and land subsidence in the Emilia-Romagna coastland, Italy: Modeling the past occurrence and the future trend. *Water Resour. Res.* 42, W01406. doi:10.1029/2005WR004242
- Wagner, F., Tran, V.B., Renaud, F.G., 2012. Groundwater Resources in the Mekong Delta: Availability, Utilization and Risks, in: Renaud, F.G., Kuenzer, C. (Eds.), *The Mekong Delta System*. Springer Netherlands, Dordrecht, pp. 201–220.
- Wu, J., Shi, X., Ye, S., Xue, Y., Zhang, Y., Wei, Z., Fang, Z., 2010. Numerical simulation of viscoelastoplastic land subsidence due to groundwater overdrafting in shanghai, China. *J. Hydrol. Eng.* 15, 223–236.