

THIẾT LẬP CƠ SỞ DỮ LIỆU CẤU TRÚC NỀN ĐỊA CHẤT 3D - GIẢI PHÁP PHÁT TRIỂN BỀN VỮNG KHÔNG GIAN NGẦM KHU VỰC HÀ NỘI

ESTABLISHMENT OF A 3D GEOLOGICAL STRUCTURE DATA FOUNDATION - A SUSTAINABLE DEVELOPMENT SOLUTION FOR URBAN SUBSURFACE SPACE IN THE HANOI AREA

NGUYỄN CÔNG KIÊN^a, ĐINH QUỐC DÂN^a, TRẦN MẠNH LIÊU^b

^aViện Khoa học công nghệ xây dựng

^bViện Địa kỹ thuật - Liên hiệp các hội Khoa học và Kỹ thuật Việt Nam

*Tác giả đại diện: Email: nguyencongkien231@gmail.com

Ngày nhận 16/12/2025, Ngày sửa 29/12/2025, Chấp nhận 29/12/2025

<https://doi.org/10.59382/j-ibst.2025.vi.vol4-8>

Tóm tắt: Phát triển bền vững không gian ngầm đô thị là một định hướng tất yếu nhằm đáp ứng yêu cầu gia tăng dân số, hạn chế quỹ đất bề mặt và nâng cao hiệu quả sử dụng hạ tầng đô thị. Tuy nhiên, việc khai thác không gian ngầm chịu sự chi phối trực tiếp của môi trường địa chất, đặc trưng bởi cấu trúc địa tầng phức tạp, tính không đồng nhất của các lớp đất đá và sự tồn tại của các quá trình địa chất, địa chất công trình bất lợi. Do đó, việc thiết lập và quản lý hệ thống dữ liệu địa chất có độ tin cậy cao là yêu cầu then chốt trong quy hoạch, thiết kế, thi công và vận hành công trình ngầm. Bài báo trình bày việc xây dựng cơ sở dữ liệu 3D cấu trúc nền địa chất khu vực Hà Nội trên cơ sở tích hợp số liệu khoan địa chất công trình, đo địa vật lý và hệ thống thông tin địa lý (GIS). Mô hình dữ liệu 3D cho phép mô phỏng cấu trúc địa tầng, hỗ trợ trực quan hóa, dự báo rủi ro địa chất và tối ưu hóa giải pháp thiết kế công trình ngầm. Dữ liệu được tổ chức dưới định dạng KML, thuận lợi cho khai thác trên nền tảng WebGIS, góp phần nâng cao hiệu quả quản lý và phát triển bền vững không gian ngầm đô thị Hà Nội.

Từ khóa: Dữ liệu 3D cấu trúc địa chất, không gian ngầm đô thị, định dạng KML.

Abstract: Sustainable development of urban subsurface space is an inevitable direction to address population growth, limitations of surface land resources, and the need to improve the efficiency of urban infrastructure utilization. However, the exploitation and use of underground space are directly governed by geological conditions, which are characterized by complex stratigraphic structures, pronounced heterogeneity of soil and rock layers, and the presence of unfavorable geological and engineering-geological processes. Therefore, the establishment and

management of a high-reliability geological data system constitute a critical requirement for the planning, design, construction, and operation of underground structures. This paper presents the development of a three-dimensional (3D) geological structure database for the Hanoi area, based on the integrated use of engineering geological borehole data, geophysical survey results, and geographic information systems (GIS). The 3D data model enables detailed simulation of subsurface stratigraphy, supports effective visualization, facilitates geological risk assessment, and optimizes the design solutions for underground works. The dataset is organized in Keyhole Markup Language (KML) format, enabling efficient deployment and visualization on WebGIS platforms, thereby contributing to improved management efficiency and the sustainable development of urban underground space in Hanoi.

Keywords: 3D geological structure data; urban underground space; Keyhole Markup Language (KML).

1. Vai trò của cơ sở dữ liệu 3D cấu trúc nền địa chất

Trong bối cảnh đô thị hóa nhanh và áp lực lớn về không gian xây dựng, khai thác không gian ngầm đô thị tại Hà Nội đang trở thành giải pháp chiến lược cho phát triển hạ tầng giao thông, gara ngầm và các công trình kỹ thuật ngầm. Tuy nhiên, khu vực Hà Nội có nền địa chất phức tạp, phân bố nhiều lớp đất yếu, tầng nước ngầm phát triển và tiềm ẩn nguy cơ sụt lún, ngập úng cũng như các sự cố địa chất công trình. Cơ sở dữ liệu 3D cấu trúc nền địa chất đóng vai trò cốt lõi trong việc cung cấp cái nhìn tổng thể, liên tục và trực quan về cấu trúc địa tầng, mối quan hệ không gian giữa các lớp đất đá, tầng chứa nước

ĐỊA KỸ THUẬT - TRẮC ĐỊA

và các đới đứt gãy tiềm ẩn. So với các mô hình 2D truyền thống, mô hình 3D cho phép tích hợp đồng bộ dữ liệu khoan, địa vật lý và GIS, từ đó nâng cao độ chính xác trong đánh giá điều kiện nền, dự báo rủi ro và lựa chọn phương án thiết kế, thi công phù hợp. Việc ứng dụng cơ sở dữ liệu 3D không chỉ góp phần giảm thiểu rủi ro kỹ thuật và chi phí khảo sát bổ sung, mà còn là nền tảng khoa học quan trọng cho quản lý, khai thác và phát triển bền vững không gian ngầm đô thị Hà Nội.

2. Đặc điểm cấu trúc nền địa chất đô thị trung tâm Hà Nội

Theo kết quả nghiên cứu của các tác giả Ngô Quang Toàn và Hoàng Ngọc Kỳ, đặc điểm địa chất khu vực Hà Nội được xác lập theo tuổi và nguồn gốc theo thứ tự từ dưới lên trên như sau:

- Thống Pleistocen:

+ Phụ thống Pleistocen dưới là hệ tầng Lệ Chi (aQ₁¹lc);

+ Phụ thống Pleistocen giữa-trên là hệ tầng Hà Nội (ap, am Q₁²⁻³hn);

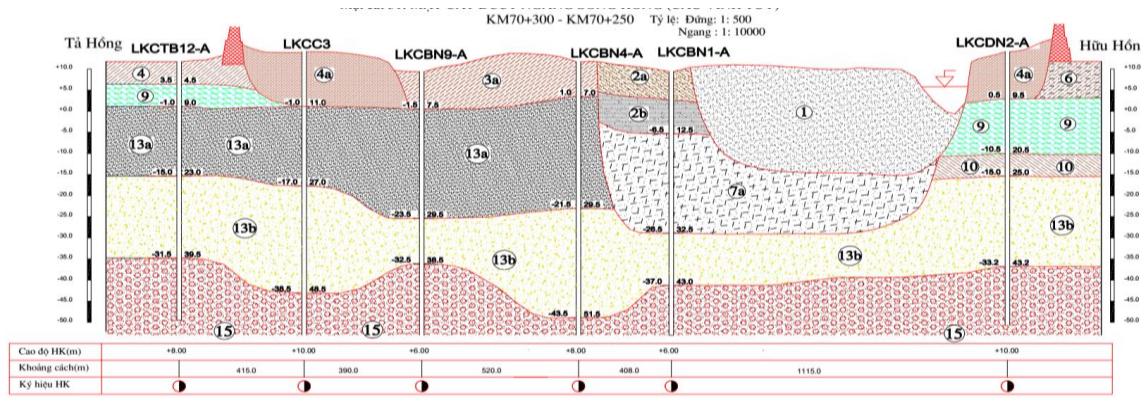
+ Phụ thống Pleistocen trên là hệ tầng Vĩnh Phúc (Q₁³vp).

- Thống Holocen:

+ Phụ thống Holocen dưới-giữa là hệ tầng Hải Hưng (Q₂¹⁻²hh);

+ Phụ thống Holocen trên là hệ tầng Thái Bình (Q₂³tb).

Đặc điểm địa chất khu vực Hà Nội biến đổi đan xen nhiều lớp và biến đổi phức tạp: Cát, sét, cát pha, sét pha và xuất hiện nhiều lớp đất yếu (bùn lùn hữu cơ). Phạm vi các lớp địa chất phân bố thay đổi phức tạp, chiều dày biến đổi mạnh (Hình 1).



Hình 1. Mặt cắt địa chất điển hình khu vực Hà Nội

3. Thiết lập cơ sở dữ liệu 2D cấu trúc nền địa chất khu vực Hà Nội

3.1 Cơ sở lý thuyết địa thống kê trong xây dựng mô hình cấu trúc nền địa chất

Địa thống kê là ngành khoa học ứng dụng các phương pháp thống kê không gian để nghiên cứu quy luật phân bố và mức độ biến thiên của các đặc trưng địa chất trong không gian. Trong xây dựng mô hình cấu trúc nền địa chất, các tham số như cao độ mặt địa tầng, bề dày lớp đất đá, chỉ tiêu cơ lý của đất được xem là các biến ngẫu nhiên không gian, tồn tại mối tương quan phụ thuộc vào khoảng cách và phương. Nền tảng của địa thống kê dựa trên các giả thiết về tính dừng, tính liên tục địa chất và tính đẳng hướng hoặc dị hướng của môi trường địa chất. Cấu trúc không gian của các biến địa chất

được mô tả thông qua hàm tương quan, đặc biệt là variogram, cho phép định lượng mức độ liên tục và quy mô biến đổi của các lớp đất đá. Trên cơ sở mô hình variogram, các phương pháp nội suy địa thống kê, điển hình là kriging, được phát triển nhằm ước lượng giá trị của các tham số địa chất tại các vị trí chưa có số liệu với sai số nhỏ nhất và không chệch, đồng thời cho phép xác định mức độ bất định của kết quả dự báo.

3.2 Dữ liệu 2D cấu trúc nền địa chất khu vực Hà Nội

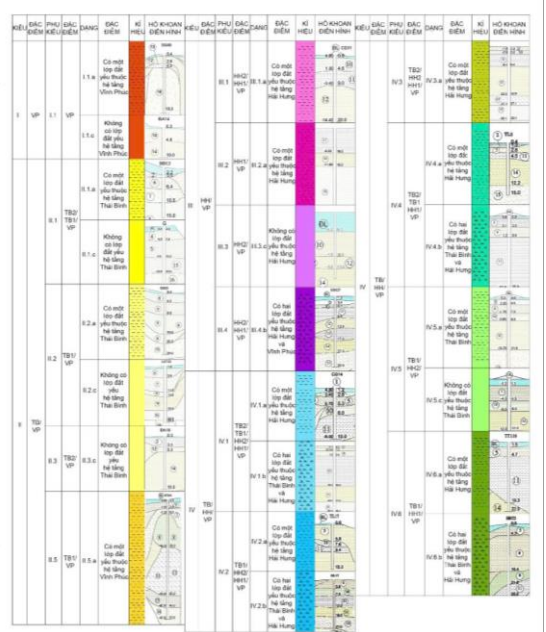
Trên cơ sở lý thuyết địa thống kê, địa chất đô thị Hà Nội được phân chia làm thành 19 lớp với các thành tạo đất đá khác nhau về thành phần, trạng thái, tuổi, nguồn gốc và điều kiện hình thành tương ứng. Trên cơ sở xử lý, tổng hợp các kết quả phân

ĐIẢ KỸ THUẬT - TRẮC ĐỊẢ

tích về thành phần vật chất, cổ sinh, hoá lý môi trường, địa vật lý (carota lỗ khoan), tuổi tuyệt đối (C14) từ số liệu hàng nghìn hố khoan thể hiện trong (Hình 2). Trên cơ sở dữ liệu về thành phần, tính chất, sự phân bố của các lớp đất, cấu trúc địa chất được phân chia thành các kiểu, các phụ kiểu dựa

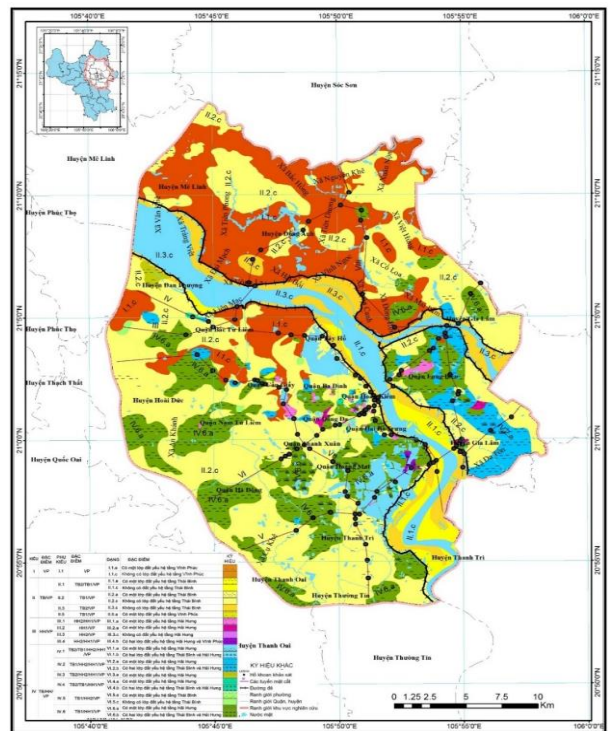
vào tổ hợp quan hệ giữa các hệ tầng và các phụ hệ tầng và các dạng phụ thuộc vào sự có mặt hay vắng mặt của các lớp đất có thành phần và tính chất đặc biệt. Theo các nguyên tắc phân chia kể trên cấu trúc nền Hà Nội phân chia thành 4 kiểu, 16 phụ kiểu và 25 dạng cấu trúc nền được thể hiện trong Hình 3.

Hệ tầng	Tuổi	Phụ hệ tầng	Nguồn gốc	Ký hiệu	Phân vị DCCT-DKT	Mô tả
Thái Bình	Hiện đại				Đất lấp	Đất lấp thành phần hỗn tạp, dày phổ biến 1 - 5,8m
					1	Bùn đáy ao hồ
	Holocen trên	Phụ hệ tầng trên (phần giữa hai con đê)	Trầm tích sông	aQ_2^3/b_2	2	Cát lỏng sông, bãi bồi di động ven sông, trạng thái rời xốp, dày 10 - 15m (12.5m)
					3	Sét pha - cát pha bãi bồi thấp, trạng thái dẻo mềm, dày 5 - 7m (6m)
					4	Sét - sét pha xen kẹp cát pha màu nâu gu, nâu xám trạng thái dẻo cứng, dẻo mềm, dày 4 - 5m (4.5m)
					5	Sét, sét pha màu nâu vàng, trạng thái dẻo cứng, dẻo mềm, dày 5 - 20m (12.5m)
		Phụ hệ tầng dưới	Trầm tích hồ đầm lầy	lbQ_2^3/b_1	6	Sét pha màu nâu xám, trạng thái dẻo chảy lẫn ít hữu cơ, dày 6 - 12m (9m)
					7	Sét pha xen kẹp cát pha màu nâu xám, trạng thái dẻo mềm, dày 0,2 - 26m (13.1m)
			Trầm tích sông ven biển	aQ_2^3/b_1	8	Cát hạt nhỏ, hạt mịn, hạt bụi màu xám xanh, trạng thái chặt vừa, dày 0,6 - 32,5m (16.55m)
					9	Sét pha màu nâu xám, dẻo mềm, có chỗ xen kẹp cát pha, cát, dày 5 - 15m (10m)
Hệ tầng Hải Hưng	Holocen dưới - giữa	Phụ hệ tầng giữa	Trầm tích biển	mQ_2^{1-2}/hh_2	10	Sét màu xám xanh, trạng thái dẻo mềm - dẻo cứng, dày 0.5 - 4m (2m)
		Phụ hệ tầng dưới	Trầm tích hồ đầm lầy	lbQ_2^{1-2}/hh_1	11	Bùn sét màu xám đen lẫn hữu cơ, dày 2 - 20m
Hệ tầng Vĩnh Phúc	Pleistocen trên	Phụ hệ tầng trên	Trầm tích sông	aQ_1^3/vp_3	12	Sét, sét pha màu nâu vàng, xám trắng, loang lổ, có lẫn kết vón, trạng thái nửa cứng, dẻo cứng, dày 8 - 18m
					13	Sét pha màu xám đen lẫn hữu cơ, trạng thái dẻo chảy, dày 1,6 - 8m (4.8m)
		Phụ hệ tầng dưới	Trầm tích sông	aQ_1^3/vp_1	14	Cát pha xen kẹp sét pha, màu xám vàng, trạng thái dẻo, dày 3,4 - 7,3m (5.25m)
					15	Cát hạt nhỏ màu nâu vàng, dày 3,3 - 10,3m (6.8m)
					16	Cát hạt trung lẫn sạn, sỏi màu xám vàng, xám trắng, dày 8 - 15 m (11.5m)
					17	Sét pha - cát pha màu nâu xám, xám ghi, trạng thái dẻo mềm, đôi chỗ lẫn hữu cơ, sạn sỏi, dày 5,5 - 12m
Hệ tầng Hà Nội	Pleistocen giữa - trên	Không phân chia	Trầm tích sông, lù	apQ_1^{2-3}/hm	18	Cuối sỏi đôi chỗ lẫn cát sét màu xám, xám vàng, dày 15 - 35m
					19	Cuối sỏi đôi chỗ lẫn cát, cát pha, sét màu xám ghi, xám nâu, dày 14 - 24m
Hệ tầng Lê Chi	Pleistocen dưới	Không phân chia	Trầm tích sông	aQ_1^1/lc		



Hình 2. Cột địa tầng các lớp và mặt cắt tương ứng

Kiểu	ĐẶC ĐIỂM	PHỤ KIỂU	ĐẶC ĐIỂM	DẠNG	ĐẶC ĐIỂM		
I	VP	I.1	VP	I.1.a	Có một lớp đất yếu hệ tầng Vĩnh Phúc		
				I.1.c	Không có một lớp đất yếu hệ tầng Vĩnh Phúc		
II	TB/VP	II.1	TB1/VP	II.1.a	Có một lớp đất yếu hệ tầng Thái Bình		
				II.1.c	Không có đất yếu hệ tầng Thái Bình		
				II.2.a	Có một lớp đất yếu hệ tầng Thái Bình		
		II.2	TB1/VP	II.2.c	Không có lớp đất yếu hệ tầng Thái Bình		
				II.3	TB2/VP	II.3.c	Không có lớp đất yếu hệ tầng Thái Bình
				II.4	TB2/TB1/VP	II.4.a	Có một lớp đất yếu hệ tầng Vĩnh Phúc
II.4.b	Có hai lớp đất yếu hệ tầng Thái Bình và Vĩnh Phúc						
II.5	TB1/VP	II.5.a	Có một lớp đất yếu hệ tầng Vĩnh Phúc				
III	HH/VP	III.1	HH2/HH1/VP	III.1.a	Có một lớp đất yếu hệ tầng Hải Hưng		
				III.2.a	Có một lớp đất yếu hệ tầng Hải Hưng		
		III.3	HH2/VP	III.3.c	Không có đất yếu hệ tầng Hải Hưng		
				III.4	HH2/HH1/VP	III.4.b	Có hai lớp đất yếu hệ tầng Hải Hưng và Vĩnh Phúc
IV	TB/HH/VP	IV.1	TB2/TB1/HH2/HH1/VP	IV.1.a	Có một lớp đất yếu hệ tầng Hải Hưng		
				IV.1.b	Có hai lớp đất yếu hệ tầng Thái Bình và Hải Hưng		
		IV.2	TB1/HH2/HH1/VP	IV.2.a	Có một lớp đất yếu hệ tầng Hải Hưng		
				IV.2.b	Có hai lớp đất yếu hệ tầng Thái Bình và Hải Hưng		
		IV.3	TB2/HH2/HH1/VP	IV.3.a	Có một lớp đất yếu hệ tầng Hải Hưng		
				IV.4	TB2/TB1/HH1/VP	IV.4.a	Có một lớp đất yếu hệ tầng Hải Hưng
						IV.4.b	Có hai lớp đất yếu hệ tầng Thái Bình và Hải Hưng
IV.5	TB1/HH2/VP	IV.5.a	Có một lớp đất yếu hệ tầng Thái Bình				
IV.5.c	Không có lớp đất yếu hệ tầng Thái Bình						



Hình 3. Bản đồ cấu trúc nền khu vực đô thị Hà Nội

4. Thiết lập cơ sở dữ liệu cấu trúc nền địa chất 3D khu vực Hà Nội

Dữ liệu 3D về cấu trúc địa chất mang lại lợi thế vượt trội trong quy hoạch và khai thác công trình ngầm đô thị Hà Nội. Mô hình 3D không chỉ mô phỏng chính xác các lớp đất, đá, mạch nước ngầm và các đới yếu mà còn thể hiện rõ mối quan hệ không gian giữa chúng, giúp các nhà thiết kế dự báo rủi ro sụt lún, thấm nước hay va chạm với các công trình ngầm hiện hữu. Nhờ khả năng trực quan hóa toàn bộ cấu trúc địa chất ở nhiều góc nhìn, dữ liệu 3D hỗ trợ tối ưu phương án thiết kế, lựa chọn công nghệ thi công phù hợp, giảm thiểu chi phí khảo sát bổ sung và nâng cao độ an toàn. Hà Nội có nền địa chất phức tạp, nhiều khu vực bão hòa nước và mạng lưới hạ tầng ngầm dày đặc, việc ứng dụng dữ liệu 3D là giải pháp then chốt để quản lý không gian ngầm một cách hiệu quả, bền vững và đồng bộ với quy hoạch đô thị hiện đại.

Để xây dựng được cơ sở dữ liệu 3D cấu trúc nền địa chất có độ tin cậy và độ chính xác đáp ứng yêu cầu cho công tác quy hoạch và thiết kế công trình (đặc biệt là công trình ngầm), hệ thống số liệu đầu vào phải bảo đảm tính đầy đủ, liên tục và có khả năng tương quan không gian theo cả mặt bằng và chiều sâu. Dữ liệu chủ đạo bao gồm các công trình thăm dò địa chất công trình như hố khoan, xuyên tĩnh, xuyên tiêu chuẩn, thí nghiệm trong phòng và các kết quả đo địa vật lý (carota lỗ khoan, đo địa chấn, điện trở...), được phân bố hợp lý theo diện tích nghiên cứu và đạt mật độ phù hợp với cấp độ quy hoạch hoặc loại công trình thiết kế. Mật độ hố khoan cần đủ để phản ánh sự biến đổi không gian của các lớp địa tầng, trong đó khoảng cách giữa các công trình thăm dò phải cho phép thiết lập mối tương quan địa chất tin cậy theo mặt cắt và trong không gian 3D; chiều sâu khảo sát phải vượt quá phạm vi ảnh hưởng của công trình dự kiến, đồng thời bao trùm đầy đủ các tầng đất yếu, tầng chứa nước và các đới bất lợi về địa chất công trình. Các dữ liệu hình học (tọa độ, cao độ, ranh giới lớp) phải được chuẩn hóa trong cùng hệ quy chiếu không gian, có kiểm soát sai số đo đạc và được tổ chức theo cấu trúc dữ liệu cho phép tích hợp giữa bản đồ 2D, mặt cắt địa chất và mô hình 3D. Chỉ khi đáp ứng đồng thời yêu cầu về loại hình công trình thăm dò, mật độ phân bố theo diện và chiều sâu, cũng như mối quan hệ tương quan không gian giữa chúng, cơ sở dữ liệu 3D mới đủ điều kiện làm nền tảng khoa học cho đánh giá điều kiện nền, dự báo rủi ro địa

chất và tối ưu hóa phương án quy hoạch – thiết kế công trình.

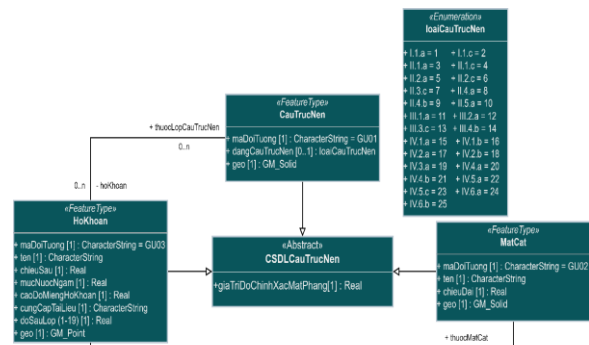
4.1 Cơ sở lý thuyết

Cơ sở dữ liệu 3D được xây dựng theo mô hình CityGML, bởi CityGML được chuẩn dưới dạng ngôn ngữ eXtensible Markup Language đã được xây dựng thành tiêu chuẩn quốc tế do Open GIS Consortium (OGC) đề xuất với mục đích thành lập và trao đổi dữ liệu không gian đô thị 3 chiều. Trong CityGML, các đối tượng địa lý 3D trong đô thị được định nghĩa về mặt hình học, cấu trúc hình học (topology), các tính chất chuyên đề cũng như hình dáng bên ngoài. Các định nghĩa này cho phép mã hóa các đối tượng địa lý 3D trong đô thị phục vụ các mục đích như quy hoạch đô thị, định vị, mô phỏng các tình huống môi trường và quản lý hạ tầng đô thị. Qua các lớp thông tin chuyên đề này giúp hiển thị tất cả các đối tượng của đô thị (Hình 3), cụ thể trong một thành phố bao gồm nhà cửa, cây cối, sông ngòi, mặt đường, cầu, hầm, các đối tượng nhỏ như cửa sổ, hệ thống xử lý rác thải, hệ thống vệ sinh công cộng, cột đèn, cột điện,... Đối tượng trong CityGML được biểu diễn theo nguyên tắc đa tỷ lệ với các cấp độ chi tiết khác nhau. Các đối tượng không gian được chia thành 5 mức độ chi tiết (Level of Detail) khác nhau bao gồm LoD0, LoD1, LoD2, LoD3 và LoD4.

4.2 Phương pháp xây dựng cơ sở dữ liệu 3D

Mô hình cơ sở dữ liệu cấu trúc nền là một hệ thống cơ sở dữ liệu đặc biệt để lưu trữ, quản lý và phân tích dữ liệu cấu trúc nền trong không gian ba chiều (3D). Mô hình dữ liệu cấu trúc nền bao gồm 3 gói dữ liệu là:

a. Dữ liệu bản đồ cấu trúc nền 2D: Cơ sở dữ liệu cấu trúc nền địa chất được xây dựng trên cơ sở những quy định chung bao gồm: Kiểu đối tượng, tên, mô tả, tên thuộc tính, kiểu cơ sở, tên các vai trò quan hệ và danh sách các giá trị. Mô hình cơ sở dữ liệu về bản đồ cấu trúc nền mô tả các loại cấu trúc nền đã được phân chia, được trình bày tại Hình 4.



Hình 4. Mô hình gói dữ liệu CSDL cấu trúc nền

b. Dữ liệu mặt cắt địa chất công trình: Cơ sở dữ liệu mặt cắt địa chất công trình được xây dựng trên cơ sở những quy định chung bao gồm: Kiểu đối tượng, tên, mô tả, tên thuộc tính, kiểu cơ sở, tên các vai trò quan hệ và danh sách các giá trị. Mô hình cơ sở dữ liệu về mặt cắt địa chất công trình mô tả các lớp đất được trình bày tại Hình 5.

```

«FeatureType»
  MatCat
+ maDoiTuong [1] : CharacterString = GU02
+ ten [1] : CharacterString
+ chieuDai [1] : Real
+ geo [1] : GM_Solid
    
```

Hình 5. Mô hình gói dữ liệu mặt cắt địa chất công trình

c. Dữ liệu về hố khoan ĐCCT: Cơ sở dữ liệu hố khoan được xây dựng trên cơ sở những quy định chung bao gồm: Kiểu đối tượng, tên, mô tả, tên thuộc tính, kiểu cơ sở, tên các vai trò quan hệ và danh sách các giá trị. Mô hình cơ sở dữ liệu về hố khoan địa chất công trình mô tả các lớp đất đá đã được phân chia, được trình bày tại Hình 6.

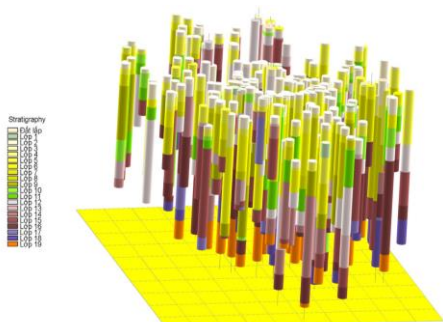
```

«FeatureType»
  HoKhoan
+ maDoiTuong [1] : CharacterString = GU03
+ ten [1] : CharacterString
+ chieuSau [1] : Real
+ mucNuocNgam [1] : Real
+ caoDoMiengHoKhoan [1] : Real
+ cungCapTaiLieu [1] : CharacterString
+ doSauLop (1-19) [1] : Real
+ geo [1] : GM_Point
    
```

Hình 6. Mô hình gói dữ liệu hố khoan

4.3 Dữ liệu 3D định dạng Keyhole Markup Language (KML)

Các dữ liệu 3D cấu trúc nền địa chất được thiết lập trên định dạng Keyhole Markup Language (KML), bởi đây là một định dạng tệp được phát triển bởi Google, dựa trên XML (eXtensible Markup Language), nhằm mục đích biểu diễn và quản lý



Hình 7. Dữ liệu 3D trụ hố khoan

thông tin địa không gian (geospatial data) trong các ứng dụng như Google Earth, Google Maps, và các phần mềm mô hình hóa 3D khác. KML cho phép lưu trữ và hiển thị các đối tượng địa lý 3D, bao gồm điểm (points), đường (lines), đa giác (polygons), và mô hình 3D phức tạp (3D models) như cấu trúc địa chất, địa hình, hoặc công trình ngầm, kèm theo các thuộc tính như độ cao (elevation), mô tả văn bản, và siêu dữ liệu (metadata). Dữ liệu đầu vào của hệ thống gồm các định dạng sau: Định dạng shapefile với yêu cầu tối thiểu 2 file *.shp và *.dbf và định dạng dữ liệu KML. Cơ sở dữ liệu 3D lên trên hệ thống WebGIS được thực hiện theo quy trình sau:

(a) Dữ liệu định dạng shapefile sẽ được thu thập và chuẩn hóa thông qua phần mềm khác nhau như ArcGIS hoặc QGIS trước khi đưa vào hệ thống (khâu thu thập và chuẩn hóa dữ liệu được trình bày trong các chương bên trên). Dữ liệu shapefile đầu vào gồm 6 files (theo đúng chuẩn định dạng shapefile) hoặc yêu cầu tối thiểu 2 file *.shp hoặc *.dbf.

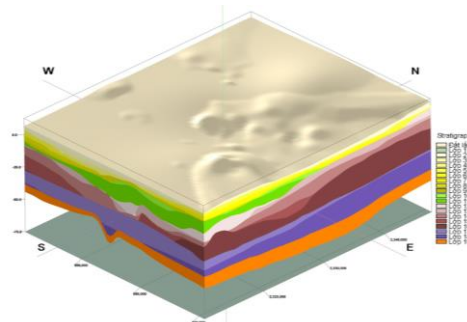
(b) Sau khi dữ liệu được tải lên người dùng có thể hiển thị như màu sắc, kiểu thể hiện (symbol) cho các lớp dữ liệu.

(c) Dữ liệu sau khi được tải lên và cấu hình sẽ được tự động hiển thị trong trang website bản đồ 2D và 3D.

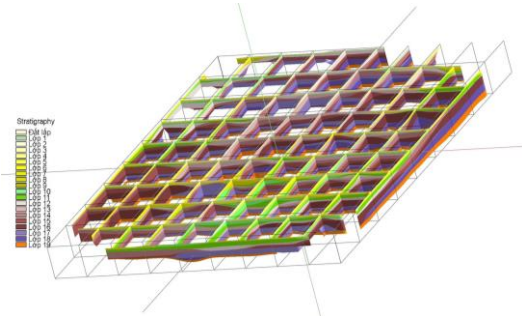
(d) Lấy ID dữ liệu sau đó cập nhật vào hệ thống.

4.4 Kết quả xây dựng cấu trúc nền địa chất 3D khu vực Hà Nội

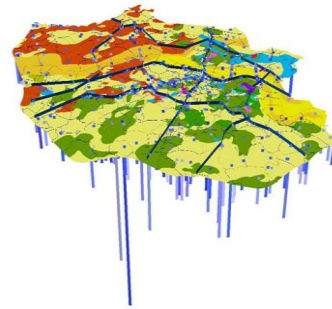
- Từ hơn 1000 hố khoan khảo sát thu thập, các mặt cắt địa chất công trình khu vực đô thị trung tâm Hà Nội và phân tích xử lý bằng các phần mềm chuyên ngành. Cấu trúc nền địa chất khu vực trung tâm đô thị Hà Nội được thiết lập thành một tập dữ liệu mô phỏng dưới dạng 3D (từ Hình 7 đến Hình 10).



Hình 8. Dữ liệu hiển thị 3D các lớp địa chất

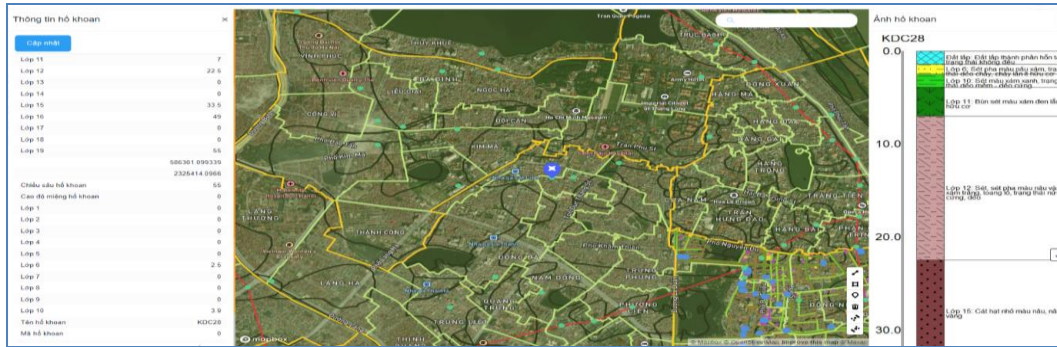


Hình 9. Dữ liệu 3D hiển thị các mặt cắt địa chất

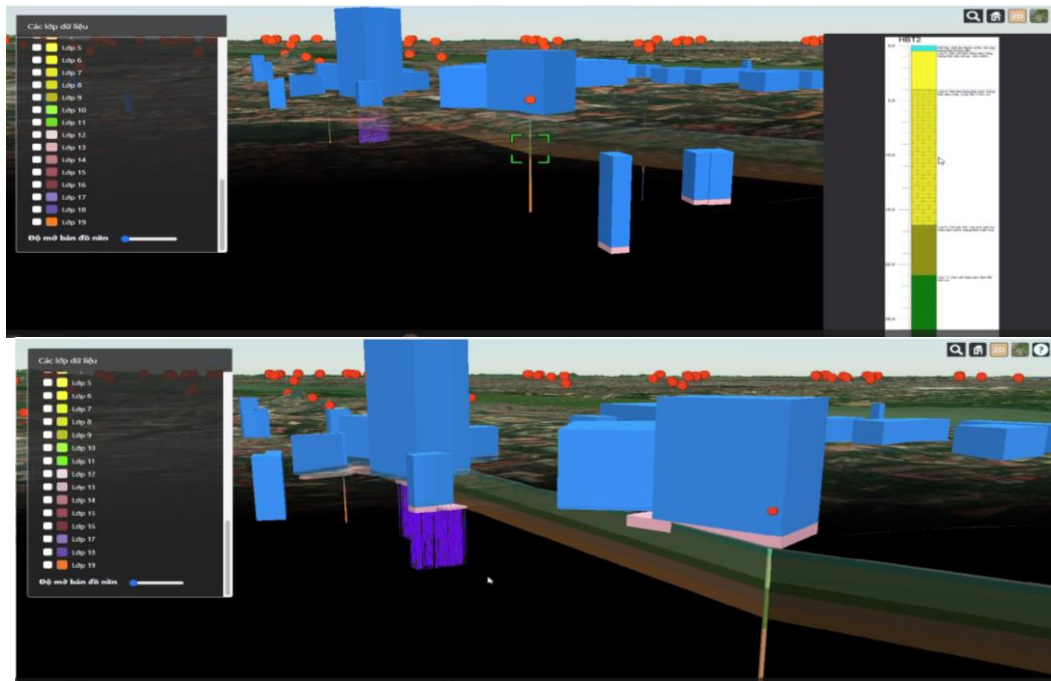


Hình 10. Cấu trúc nền địa chất 2D phía trên và hồ khoan 3D phía dưới

- Dữ liệu 2D và 3D cấu trúc nền địa chất được thể hiện trên WebGIS (Hình 11 và Hình 12).



Hình 11. Dữ liệu 2D hồ khoan



Hình 12. Dữ liệu 3D các lớp cấu trúc địa chất và trụ địa chất hồ khoan

5. Kết luận và kiến nghị

** Kết luận:*

Việc sử dụng dữ liệu 3D cấu trúc nền địa chất trong khai thác không gian ngầm đô thị tại Hà Nội đã chứng minh là một dữ liệu quan trọng và hiệu quả, góp phần giải quyết các thách thức địa chất phức tạp của vùng đồng bằng sông Hồng. Khai thác không gian ngầm tại Hà Nội mang lại lợi ích lớn nhưng rủi ro sụt lún và ô nhiễm nước ngầm cao do

địa chất yếu và đô thị hóa nhanh. Để giảm thiểu cần:

- Sử dụng mô hình 3D địa chất (GeoModeller) để dự báo rủi ro trước thi công;
- Áp dụng công nghệ chống lún và hệ thống xử lý nước thải trong dự án ngầm;
- Quan trắc thời gian thực (real-time monitoring) mực nước ngầm và sụt lún tại các khu vực có nguy cơ xảy ra hiện tượng sụt lún.

* Khuyến nghị:

- Tối ưu hóa việc sử dụng dữ liệu 3D trong khai thác không gian ngầm đô thị Hà Nội;

- Chính quyền Hà Nội nên hợp tác với Viện nghiên cứu và các đơn vị nghiên cứu để xây dựng hệ thống dữ liệu 3D toàn diện, cập nhật định kỳ hàng năm với tích hợp công nghệ GIS và AI để dự báo rủi ro thời gian thực;

- Thiết lập hệ thống giám sát cục bộ (local monitoring) tại các khu vực rủi ro cao sử dụng cảm biến IoT để theo dõi mực nước ngầm và độ lún, với cảnh báo sớm. Đồng thời, giảm khai thác nước ngầm bằng cách chuyển sang nguồn nước mặt hoặc tái sử dụng nước thải (water reuse);

- Khuyến khích hợp tác quốc tế với các nước như Nhật Bản (JICA) hoặc Hà Lan để chuyển giao công nghệ 3D, đồng thời đào tạo chuyên gia địa chất tại các viện nghiên cứu Việt Nam để nâng cao năng lực;

- Chính sách và pháp lý: Đề xuất tích hợp dữ liệu 3D vào Luật Xây dựng 2014 và Nghị định 40/2019/NĐ-CP về đánh giá tác động môi trường, yêu cầu các dự án ngầm phải có báo cáo 3D địa chất trước khi phê duyệt.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Trần Mạnh Liễu (2010), *Nghiên cứu định hướng quy hoạch, quản lý sử dụng và khai thác không gian ngầm đô thị Hà Nội*, Mã số TC - ĐT/ 05 - 06 – 2, Báo cáo tổng kết đề tài, Viện KHCN Xây dựng, Hà Nội.
- [2] Nguyễn Trúc Anh (2012), *Nghiên cứu hướng dẫn thiết kế quy hoạch không gian ngầm lồng ghép trong đồ án quy hoạch đô thị*, Mã số TC 04-08, Báo cáo đề tài, Viện Quy hoạch Xây dựng Hà Nội.
- [3] Ban dự án đường sắt đô thị Hà Nội (HRB) (2008), *Dự án Tuyến đường sắt đô thị thí điểm Thành phố Hà Nội (đoạn Nhổn - Ga Hà Nội)*, Báo cáo nghiên cứu khả thi, Công ty tư vấn Systra, Hà Nội.
- [4] Công ty Almec, Công ty Nippon Koei, Công ty Yachiyo (2007), *Chương trình phát triển đô thị tổng thể Thủ đô Hà Nội (HAIDEP)*, Báo cáo cuối cùng, Cơ quan hợp tác quốc tế Nhật Bản (JICA), Ủy ban Nhân dân Thành phố Hà Nội.
- [5] Công ty PBI Japan, Công ty JARTS, Công ty Nippon Koei (2007), *Dự án xây dựng tuyến đường sắt đô thị Thành phố Hà Nội tuyến 2: Từ Liêm/Nam Thăng Long –*

Trần Hưng Đạo, Báo cáo cuối cùng, Ngân hàng hợp tác quốc tế Nhật Bản (JBIC), Ủy ban Nhân dân Thành phố Hà Nội,.

- [6] Phan Văn Hiến (2004), *Nghiên cứu ứng dụng phương pháp hiện đại để điều tra, lập bản đồ công trình ngầm một số khu vực của thành phố Hà Nội*, Báo cáo, Trường ĐH Mỏ - Địa chất, Hà Nội.
- [7] Trần Mạnh Liễu (2018), *Chuẩn hóa các kết quả nghiên cứu về Địa kỹ thuật - Môi trường thành phố Hà Nội phục vụ công tác quản lý tài nguyên, quy hoạch, xây dựng và sử dụng đất hiệu quả, bền vững*, Báo cáo tổng kết đề tài, Trường ĐHKHTN – ĐHQGHN, Hà Nội.
- [8] Trần Mạnh Liễu (2010), *Nghiên cứu xây dựng và chuẩn hóa cơ sở dữ liệu công trình ngầm gắn với cấu trúc nền địa chất phục vụ quản lý phát triển không gian ngầm đô thị trung tâm thành phố Hà Nội*, Mã số đề tài: 01C-04/02-2020-03.
- [9] Hà Đình Đức và cộng sự (2020), *Application of 3D Geological Modeling in Urban Tunneling Projects*". Ngoài ra, mô hình dữ liệu 3D cung cấp cơ sở khoa học để lập kế hoạch khai thác không gian ngầm, đảm bảo cân bằng giữa phát triển kinh tế và bảo vệ môi trường.
- [10] Đoàn Thế Tường (2005), *Nghiên cứu làm chủ công nghệ thi công công trình ngầm trong đất yếu ở các đô thị Việt Nam*, Báo cáo tổng kết đề tài, Viện KHCN Xây dựng, Hà Nội.
- [11] Open Geospatial Consortium (2016 - 2019). 3D Tiles Specification
- [12] Avouris N. M., Page B. (eds.) (1995), *Methodology and Applications of Environmental Information Processing*, Kluwer.
- [13] Bickel J.O., Kuesel T.R., King E.H (1995), *Tunnel Engineering Handbook second edition*.
- [14] Bernhardsen T. (1999), *Geographical Information Systems: an introduction*, John Wiley & Sons Inc., New York.
- [15] Zacharias John, (2007), *"Planning Underground Urban Space - Where, When and How?"*, 11th ACUUS Conference, Athens.
- [16] Левченко А. Н., Ленер В. Г. (2002), *Организаия освоения подземного пространства*, москва.
- [17] Российская Академия архитектуры и строительных наук (2004), *Руководство по комплексному освоению подземного пространства крупных городов*.

