

**Karakterisasi Amblesan Tanah Berdasarkan Analisis Data Geoteknik
dan Kedudukan Muka Air Tanah Daerah Semarang Utara, Provinsi Jawa Tengah**

***Characterization of Land subsidence Based on Analysis of Geotechnical Data
and Groundwater Level of North Semarang Area, Central Java Province***

Tulus Pramudyo¹, Dicky Muslim², dan Andi Agus Nur²

¹Badan Geologi

Jalan Diponegoro No. 57 Bandung, 40122 Indonesia

²Fakultas Teknik Geologi, Universitas Padjadjaran

Jalan Raya Bandung-Sumedang Km. 21 Jatinangor, 45363 Indonesia

e-mail: tulus.pramudyo@esdm.go.id / d.muslim@unpad.ac.id

Naskah diterima 6 April 2022, selesai direvisi 10 November 2022, dan disetujui 5 Desember 2022

ABSTRAK

Amblesan tanah merupakan fenomena geologi yang disebabkan adanya pemampatan di bawah tanah. Fenomena ini berkembang secara perlahan dan tidak hanya menyebabkan kerusakan infrastruktur tetapi juga menyebabkan perubahan lingkungan dan bencana geologi. Masalah amblesan tanah di Semarang dipengaruhi di antaranya oleh beban infrastruktur, perubahan muka airtanah dan konsolidasi alamiah lempung. Penelitian amblesan tanah ini dilakukan di dua titik bor teknik (BM-03 dan BM-04) yang terletak di Semarang bagian utara. Metode perhitungan laju amblesan tanah berdasarkan faktor pembebanan menggunakan persamaan konsolidasi primer satu dimensi Terzaghi dengan asumsi tambahan tekanan efektif dari beban bangunan struktur ringan. Perhitungan amblesan tanah akibat penurunan muka air tanah menggunakan metode Numerik Elemen Hingga dengan bantuan perangkat lunak Plaxis 8.6. Hasil analisis amblesan tanah berdasarkan pembebanan dan penurunan muka air tanah kemudian divalidasi dengan laju penurunan tanah berdasarkan data monitoring amblesan tanah dengan menggunakan alat GPS Geodetik periode tahun 2011-2018. Berdasarkan perhitungan amblesan tanah dalam kurun waktu tahun 2011-2018, dengan asumsi pembebanan sebesar 18,4 kN/m² menyebabkan amblesan tanah di BM-03 sebesar 4,75 cm dan BM-04 sebesar 10,06 cm. Penurunan muka air tanah periode 2011-2018 menyebabkan amblesan tanah di BM-03 sebesar 62,10 cm dan BM-04 sebesar 28,80 cm. Hasil monitoring patok pantau dengan GPS Geodetik periode tahun 2011-2018, nilai amblesan tanah di BM-03 sebesar 74,02 cm dan BM-04 sebesar 76,97 cm. Perbedaan nilai hasil pengukuran GPS Geodetik dengan hasil perhitungan amblesan tanah akibat pembebanan dan penurunan muka air tanah, adalah merupakan faktor konsolidasi alami, dengan besaran di BM-03 sebesar 7,17 cm dan BM-04 sebesar 38,11 cm. Karakteristik amblesan tanah daerah penelitian yang berupa lapisan lempung yang tebal (38,6 m-74,5 m) dengan nilai indeks kompresi (Cc) tinggi-sangat tinggi dan OCR<1 serta nilai koefisien konsolidasi (Cv) yang relatif kecil menjadi penyebab lambatnya proses disipasi, yang menyebabkan proses konsolidasi berlangsung lebih lama. Berdasarkan analisis data geoteknik dan kedudukan muka air tanah faktor-faktor penyebab amblesan tanah saling terkait dan saling mengamplifikasi dengan kuantifikasi yang tidak linear setiap tahun.

Kata kunci: Amblesan tanah, konsolidasi alami, lempung, pembebanan infrastruktur, air tanah, Semarang

ABSTRACT

Land subsidence is a geological phenomenon caused by underground compression. This phenomenon develops slowly and not only causes damage to infrastructure but also causes environmental changes and geological disasters. The problem of subsidence in Semarang is influenced by, among others, the burden of infrastructure, changes in groundwater level and natural consolidation of clay. This subsidence study was conducted at two engineering drill points (BM-03 and BM-04) located in northern Semarang. The method of calculating the rate of subsidence based on the loading factor used the Terzaghi one-dimensional primary consolidation equation with the assumption of additional effective pressure from light structural building loads. Calculation of subsidence due to groundwater subsidence used

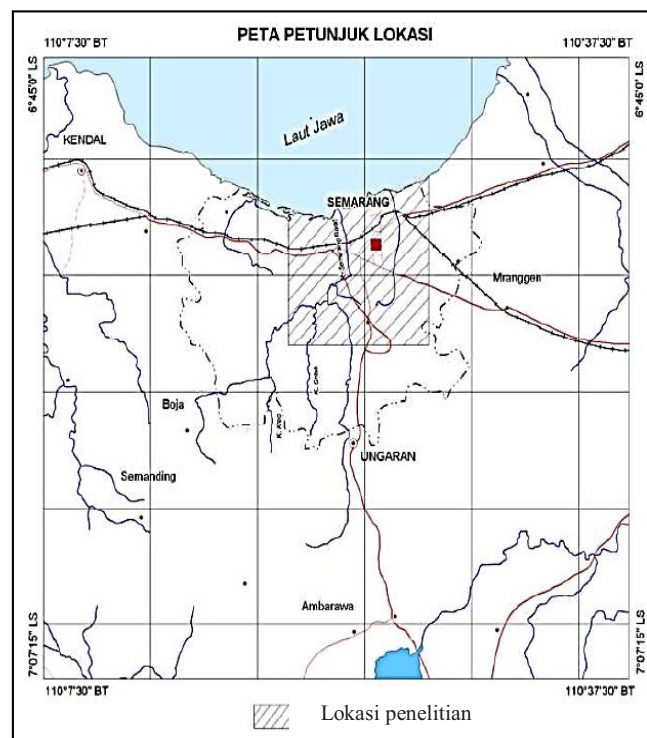
the Finite Element Numerical method with the help of Plaxis 8.6 software. The results of the subsidence analysis based on loading and subsidence of ground water were validated with the rate of land subsidence based on subsidence monitoring data using a Geodetic GPS tool for the period 2011-2018. Based on the calculation of subsidence in the period 2011-2018, assuming a loading of 18,4 kN/m², it caused 32.38 cm of land subsidence in BM-03 and 53.66 cm in BM-04. The decrease in groundwater level for the period 2011-2018 caused land subsidence in BM-03 of 62.20 cm and BM-04 of 28.90 cm. The results of monitoring stakes using GPS Geodetic for the period 2011-2018, the value of subsidence in BM-03 is 101.65 cm and in BM-04 is 103.34 cm. The difference in the value of the Geodetic GPS measurement results with the calculation of land subsidence due to loading and subsidence of the groundwater level, is estimated to be a natural consolidation factor, with a magnitude at BM-03 of 7.07 cm and BM-04 of 20.78 cm. The characteristics of the subsidence of the research area in the form of a thick layer of clay (38.6 m-74.5 m) with a compression index value (C_c) of high-very high and $OCR < 1$ and a relatively small value of the consolidation coefficient (C_v) are the causes of the slow dissipation process, which causes the consolidation process to last longer. Based on the analysis of geotechnical data and the position of the groundwater table, the factors that cause soil wear are interrelated and amplify each other with non-linear quantification every year

Keywords: Land subsidence, natural consolidation, clay, infrastructure loading, groundwater, Semarang

PENDAHULUAN

Secara geografis daerah penelitian terletak di Semarang yang merupakan ibu kota Provinsi Jawa Tengah. Semarang terletak di wilayah pesisir utara Pulau Jawa, yang berada di antara koordinat 110° 21' 25.5" - 110° 21' 26.14" Bujur Timur dan 6° 55' 00" - 7° 03' 0.11" Lintang Selatan (Gambar 1). Fisiografi daerah Semarang menurut van Bemmelen (1949) termasuk pada daerah Zona Dataran Aluvial Jawa Bagian Utara (*Alluvial Plains of Northern Java*). Zona ini

merupakan suatu dataran yang tersusun oleh endapan aluvial. Lebar maksimum zona ini di Jawa Tengah berada di daerah Brebes yang menghampar ke arah selatan dengan lebar sekitar 40 km. Lembah Pemali memisahkan Zona Bogor di Jawa Barat dan Zona Pegunungan Utara. Penyebaran zona ini ke arah timur yaitu di daerah Tegal dan Pekalongan, menyempit hingga mencapai 20 km, dan kemudian menghilang di sebelah timur Pekalongan. Zona ini berkembang kembali di antara Weleri dan Ka-

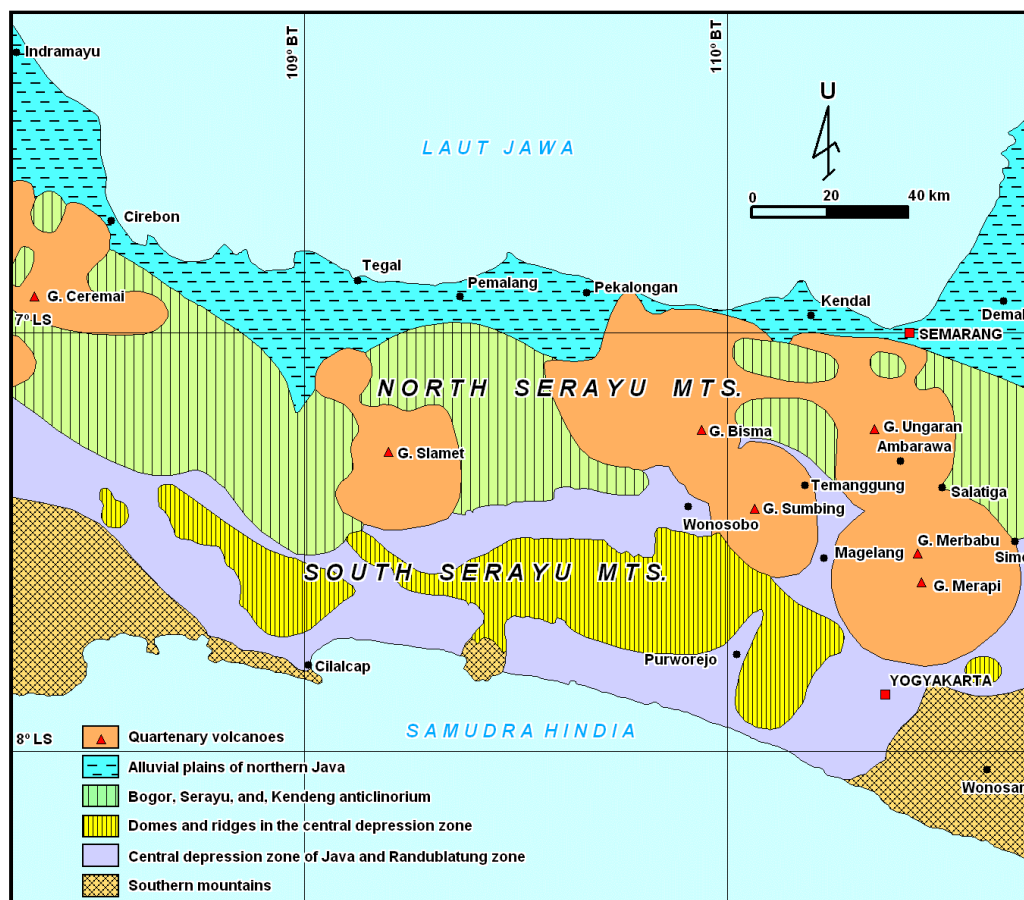


Gambar 1. Lokasi daerah penelitian

liwungu yang dibentuk oleh delta dari Sungai Bodri (Gambar 2).

Fenomena amblesan tanah eksogenik banyak terjadi di kota-kota besar di dunia yang dibangun di atas endapan sedimen Kuartar seperti di Bangkok, Shanghai, San Joaquin, dan lain-lain. Fenomena ini juga terjadi di Kota Semarang. Menurut Abidin dkk. (2010) amblesan tanah bukanlah suatu fenomena baru yang terjadi di Kota Semarang, dan hal ini telah berlangsung lebih dari 100 tahun. Dampak amblesan tanah ini di antaranya meluasnya daerah banjir akibat masuknya air laut ke daratan (rob), retaknya infrastruktur dan bangunan, dan lain-lain. Berdasarkan penelitian Tobing dkk. (2001) besarnya amblesan tanah di Kota Semarang cukup bervariasi. Amblesan tanah yang cukup besar terjadi di bagian utara yaitu di sekitar Pelabuhan, Pondok Hasanudin hingga selatan Stasiun Tawang dengan besar amblesan > 8 cm/tahun.

Kondisi geologi daerah Semarang yang berupa endapan aluvial yang lunak dan mudah mengalami pemampatan memudahkan terjadinya proses konsolidasi secara alamiah. Fenomena amblesan tanah juga dipengaruhi oleh aktivitas manusia yaitu akibat meningkatnya jumlah populasi dan kemajuan teknologi (Prokopovich, 1984). Kegiatan perkembangan Kota Semarang yang cukup pesat dimulai pada tahun 1980 yaitu dengan dilakukannya penimbunan tanah untuk reklamasi pantai dan perbaikan tanah yang dijadikan perumahan atau pengembangan infrastruktur, pelabuhan, dan sebagainya. Selain itu, eksploitasi air tanah sejak tahun 1982 juga mengakibatkan muka air tanah terus menurun (Marsudi, 2001). Penurunan muka air tanah, pembebanan akibat bangunan, dan tanah timbunan mempercepat laju konsolidasi yang pada akhirnya mempercepat amblesan tanah (Sarah dkk., 2014).



Gambar 2. Fisiografi regional daerah Semarang (Bemmelen, 1949).

METODE PENELITIAN

Penelitian dilakukan dengan mengumpulkan data meliputi kondisi geologi, kondisi geologi teknik dan hasil uji laboratorium sifat fisik dan mekanik sampel tanah tak terganggu (UDS) dari pengeboran teknik di BM-03 Madukoro dan BM-04 Kaligawe (PATGTL, 2010), data muka air tanah dari sumur pantau Madukoro dan sumur pantau LIK Kaligawe (2011-2018) serta data monitoring geodetik penurunan tanah (PATGTL 2011-2018). Data beban bangunan diperoleh dari perhitungan *live load* dan *dead load* dari asumsi beberapa infrastruktur seperti rumah tinggal, apartemen dan landasan pesawat yang digunakan sebagai tambahan tekanan efektif. Kemudian dihitung amblesan tanahnya dengan menggunakan teori konsolidasi primer satu dimensi Terzaghi.

Analisis perhitungan amblesan tanah akibat penurunan muka air tanah menggunakan metode Numerik Elemen Hingga dengan bantuan perangkat lunak Plaxis 8.6. Data laboratorium dan data sekunder digunakan untuk menentukan parameter tanah yang digunakan pada analisis data Plaxis 8.6 untuk mengetahui faktor amblesan tanah pada BM-03 dan BM-04. Hasil analisis amblesan tanah berdasarkan pembebanan dan penurunan muka air tanah kemudian divalidasi dengan laju penurunan tanah di titik pantau BM-03 dan BM-04 berdasarkan data monitoring GPS Geodetik periode 2011-2018.

Metode pengolahan data awal dilakukan untuk menginterpretasikan data hasil pengeboran geologi teknik BM-03 dan BM-04, serta memperoleh nilai parameter-parameter yang belum tersedia dari hasil uji laboratorium yang akan digunakan dalam perhitungan amblesan tanah. Pengeboran inti bertujuan untuk mengetahui jenis litologi, urutan stratigrafi, dan sifat fisik dan mekanik secara rinci berdasarkan data contoh tanah dan batuan. Hasil interpretasi litologi ini digunakan untuk menganalisis jenis litologi yang memiliki kontribusi terhadap amblesan tanah di daerah penelitian. Interpretasi litologi

juga digunakan untuk menentukan parameter lain yang dibutuhkan dalam perhitungan dengan metode korelasi empiris.

Data parameter sifat fisik dan mekanik tanah dan batuan yang diperoleh dari pengeboran geologi teknik kemudian dilakukan uji laboratorium. Beberapa parameter yang digunakan dalam perhitungan amblesan tanah belum tersedia, oleh karena itu dilakukan perhitungan dan korelasi empiris berdasarkan parameter yang diperoleh dari pengeboran geologi teknik dan hasil uji laboratorium.

Nilai konduktivitas hidrolik (K) untuk tanah kohesif dapat diperoleh dengan persamaan (1) dan untuk tanah nonkohesif berdasarkan persamaan empiris (2) dari Chapuis (2004 dalam Das, 2008), sedangkan konduktivitas hidrolik untuk batuan diperoleh dengan korelasi empiris berdasarkan jenis batuan (Tabel 1).

Tabel 1. Nilai konduktivitas hidrolik untuk batuan (Freeze dan Cherry, 1979)

Batuan	Konduktivitas Hidrolik (m/s)
Batulempung	$10^{-9} - 10^{-13}$
Batuan beku dan metamorf	$10^{-10} - 10^{-14}$
Batupasir	$10^{-6} - 10^{-10}$
Batugamping dan dolomit	$10^{-6} - 10^{-9}$

$$c_v = \frac{K}{\gamma_w m_v} \dots \dots \dots (1)$$

$$K = 2,4622 \left(D_{10}^2 \frac{e^3}{1+e} \right)^{0,7825} \dots \dots \dots (2)$$

Dimana:

- K : Konduktivitas hidrolik
- C_v : Koefisien konsolidasi
- γ_w : Berat isi asli
- D_{10} : Prosentase lolos 10%
- e : Angka pori

Nilai *Poisson ratio* tanah dapat diperoleh dengan korelasi empiris (Tabel 2), sedangkan untuk batuan untuk nilai *Poisson ratio* dan modulus elastisitas diperoleh dengan korelasi empiris (Tabel 3).

Tabel 2. Nilai *Poisson ratio* untuk berbagai jenis tanah (Budhu, 2011)

Jenis Tanah	Deskripsi	<i>Poisson ratio</i> (v)
Lempung	<i>Soft</i>	0,35-0,40
	<i>Medium</i>	0,30-0,35
	<i>Stiff</i>	0,20-0,30
	<i>Loose</i>	0,15-0,25
Pasir	<i>Medium</i>	0,25-0,30
	<i>Dense</i>	0,25-0,35

Tabel 3. Nilai *Poisson ratio* dan modulus elastisitas untuk batuan (Briaud, 2013)

Batuan	Modulus E (MPa)	<i>Poisson ratio</i> (v)
Dolomit	11000-121000	0,3
Granit	73000-86000	0,23-0,27
Batugamping	21000-48000	0,16-0,23
Kuarsit	82000-97000	0,12-0,15
Batupasir	38000-76000	0,25-0,33

Nilai kohesi dan sudut geser dalam batuan diperoleh dengan korelasi empiris (Tabel 4).

Koefisien kompresibilitas adalah suatu parameter tanah berupa rasio antara regangan volumetrik terhadap tegangan efektif tanah. Penentuan tersebut dilakukan dengan melihat konsistensi tanah sesuai dengan Tabel 5.

Tabel 4. Nilai kohesi dan sudut geser dalam batuan (Peng dan Zhang, 2007)

Batuan	Kohesi (MPa)	Sudut geser dalam (°)
<i>Sandstone</i>	1,91 -13,07	33,41-39,15
<i>Siltstone</i>	1,25-2,40	0,23-0,27
<i>Sandy mudstone</i>	4,00-11,9	31,90-38,4
<i>Mudstone</i>	0,14-8,4	31,8 - 41,52

Tabel 5. Nilai Koefisien Kompresibilitas (Domenico and Mifflin, 1965)

<i>Soil type</i>	m_v (Mpa ⁻¹)
<i>Plastic clay</i>	0,26 to 2,1
<i>Stiff clay</i>	0,13 to 0,26
<i>Medium hard clay</i>	0,069 to 0,13
<i>Loose sand</i>	0,052 to 0,1
<i>Dense sand</i>	0,013 to 0,021
<i>Dense sandy gravel</i>	(0,1 to 5,2) x 10 ⁻³
<i>Jointed rock</i>	(0,33 to 6,9) x 10 ⁻³
<i>Sound rock</i>	≥0,33 x 10 ⁻³
<i>Water</i>	0,44 x 10 ⁻³

Berdasarkan sejarah geologisnya suatu tanah di lapangan pada suatu kedalaman tertentu telah mengalami tegangan efektif maksimum akibat berat tanah di atasnya. Tegangan efektif maksimum ini dapat sama atau lebih kecil dari tegangan efektif pada saat contoh tanah diseli-

diki. Menurut Terzaghi (1941 dalam Skempton, 1969) tanah lempung terkonsolidasi normal merupakan tanah lempung yang belum pernah menerima tegangan yang lebih besar dari beban efektif *overburden* yang ada, tapi jika tegangan efektif *overburden* lebih kecil dari tegangan yang pernah diterima lempung pada masa lalu, maka tanah lempung yang demikian disebut tanah lempung terkonsolidasi berlebih. Tanah terkonsolidasi berlebih menurut Murthy (2002) dapat terbentuk disebabkan oleh beberapa faktor, di antaranya: hilangnya beban *overburden* karena proses erosi, hilangnya beban di atas permukaan karena melelehnya dan keringnya lapisan akibat dekat dengan permukaan.

Overconsolidated Ratio (OCR) didefinisikan sebagai nilai banding tekanan prakonsolidasi (P_c) terhadap tekanan efektif *overburden* pada saat ini (P_o). Nilai OCR ini digunakan untuk mengetahui apakah tanah lempung terkonsolidasi normal (*normal consolidated*) atau mengalami konsolidasi berlebih (*overconsolidated*). Nilai tekanan prakonsolidasi dapat diperoleh berdasarkan hasil uji konsolidasi di laboratorium, sedangkan nilai tekanan efektif *overburden* diperoleh berdasarkan beban *overburden* pada suatu kedalaman. Menurut Budhu (2011) jika nilai $OCR \approx 1$ maka termasuk tanah terkonsolidasi normal, sedangkan jika $OCR > 1$ maka termasuk tanah terkonsolidasi berlebih. Menurut Sophian (2010), jika tanah berlapis dengan berat isi tanah yang bervariasi untuk setiap stratum, maka tekanannya dihitung dengan persamaan (3), yaitu penjumlahan berat isi kering (γ) dikalikan tebal lapisan (Δh).

$$\sigma_v = \sum \gamma \cdot \Delta h \dots\dots\dots (3)$$

Beban infrastruktur digunakan untuk memprediksi potensi penurunan konsolidasi. Dalam penelitian ini, digunakan perhitungan beban mati (*dead load*) dan beban hidup (*live load*) dari desain strukturalnya berdasarkan pada SNI 1727-2018. *Dead load* didefinisikan sebagai berat material konstruksi yang tergabung dalam

bangunan. Sementara itu, *live load* didefinisikan sebagai beban yang dihasilkan dari penggunaan dan kepemilikan bangunan dan tidak termasuk konstruksi atau beban lingkungan. Untuk keperluan keteknikan, *dead load* harus dihitung tersendiri pada masing-masing struktur karena variabilitasnya yang tinggi dalam hal spesifikasi material yang digunakan, dimensi dan lain-lain. Namun, untuk estimasi kasar, *dead load* diasumsikan sebesar 15 kPa untuk struktur ringan, 45 kPa untuk struktur sedang, dan 60 kPa untuk struktur berat (Widiarso, drr., 2019).

Berdasarkan Teori Konsolidasi Satu Dimensi Terzaghi dapat diketahui besar dan waktu amblesan lahan konsolidasi primer. Pada umumnya, konsolidasi akan berlangsung dalam satu arah saja yaitu arah vertikal karena lapisan yang terkena tambahan beban itu tidak dapat bergerak dalam arah horizontal (ditahan oleh tanah di sekelilingnya). Dalam keadaan seperti ini, aliran air juga akan berjalan terutama dalam arah vertikal saja. Ini disebut *one dimensional consolidation*.

Berdasarkan Das & Sobhan (2018), untuk menghitung amblesan total lapisan tersebut digunakan persamaan (4).

$$S = \sum \left[\frac{Cc \cdot H_i}{1 + e_o} \log \left(\frac{p_{o(i)} + \Delta p_{(i)}}{p_{o(i)}} \right) \right]$$

Berdasarkan Das & Sobhan (2018), waktu yang diperlukan untuk konsolidasi dihitung dengan menggunakan persamaan (5).

$$Tv = \frac{Cv \cdot t}{H^2} \dots \dots \dots (5)$$

Dimana:

S = besar penurunan

H_i = tebal sub-lapisan i

P_{o(i)} = tekanan efektif *overburden* untuk sub-lapisan i

Δp_(i) = penambahan tekanan vertikal untuk sub-lapisan i

e_o = angka pori

Cc = indeks pemampatan

Tv = faktor waktu

Cv = koefisien konsolidasi

T = waktu tertentu

Perhitungan amblesan tanah akibat pengambilan air tanah menggunakan Metode Numerik Elemen Hingga dengan bantuan perangkat lunak Plaxis 8.6. Dasar Metode Elemen Hingga adalah membagi model yang rumit menjadi elemen-elemen sehingga perhitungan tegangan dan regangan dapat diselesaikan secara numerik. Persamaan konsolidasi dalam program Plaxis 8.6 mengikuti Teori Biot (1956 dalam Plaxis, 2011). Formulasi dalam teori ini mengikuti prinsip Terzaghi (1943), yaitu tegangan total dibedakan menjadi tegangan efektif dan tekanan air pori, persamaan (6).

$$\underline{\sigma} = \underline{\sigma}' + \underline{m}(P_{steady} + P_{excess}) \dots \dots \dots (6)$$

Persamaan konstitutif pada Metode Elemen Hingga dituliskan dalam bentuk peningkatan (*incremental*) dengan menotasikan peningkatan tegangan efektif sebagai $\underline{\sigma}'$ dan peningkatan regangan sebagai $\underline{\epsilon}$, maka:

$$\underline{\sigma}' = \underline{M} \underline{\epsilon} \dots \dots \dots (7)$$

Untuk menerapkan diskritisasi persamaan elemen hingga dalam analisis program ini digunakan notasi standar:

$$\underline{u} = \underline{N} \underline{v} \underline{p} = \underline{N} \underline{p}_n \underline{\epsilon} = \underline{B} \underline{v} \dots \dots \dots (8)$$

Untuk persamaan peningkatan keseimbangan (*incremental equilibrium equation*) diterapkan pendekatan Elemen Hingga dari persamaan di atas dan diperoleh:

$$\int \underline{B}^T d\underline{\sigma} dV = \int \underline{N}^T d\underline{b} dV + \int \underline{N}^T d\underline{t} dS + \underline{r}_o$$

$$\underline{r}_o = \int \underline{N}^T \underline{b}_o dV + \int \underline{N}^T \underline{t}_o dS - \int \underline{B}^T \underline{\sigma}_o dV$$

dengan memisahkan tegangan total menjadi tekanan air pori dan tegangan efektif, serta dengan menerapkan hubungan konstitutif, maka

akan dihasilkan persamaan keseimbangan titik nodal:

$$\underline{\underline{K}} d\underline{\underline{v}} + \underline{\underline{L}} d\underline{\underline{p}}_n = d\underline{\underline{f}}_n$$

dengan:

$$\underline{\underline{K}} = \int \underline{\underline{B}}^T \underline{\underline{M}} \underline{\underline{B}} dV$$

$$\underline{\underline{L}} = \int \underline{\underline{B}}^T \underline{\underline{m}} \underline{\underline{N}} dV$$

$$d\underline{\underline{f}}_n = \int \underline{\underline{N}}^T d\underline{\underline{b}} dV + \int \underline{\underline{N}}^T d\underline{\underline{t}} dS$$

Formulasi permasalahan aliran yang menggunakan persamaan kontinuitas (*continuity equation*) dalam bentuk sebagai berikut:

$$\frac{\nabla^T R \nabla (\gamma_w y - p_{steady} - p)}{\gamma_w} - \underline{\underline{m}}^T \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \frac{n}{K_w} \frac{\partial p}{\partial t} = 0 \dots (10)$$

Permasalahan aliran dalam solusi *steady state* didefinisikan oleh persamaan:

$$\frac{\nabla^T R \nabla (\gamma_w y - p_{steady})}{\gamma_w} = 0 \dots (11)$$

$$\frac{\nabla^T R \nabla p}{\gamma_w} + \underline{\underline{m}}^T \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} - \frac{n}{K_w} \frac{\partial p}{\partial t} = 0$$

Dalam diskritisasi Elemen Hingga menggunakan prosedur Galerkin dan kondisi batas yang ditentukan tertentu maka diperoleh:

$$-\underline{\underline{H}} \underline{\underline{p}}_n + \underline{\underline{L}}^T \frac{d\underline{\underline{v}}}{dt} - \underline{\underline{S}} \frac{d\underline{\underline{p}}_n}{dt} = \underline{\underline{q}}_n \dots (12)$$

$$\underline{\underline{H}} = \int \frac{(\nabla \underline{\underline{N}})^T \underline{\underline{R}} \nabla \underline{\underline{N}}}{\gamma_w dV}$$

$$\underline{\underline{S}} = \int \frac{n}{K_w} \underline{\underline{N}}^T \underline{\underline{N}} dV$$

dengan $\underline{\underline{q}}_n$ adalah vektor yang berkaitan dengan aliran keluar yang ditentukan pada daerah batas. Dalam plaxis kondisi batas selalu tertutup atau terbuka dengan tekanan air pori berlebih nol sehingga $q=0$. Dalam kenyataan, *bulk modulus* dari air ada tetapi kompresibilitas dari air diabaikan

jika dibandingkan dengan kompresibilitas tanah. Persamaan yang menyatakan keseimbangan dan kontinuitas dalam persamaan matriks diuraikan sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} \underline{\underline{K}} & \underline{\underline{L}} \\ \underline{\underline{L}}^T & -\underline{\underline{S}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{d\underline{\underline{v}}}{dt} \\ \frac{d\underline{\underline{p}}_n}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \underline{\underline{H}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{\underline{v}}_0 \\ \underline{\underline{p}}_{n0} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{d\underline{\underline{f}}_n}{dt} \\ \underline{\underline{q}}_n \end{bmatrix} \dots (13)$$

Untuk menyelesaikan proses integrasi adalah dengan menggunakan simbol Δ untuk notasi peningkatan tertentu (*finite increment*) sehingga akan menghasilkan:

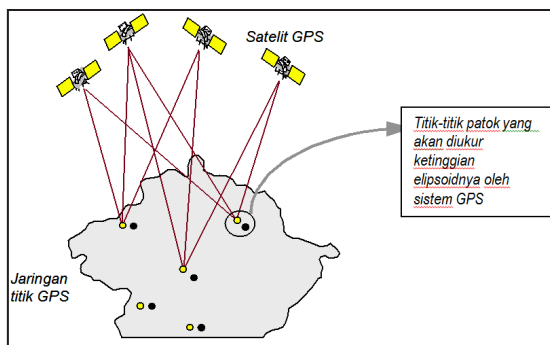
$$\begin{bmatrix} \underline{\underline{K}} & \underline{\underline{L}} \\ \underline{\underline{L}}^T & -\underline{\underline{S}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \underline{\underline{v}} \\ \Delta \underline{\underline{p}}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \Delta t \underline{\underline{H}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{\underline{v}}_0 \\ \underline{\underline{p}}_{n0} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta \underline{\underline{f}}_n \\ \Delta t \underline{\underline{q}}_n \end{bmatrix} \dots (14)$$

dengan:

$$\underline{\underline{S}}^* = \alpha \Delta t \underline{\underline{H}} + \underline{\underline{S}} \quad \underline{\underline{q}}_n^* = \underline{\underline{q}}_{n0} + \alpha \Delta \underline{\underline{q}}_n$$

dengan $\underline{\underline{v}}_0$ dan $\underline{\underline{p}}_{n0}$ yang menyatakan nilai awal $t=0$ sedangkan parameter α adalah koefisien integrasi waktu. Umumnya, koefisien integrasi α dapat bernilai dari 0 hingga 1. Dalam Plaxis digunakan kondisi implisit penuh dengan nilai $\alpha = 1$.

Perhitungan amblesan tanah berdasarkan GPS Geodetik dilakukan dengan metode *static differential* (Gambar 3). Pada metode ini, ditempatkan GPS geodetik/statis pada titik patok pantau BM-03 dan BM-04 yang akan diukur perubahan ketinggian muka tanahnya/amblesannya. Data satelit GPS Geodetik direkam oleh GPS receiver di setiap titik-titik tersebut. Setelah melalui proses perekaman sekitar 8 (delapan) jam, metadata tersebut diproses menggunakan *software* khusus *Trimble Business Centre version 2.5*. Setelah melalui prosesing dan editing didapat hasil berupa ketinggian ellipsoid di setiap titik-titik patok pengukuran tersebut (Hidronav Teknikatama, 2003). Proses tersebut dilakukan selama 8 (delapan) periode yaitu tahun 2011-2018. Hasil pengukuran dalam 8 (delapan) periode tersebut kemudian dibandingkan sehingga diketahui perubahan ketinggian total muka tanah di titik



Gambar 3. Ilustrasi pengukuran topografi oleh GPS Geodetik (modifikasi dari Abidin drr, 2010).

tersebut dalam periode 2011-2018. Data amblesan tanah berdasarkan GPS Geodetik tersebut digunakan sebagai validasi hasil perhitungan amblesan tanah berdasarkan pembebanan dan penurunan muka air tanah.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Daerah penelitian meliputi 2 (dua) titik sumur pemboran teknik yaitu BM-03 Madukoro dan BM-04 Kaligawe. Bor teknik BM-03 terletak di Kantor Dinas ESDM Provinsi Jawa Tengah, Kelurahan Tawangmas, Kecamatan Semarang Barat, Kota Semarang. Bor teknik BM-04 terletak di *Workshop* Dinas Kebersihan dan Pertamanan Kota Semarang, Desa Kaligawe, Kecamatan Gayamsari, Kota Semarang. BM-03 terletak pada koordinat S 6° 57'44.3647", E 110° 23'40.29642" dengan kedalaman bor mencapai 106 meter di bawah permukaan tanah dan BM-04 yang terletak pada koordinat S 6° 57'36.02365", E 110° 26'55.47087" dengan kedalaman bor mencapai 120 meter di bawah permukaan tanah.

Berdasarkan peta geologi daerah penelitian (Gambar 4), titik bor BM-03 Madukoro dan BM-04 Kaligawe tersusun atas endapan permukaan (*surficial deposits*) berumur Holosen berupa aluvium pantai, sungai, dan danau. Endapan pantai litologinya terdiri dari lempung, lanau, pasir, dan campuran di antaranya, mencapai ketebalan 50 m atau lebih. Endapan sungai dan danau terdiri dari kerikil, kerakal, pasir, dan

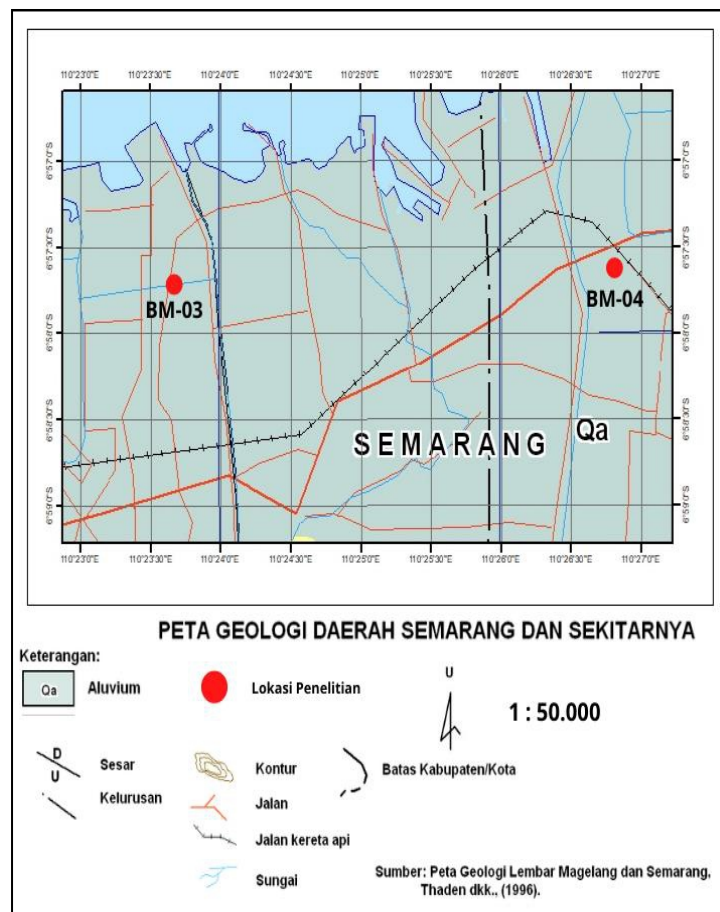
lanau dengan tebal 1-3 m. Bongkah tersusun oleh andesit, batulempung, dan sedikit batupasir. Berdasarkan peta struktur geologi daerah Semarang dan sekitarnya (Marsudi, 2000), di daerah penelitian tidak ditemukan kontrol struktur geologi yang berarti.

Menurut Putranto (2011), secara umum kondisi air tanah Cekungan Semarang Demak mengalir dari arah perbukitan di selatan menuju ke dataran di bagian utara. Hal itu berarti bahwa daerah pengisian (*recharge area*) terletak di Gunung Ungaran, sementara daerah pelepasan (*discharge area*) di dataran sepanjang pantai. Berdasarkan peta hidrogeologi regional lembar Semarang, air tanah mengalir dominan melalui ruang antar butir, sebagian melalui celah maupun rekahan dan di beberapa tempat merupakan daerah air tanah dengan produktivitas rendah. Sistem akuifer dibagi menjadi dua yakni akuifer bebas dan akuifer terkekang. Penampang sistem akuifer Cekungan Semarang Demak dari selatan ke utara.

Berdasarkan *Peta Geologi Teknik Daerah Semarang* (Tobing drr, 2001), daerah penelitian terletak pada satuan lanau lempungan-lanau pasir (mc-ms) yang merupakan endapan rawa, berwarna abu-abu kecoklatan hingga abu-abu kehijauan, sangat lunak-lunak, plastisitas rendah-tinggi, permeabilitas rendah pada umumnya jenuh air, mengandung sisa tumbuh-tumbuhan dan pecahan kerang dengan tebal berkisar sekitar 2,5 - >20 m. Penyebaran satuan ini terutama di sepanjang pantai utara Kota Semarang, memiliki kompresibilitas tinggi. Tata guna lahan umumnya berupa tambak ikan, pemukiman, dan perdagangan.

Tekanan *overburden* efektif (P_o) adalah tekanan vertikal efektif dari tanah asli akibat beban atau lapisan tanah di atas titik tanah asli yang ditinjau. Perhitungan tekanan *overburden* efektif (P_o) pada titik bor BM-03 dan BM-04 dapat dilihat pada Tabel 6.

Berdasarkan perhitungan nilai OCR (Tabel 7), didapat nilai OCR rata-rata <1 baik di BM-03 dan BM-04 sehingga diketahui bahwa tanah



Gambar 4. Peta geologi daerah penelitian (Thaden, drr., 1975).

Tabel 6. Perhitungan tekanan *overburden* efektif (P_o) BM-03 dan BM-04

BM-03					
Kedalaman (mbgl)	Log	H_i (m)	γ (kN/m^3)	$h_i \cdot \gamma$	P_o (kN/m^2)
0 - 2,5		2,5			
2,5 - 22,2		19,7	17,81	350,66	175,33
22,2 - 28,7		6,5	7,96	51,74	376,53
28,7 - 33		4,3	10,4	44,72	
33 - 40,9		8,1	10,4	84,24	
40,9 - 46		5,1	11,75	59,925	
46 - 49,1		3,1	11,75	36,425	609,4975
49,1 - 54,8		5,7	10,4	59,28	
54,8 - 64,3		9,5	10,4	98,8	1180,99
64,3 - 70		5,7	10,4	59,28	
70 - 74,4		4,4	10,4	45,76	
74,4 - 85,8		11,4	12,35	140,79	
85,8 - 86,6		0,8	10,4	8,32	
86,6 - 89,9		3,3	11,75	38,775	
89,9 - 93,6		3,7			
93,6 - 93,75		0,15			
93,75 - 96		2,05			
96 - 98,7		2,7			
98,7 - 102,2		3,5			
102,2 - 103,9		1,7			
103,9 - 106		2,1			

BM-04					
Kedalaman (mbgl)	Log	H_i (m)	γ (kN/m^3)	$h_i \cdot \gamma$	P_o (kN/m^2)
0 - 2		2			
2 - 5		3	8,3065	24,9195	12,45975
5 - 10,5		5,5	13,31567	73,2362	
10,5 - 19,3		8,8	10,51395	92,52276	144,4171
19,3 - 28,1		8,8	9,525233	83,82205	232,5895
28,1 - 37		8,9	11,71173	292,2078	420,6044
37 - 82		45	12,76544	318,4978	725,9572
82 - 114		32			
114 - 117,7		3,7			
117,7 - 119		1,3			
119 - 120		1			

Keterangan:

- Clay
- Silt
- Sand
- Sandy clay
- Clayey sand
- Gravely sand
- Sandstone
- Siltstone
- Conglomerate
- Fill material

Tabel 7 . Nilai *Overconsolidated Ratio* (OCR) daerah penelitian

BM-03				BM-04			
Kedalaman (mbgl)	P _o (kN/m ²)	P _c (kN/m ²)	OCR	Kedalaman (mbgl)	P _o (kN/m ²)	P _c (kN/m ²)	OCR
2,5 - 22,2	175,33	33	0,1882	2 - 5	12,45975	100	8,0258
22,2 - 28,5	376,53	125	0,332	10,5 - 19,3	144,41708	75	0,5193
46 - 49,1	712,3005	150	0,2106	19,3 - 28,1	232,58949	40	0,172
54,8 - 64,3	1283,793	150	0,1168	28,1 - 37	420,60439	100	0,2378
				37 - 82	725,95719	100	0,1377

lempung di daerah penelitian terkonsolidasi normal (*normal consolidated*) dimana tekanan efektif *overburden* pada saat ini (P_o) adalah merupakan tekanan maksimum yang pernah dialami (P_c) oleh tanah itu. Tanah tersebut sedang mengalami konsolidasi dan belum sampai pada kondisi setimbang.

Dalam penelitian ini, penulis menggunakan tambahan tekanan efektif dari beban bangunan struktur ringan yang didasarkan pada hasil monitoring dan pengamatan lapangan tahun 2011-2018, bahwa pembebanan infrastruktur bangunan di sekitar titik bor BM-03 dan BM-04 adalah berupa struktur ringan, yang dapat dilihat pada Tabel 8.

Perhitungan amblesan tanah akibat beban infrastruktur dari tahun 2011-2018 digunakan untuk mengetahui perubahan besar amblesan tanah di daerah penelitian. Hasil total amblesan selama jangka waktu tersebut dikurangi sebesar 10-15% dari total amblesan yang terjadi sebagai koreksi untuk keterandalan perhitungan penurunan tanah (Joseph E. Bowles, 1986; dalam Sophian, 2010), seperti yang dapat dilihat pada Tabel 9.

Karakteristik dari laju amblesan tanah yang terjadi di Semarang Utara memiliki variasi

temporal maupun spasial yang berbeda-beda. Kondisi tersebut terkait dengan faktor-faktor penyebab yang mempengaruhi angka amblesan tanah tersebut. Faktor-faktor tersebut antara lain pengambilan air tanah, konsolidasi alamiah, pembebanan dan aktivitas tektonik. Amblesan tanah terkait dengan fluktuasi muka air tanah, berupa pemompaan air tanah yang melebihi kemampuan pengisian kembali (*recharge*) sebagai akibat peningkatan pengambilan air tanah di area perkotaan dan kawasan industri. Pengambilan air tanah mengakibatkan penurunan muka air tanah di setiap waktunya.

Berdasarkan data kedudukan muka air tanah sumur pantau BM-03 Madukoro dan BM-04 Kaligawe, muka air tanah di lokasi penelitian dari

Tabel 9. Amblesan tanah daerah penelitian periode tahun 2011 - 2018

Tahun	Sc _{n tahun} - 15% x Sc (cm)	
	BM-03	BM-04
2011	0,656515719	1,405633702
2012	1,745335125	3,736851689
2013	2,538431699	5,434911928
2014	3,165514509	6,777528321
2015	3,673603207	7,865372186
2016	4,091535012	8,760185536
2017	4,444500238	9,515902122
2018	4,746368871	10,06221829

Tabel 8. Perhitungan tambahan tekanan efektif untuk bangunan rumah tinggal (Widiarso, drr., 2019)

Dead Load		
Struktur ringan (Widiarso, drr., 2019)	15.00	kN/m ²
Dynamic Load		
Rumah tinggal (hunian satu atau dua keluarga), (SNI 1727-2018)		
~ Loteng yang dapat dihuni dan ruang tidur	1.44	kN/m ²
~ Loteng yang dapat dihuni dan ruang tidur	1.92	kN/m ²
Total	18.4	kN/m ²

tahun 2011 hingga 2018 cenderung mengalami penurunan. Analisis amblesan tanah akibat penurunan air tanah menggunakan metode elemen hingga dengan bantuan program Plaxis 8.6. Parameter-parameter BM-03 dan BM-04 untuk perhitungan Plaxis 8.6 dapat dilihat pada Tabel 10 dan Tabel 11.

Analisis dimulai dengan pembuatan model dilakukan berdasarkan stratigrafi hasil pengeboran geologi teknik yang dilanjutkan dengan memasukkan nilai parameter-parameter yang digunakan untuk perhitungan (Gambar 5). Kemudian dilakukan diskritisasi dan pembuatan jaringan model berdasarkan Metode Elemen Hingga. Selanjutnya dilakukan analisis deformasi secara

vertikal akibat penurunan kedudukan muka air tanah berdasarkan data sumur pantau Madukoro dan sumur pantau LIK Kaligawe (Gambar 6).

Berdasarkan hasil analisis menggunakan Metode Elemen Hingga dengan bantuan perangkat lunak Plaxis 8.6, akibat penurunan muka air tanah dalam kurun waktu 2011-2018 terjadi deformasi sebesar 0,621 m (62,1 cm) pada sumur pantau Madukoro (BM-03), sedangkan pada sumur pantau LIK Kaligawe (BM-04) mengalami deformasi sebesar 0,288 m (28,8 cm.), seperti yang dapat dilihat pada Tabel 12 dan Gambar7).

Analisis dimulai dengan pembuatan model dilakukan berdasarkan stratigrafi hasil pengeboran geologi teknik yang dilanjutkan dengan

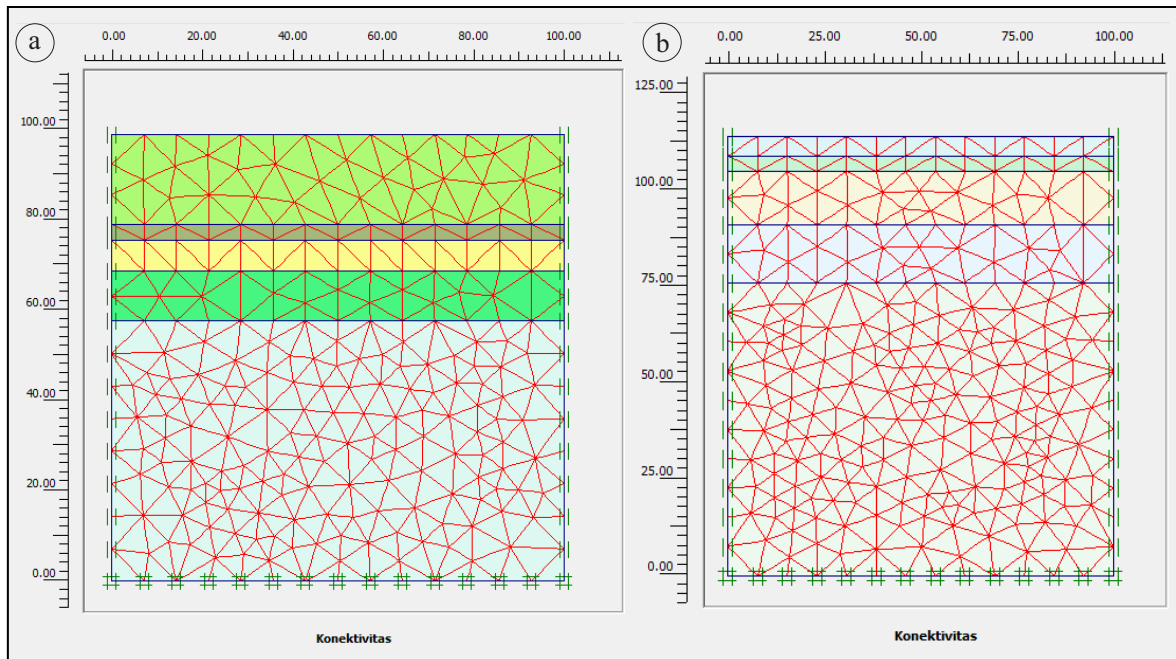
Tabel 10. Nilai parameter BM-03 untuk perhitungan amblesan tanah akibat penurunan muka air tanah

No	Deskripsi Litologi	c (kN/m ²)	Φ (°)	K (m/hari)	E (kN/m ²)	v	γ_d (kN/m ³)	γ_{sat} (kN/m ³)
1	Lempung, abu-abu, sangat lunak, mengandung sedikit pasir dan cangkang kerang	27,459	8,7	9,55676E-06	4,36E+03	0,35	12,080	17,482
2	Lempung, coklat tua, sangat kaku, plastisitas tinggi, impermeable	8,336	0,46	6,72891E-06	3,90E+02	0,20	7,806	14,690
3	Pasi, lempungan, abu-abu - abu-abu tua, lepas - agak padat, ukuran butir halus, dan bentuk butir membundar	18,044	7,4	0,051	2,80E+03	0,25	10,202	16,184
4	Lanau, abu-abu, lunak - kaku, plastisitas rendah-sedang	18,927	12,69	2,43146E-05	8,31E+02	0,30	11,521	17,153
5	Lempung, abu-abu kebiruan, lunak - tegas, mengandung cangkang kerang	29,616	7,15	7,20629E-06	5,50E+03	0,35	0,35	

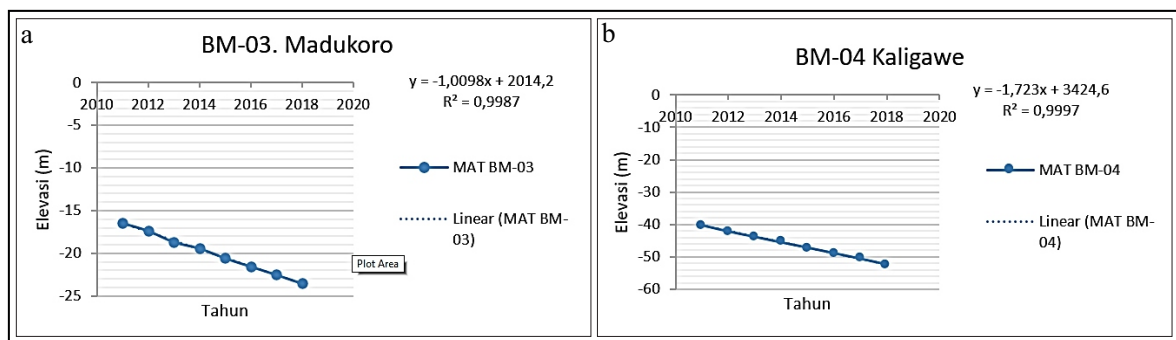
Tabel 11. Nilai parameter BM-04 untuk perhitungan amblesan tanah akibat penurunan muka air tanah

No	Deskripsi Litologi	c (kN/m ²)	Φ (°)	K (m/hari)	E (kN/m ²)	v	γ_d (kN/m ³)	γ_{sat} (kN/m ³)
1	Lempung, abu-abu, sangat lunak, plastisitas tinggi, mengandung cangkang kerang dan impermeabel	8,630	0,43	5,26235E-06	7,00	0,35	8,146	15,048
2	Pasir lempungan, abu-abu, sangat lepas, ukuran butir halus-sedang, bentuk butir membundar, plastisitas rendah-sedang, permeabilitas sedang-tinggi dengan mengandung cangkang kerang	0,392	21,2	0,051	3,85	0,20	13,058	18,284
3	Lempung pasir, abu-abu, sangat lunak, plastisitas tinggi, permeabilitas rendah-impermeabel, mengandung cangkang kerang	9,8555	0,575	8,049E-05	8,24	0,35	9,826	16,137
4	Lanau, abu-abu, lunak-kaku, plastisitas rendah-sedang	18,927	12,69	2,43146E-05	41,95	0,30	11,521	17,153
5	Lempung, abu-abu kehijauan-abu-abu kecoklatan, tegas-kaku, plastisitas tinggi, impermeabel	46,680	12,5	0,550000	106,22	0,25	11,466	17,020

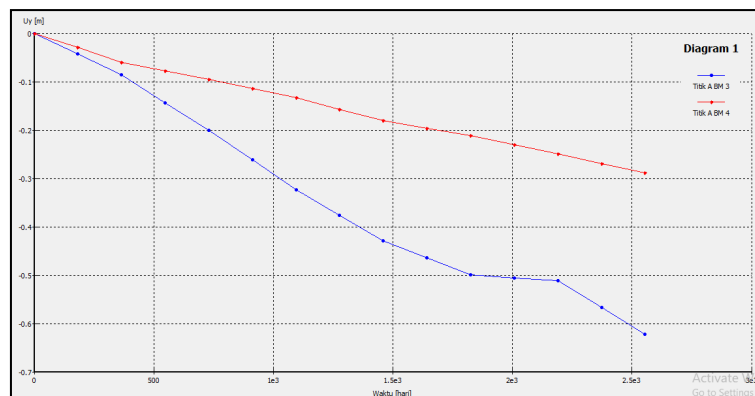
Karakterisasi Amblesan Tanah Berdasarkan Analisis Data Geoteknik
dan Kedudukan Muka Air Tanah Daerah Semarang Utara, Provinsi Jawa Tengah



Gambar 5. Geometri *mesh* dari model penampang BM-03 (a) dan BM-04 (b)



Gambar 6. Kedudukan muka air tanah sumur pantau Madukoro (a) dan sumur pantau LIK Kaligawe (b) periode 2011-2018.



Gambar 7. Grafik penurunan tanah BM-03 dan BM-04 akibat penurunan muka air tanah periode 2011 - 2018

memasukkan nilai parameter-parameter yang digunakan untuk perhitungan (Gambar 5). Ke-

mudian dilakukan diskritisasi dan pembuatan ja-ring model berdasarkan Metode Elemen Hingga.

Selanjutnya dilakukan analisis deformasi secara vertikal akibat penurunan kedudukan muka air tanah berdasarkan data sumur pantau Madukoro dan sumur pantau LIK Kaligawe (Gambar 6).

Berdasarkan hasil analisis menggunakan Metode Elemen Hingga dengan bantuan perangkat lunak Plaxis 8.6, akibat penurunan muka air tanah dalam kurun waktu 2011-2018 terjadi deformasi sebesar 0,621 m (62,1 cm) pada sumur pantau Madukoro (BM-03), sedangkan pada sumur pantau LIK Kaligawe (BM-04) mengalami deformasi sebesar 0,288 m (28,8 cm.), seperti yang dapat dilihat pada Tabel 12 dan Gambar 7).

Tabel 12. Laju amblesan tanah pada BM-03 dan BM-04 akibat penurunan muka air tanah

Tahun	Amblesan Tanah Akibat Penurunan Muka Air tanah (cm)	
	BM-03	BM-04
2011	-	-
2012	8.6	5.9
2013	20	9.6
2014	32.3	13.3
2015	42.8	18
2016	49.9	21.1
2017	51.1	24.9
2018	62.1	28.1

Analisis amblesan tanah dengan monitoring GPS Geodetik dilakukan dalam kurun waktu tahun 2011 -2018 (Gambar 8). Berdasarkan hasil pengukuran amblesan tanah menggunakan GPS Geodetik dalam kurun waktu 2010 - 2018 amblesan tanah yang terjadi di BM-03 sebesar 74,02 cm dan BM-04 sebesar 76,97 cm, seperti yang bisa dilihat pada Tabel 13.

Berdasarkan hasil pengukuran amblesan tanah menggunakan GPS Geodetik dalam kurun waktu 2011-2018, amblesan tanah yang terjadi di BM-03 sebesar 74,02 cm dan BM-04 sebesar 76,97 cm. Hasil perhitungan amblesan tanah akibat pembebanan dalam kurun waktu 2011-2018 di BM-03 adalah sebesar 4,75 cm, dan di BM-04 sebesar 10,06 cm. Hasil perhitungan amblesan tanah akibat penurunan muka air tanah menunjukkan besarnya amblesan tanah di BM-03 adalah sebesar 62,1 cm dan di BM-04 sebesar 28,8 cm.

Perbedaan nilai hasil pengukuran amblesan tanah berdasarkan GPS Geodetik dengan perhitungan akibat pembebanan dan penurunan muka air tanah adalah merupakan amblesan tanah yang terjadi akibat konsolidasi alamiah. Pengaruh dari aktivitas tektonik pada analisis amblesan tanah ini tidak diperhitungkan, dan hal ini disebabkan karena nilai amblesan tanah hasil pemantauan patok tetap hanya menunjukkan nilai amblesan yang terjadi akibat adanya pemampatan pada endapan aluvial. Oleh karena itu, besarnya amblesan akibat konsolidasi alamiah di lokasi BM-03 diperkirakan sebesar 7,17 cm dan di lokasi BM-04 diperkirakan sebesar 38,11 cm Hasil nilai amblesan tanah terhadap hasil perhitungan dapat dilihat pada Tabel 14. Kontribusi konsolidasi alami dalam proses amblesan yang terjadi di lokasi penelitian diperkirakan dipengaruhi oleh tebalnya tanah lempung, nilai OCR < 1, dan nilai indeks kompresi yang tinggi-sangat tinggi sehingga proses konsolidasi



Gambar 8. Pengukuran amblesan tanah dengan menggunakan alat GPS Geodetik di BM-03 (a) dan BM-04 (b).

Tabel 13. Hasil pengukuran laju amblesan tanah BM-03 dan BM-4 berdasarkan monitoring GPS Geodetik periode 2011-2018 (Pramudyo & Sudarsono, 2011; Pramudyo & Kusuma, 2012; Wirabuana & Wafid, 2013; Widyaningrum & Pramudyo, 2014; Pramudyo & Hermawan, 2015; Pramudyo & Destiasari, 2016; Destiasari & Pramudyo, 2017; dan Widyaningrum & Sugalang, 2018)

No	Tahun	Tinggi Titik Pantau BM-03 (cm)	Tinggi Titik Pantau BM-04 (cm)	Laju Amblesan Tanah Titik Pantau BM-03 (cm)	Laju Amblesan Tanah Titik Pantau BM-04 (cm)
1	2011	2.723,87	2.744,13	-	-
2	2012	2.716,51	2.736,15	7,36115	7,98215
3	2013	2.708,62	2.727,16	7,89087	8,99461
4	2014	2.697,66	2.716,28	10,96321	10,87142
5	2015	2.684,98	2.705,39	12,67588	10,89012
6	2016	2.674,25	2.693,63	10,73367	11,76419
7	2017	2.662,19	2.681,12	12,05134	12,51008
8	2018	2.649,85	2.667,16	12,34378	13,95733
		Total		74,0199	76,9657

Tabel 14. Nilai amblesan tanah terhadap hasil perhitungan

Titik Pantau	Nilai amblesan tanah hasil pengukuran titik pantau GPS Geodetik (cm)	Nilai amblesan tanah hasil perhitungan		Konsolidasi alamiah (cm)
		Pembebanan/ Geoteknik (cm)	Penurunan muka air tanah (cm)	
BM-03	74,02	4,75	62,10	7,17
BM-04	76,97	10,06	28,80	38,11

masih terus berlangsung akibat lapisan tanah lempung menahan beban *overburden* di atasnya.

KESIMPULAN

Berdasarkan analisis data 2 bor teknik (BM-03 dan BM-04) dan 2 sumur pantau (Madukoro dan Kaligawe), dan hasil monitoring amblesan tanah dengan GPS Geodetik tahun 2011-2018, faktor yang mempengaruhi amblesan tanah di daerah penelitian adalah pembebanan, penurunan muka air tanah dan konsolidasi alamiah lempung.

Amblesan tanah di daerah penelitian dalam kurun waktu tahun 2011-2018 di titik pantau BM-03 sebesar 74,02 cm dan di titik pantau BM-04 sebesar 76,97 cm, yang terbagi oleh faktor pembebanan menyebabkan amblesan tanah di BM-03 sebesar 4,75 cm dan di BM-04 sebesar 10,06 cm, faktor penurunan muka air tanah menyebabkan amblesan tanah di BM-03 sebesar 62,10 cm dan di BM-04 sebesar 28,80 cm, sedangkan berdasarkan faktor konsolidasi alamiah telah menyebabkan amblesan tanah di BM-03 sebesar 7,17 cm dan di BM-04 sebesar 38,11 cm.

Karakteristik geoteknik daerah penelitian berupa endapan lempung yang tebal (BM-03 ketebalannya 38,6 m dan BM-04 ketebalannya 74,5 m) dengan nilai indeks kompresi (C_c) tinggi-sangat tinggi, nilai $OCR < 1$, serta nilai koefisien konsolidasi (C_v) yang relatif kecil (BM-03 = 0,00031-0,00221 cm^2/detik dan BM-04 = 0,00029-0,00060 cm^2/detik) menjadi penyebab lambatnya proses disipasi, yang menyebabkan proses konsolidasi di daerah penelitian berlangsung lebih lama.

Karakteristik amblesan tanah daerah penelitian berdasarkan data geoteknik dan kedudukan muka air tanah merupakan satu kesatuan yang tidak dapat dipisahkan karena masing masing faktor penyebab amblesan tanah tersebut saling terkait dan saling mengamplifikasi dengan kuantifikasi yang tidak linier setiap tahun (2011-2018).

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih saya ucapkan kepada Pusat Air Tanah dan Geologi Tata Lingkungan yang telah menyediakan data sehingga dapat dilakukan

penelitian mengenai amblesan tanah di daerah Semarang Utara. Bapak Dicky Muslim dan Bapak Andi Agus Nur yang sudah membimbing dalam penyusunan penelitian, serta orang tua, keluarga, rekan dan kerabat yang selalu memberikan dukungan dan semangat dalam penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Abidin H.Z, Andreas H., Gumilar I., Sidiq T.P., Gamal M., Murdohardono D., Supriyadi, dan Fukuda Y., 2010. *Studying Land Subsidence in Semarang (Indonesia) Using Geodetic Methods*. FIG Congress 2010 Facing the Challenges-Building the Capacity.Sydney, Australia.
- Badan Standar Nasional Indonesia, 2020. *Beban Desain Minimum dan Kriteria Terkait Untuk Bangunan Gedung dan Struktur Lain 1727:2020*. Badan Standarisasi Nasional 1727:2020, 8, 1-336.
- Bemmelen van.R.W., 1949. *The Geology of Indonesia, Volume 1A*. The Hague Martinus Nijhoff, Netherland.
- Brinkgreve, R.B.J., Broere, W. 2011. *Manual Plaxis 2D version 8*. Netherland: Delft University of Technology & Plaxis
- Budhu M. 2011. *Soil Mechanics and Foundation*. John Wiley and Sons, Inc.
- Briaud J.L. 2013. *Geotechnical Engineering Unsaturated and Saturated Soils*. John Wiley and Sons, Inc. <https://doi.org/10.1002/9781118686195>
- Das, B. M. dan Sobhan, K. 2018. *Principles of Geotechnical Engineering 9th Edition*. 1-845.
- Destiasari, F. dan Pramudyo, T. 2017. *Monitoring Geologi Teknik Penurunan Tanah Kota Semarang, Provinsi Jawa Tengah*, Pusat Sumber Daya Air Tanah dan Geologi Lingkungan, Badan Geologi KESDM. Laporan tidak dipublikasikan
- Freeze R.A., dan Cheery J.A. 1979. *Groundwater*. Prentice-Hall, Inc
- Gumilar, I., Abidin, H., Z., Hutasoit, L., M., Hakim, D., M., Sarsito, D., A., Andreas, dan H., Sidiq, T., P. 2012. *Studi Pemantauan Penurunan Muka Tanah di Cekungan Bandung dengan Metode Survei GPS dan InSAR*. Indonesian Journal of Geospatial Vol. 1, No. 4, 2012, 44-53. Bandung
- Hidronav Tehnikatama, P.T. 2003. *Petunjuk Singkat Pengoperasian Trimble R7 GNSS (Static Application)*
- Kusuma, WB dan Susanto, A. 2010. *Construction of Benchmark for Land Subsidence Monitoring In Semarang*, Badan Geologi - Georisk Project, Laporan tidak dipublikasikan
- Marsudi, M. 2000. *Prediksi Laju Amblesan Tanah di Dataran Alluvial Semarang Propinsi Jawa Tengah*. Disertasi Program Pascasarjana ITB.
- Peng S., dan Zhang J. 2007. *Engineering Geology for Underground Rocks*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Pramudyo, T dan Destiasari F. 2016. *Monitoring Geologi Teknik Penurunan Tanah Di Daerah Semarang, Provinsi Jawa Tengah*, Pusat Sumber Daya Air Tanah dan Geologi Lingkungan, Badan Geologi KESDM, Laporan tidak dipublikasikan
- Pramudyo, T dan Kusuma, W.B. 2011. *Evaluasi Geologi Teknik Amblesan Tanah Daerah Semarang, Provinsi Jawa Tengah*, Pusat Sumber Daya Air Tanah dan Geologi Lingkungan, Badan Geologi KESDM, Laporan tidak dipublikasikan.
- Pramudyo, T dan Sudarsono, U. 2012. *Monitoring Geologi Teknik Penurunan Tanah Di Daerah Semarang, Provinsi Jawa Tengah*, Pusat Sumber Daya Air Tanah dan Geologi Lingkungan, Badan Geologi KESDM, Laporan tidak dipublikasikan
- Pramudyo, T dan Wafid, A.N. 2015. *Monitoring Geologi Teknik Penurunan Tanah Di Daerah Semarang, Provinsi Jawa Tengah*, Pusat Air Tanah dan Geologi Tata Lingkungan, Badan Geologi KESDM, Laporan tidak dipublikasikan
- Pramudyo, T dan Hermawan, W. 2016. *Monitoring Geologi Teknik Penurunan Tanah Di Daerah Semarang, Provinsi Jawa Tengah*,

- Pusat Air Tanah dan Geologi Tata Lingkungan, Badan Geologi KESDM, Laporan tidak dipublikasikan
- Putranto T.T. 2011. *Aplikasi Pemodelan Aliran Airtanah dalam Konsep Pengelolaan Airtanah Berbasis Cekungan*. Proceeding Olimpiade Karya Tulis Inovatif (OKTI).
- Raj P.P. 2008. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. Dorling Kinderslay (India) Pvt.Ltd.
- Rajapakse, R. A. 2015. *Geotechnical Engineering Calculations and Rules of Thumb*. Boutterworth-Heinemann.
- Sarah, D., Soebowo, E., Murdohardono, Mulyono, A., Setiawan, T., & Satriyo, N. A. 2014. *Strategi Pengurangan Risiko Bencana Amblesan Tanah di Kota Semarang*. Pusat Penelitian Geoteknologi LIPI, Bandung
- Skempton A.W. 1969. *The Consolidation of Clays by Gravitational Compaction*. Quarterly Journal of the Geological Society. <https://doi.org/10.1144/gsjgs.125.1.0373>
- Soebowo, E., Sarah, D., & Murdohardono, D. 2014. *Geologi Bawah Permukaan Wilayah Amblesan Tanah*. 57-63.
- Sophian, R. I. 2010. *Penurunan Muka Tanah di Kota-Kota Besar Pesisir Pantai Utara Jawa (Studi Kasus: Kota Semarang)*. Bulletin of Scientific Contribution, 8(1), 41-60.
- Sugalang. 2017. *Buku Seri Geologi Teknik: Penyelidikan Geologi Teknik untuk Ketekniksipilan dan Lingkungan*. Badan Geologi, Kementerian ESDM.
- Suripin. 2005. *Contribution of Groundwater Abstraction to Land Subsidence At The North Coast of Semarang*. Jurnal Media Komunikasi Teknik Sipil. <https://doi.org/10.14710/mkts.v13i2.3906>
- Terzaghi K. 1943. *Theoretical Soil Mechanics*, John Wiley and Sons, Inc. <https://doi.org/10.1002/978047017276>
- Thanden R. E., Sumadiredja H., Richards P. W, Sutisna K., dan Amin T. C. 1996. *Peta Geologi Lembar Magelang dan Semarang, Jawa, skala 1:100.000*. Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi, Bandung.
- Tobing, M. H. L., Syarieff, E. A., & Murdohardono, D. 2001. *Penyelidikan Geologi Teknik Amblesan Daerah Semarang dan Sekitarnya, Propinsi Jawa Tengah*. Laporan Tidak Dipublikasikan. Direktorat Geologi Tata Lingkungan.
- Wardhana, D. D., Harjono, H., & Sudaryanto, S. 2014. *Struktur Bawah Permukaan Kota Semarang Berdasarkan Data Gayaberat*. Jurnal Riset Geologi Dan Pertambangan, 24(1), 53. <https://doi.org/10.14203/risetgeotam2014.v24.81>
- Widiarso, D. A., Haryanto, W., Muslim, D., Zakaria, Z., & Iskandarsyah, T. Y. 2019. *Potential Consolidation Settlement Due To Load Stresses of Building Structures*. International Journal of GEOMATE, 17(60), 204. <https://doi.org/10.21660/2019.60.73924>
- Widyaningrum, R. dan Pramudyo, T. 2014. *Monitoring Geologi Teknik Penurunan Tanah di Daerah Semarang, Provinsi Jawa Tengah*, Pusat Sumber Daya Air Tanah dan Geologi Lingkungan, Badan Geologi KESDM, Laporan tidak dipublikasikan
- Widyaningrum, R., Sugalang., dan Destiasari, F. 2018. *Monitoring Geologi Teknik Penurunan Tanah di Daerah Semarang, Provinsi Jawa Tengah*, Pusat Air Tanah dan Geologi Tata Lingkungan, Badan Geologi KESDM, Laporan tidak dipublikasikan
- Wirabuana, T. dan M. Wafid, A.N. 2013. *Monitoring Geologi Teknik Penurunan Tanah Di Daerah Semarang, Provinsi Jawa Tengah*, Pusat Sumber Daya Air Tanah dan Geologi Lingkungan, Badan Geologi KESDM, Laporan tidak dipublikasikan
- Whittaker D.N. and Reddish D.J. 1989. *Subsidence Occurrence, Prediction and Control*. DME University of Nottingham. Elsevier New York, p 359-376.
- Xu Y.S., Shen S.L., Cai Z.Y., dan Zhou G.Y. 2007. *The State of Land Subsidence and Prediction Approaches Due To Groundwater Withdrawal in China*. Journal Nat Hazards, 45,123-135. <https://doi.org/10.1007/s11069-007-9168-4>