

Grondwatermetingen met het BAT-systeem

- B.A. Torstensson, BAT Geosystems AB Vallentuna Zweden
- A.J.G. Schellingerhout, IFCO Funderingsexpertise BV Waddinxveen

Grondwaterspanning is een belangrijke parameter voor het mechanisch gedrag van de grond. Met het BAT meetsysteem is het mogelijk deze parameter in het veld te bepalen. Ook is het mogelijk om verschillende andere grondwatermetingen uit te voeren. Deze publicatie beschrijft de methode, de mogelijkheden en maakt een vergelijking met andere soorten waterspanningssensoren.

Het mechanisch gedrag van de grond wordt bepaald door de korrelspanning of effectieve spanning in de grond. Volgens Terzaghi kunnen de grondspanningen worden geschreven als:

$$s = p + s_k \quad (1)$$

Met

- s = grondspanning [Pa]
- s_k = korrelspanning [Pa]
- p = waterspanning [Pa]

Uit *formule (1)* blijkt dat bij een gegeven spanning in de grond, het mechanisch gedrag sterk beïnvloed wordt door de in de grond aanwezige waterspanningen. De meting van de waterspanning of, correcter, waterdruk, is vooral van belang bij belastingverhogingen in slecht doorlatende grond waar het gevaar van afschuiving kan optreden en bij tijdelijke of permanente verandering van de waterdruk, waardoor de korrelspanningen toenemen met als gevolg blijvende vervormingen.

De meest gebruikte methode om de waterspanning te bepalen is de peilbuis. Deze is echter minder geschikt voor gronden met een geringe doorlatendheid zoals klei, veen en silt. In deze grondsoorten heeft de peilbuis een zeer lange reactietijd. In dit soort grond wordt daarom bij voorkeur een waterspannings- of piezo- (=spanning) meter gebruikt. Dit type sensor meet lokaal de waterdruk in de grond waarbij een zeer geringe waterverplaatsing noodzakelijk is, met als gevolg een veel snellere reactietijd in minder waterdoorlatende gronden.

Elke waterspanningssensor bestaat uit twee hoofdonderdelen.

1. Het filter: de korrelspanning wordt opgenomen door een filter dat het grondwater doorlaat. Hierdoor wordt beschikt over een ruimte met de druk van het grondwater. Voor een correcte werking dient aandacht besteed te worden aan de poriegrootte van het filter ten opzichte van de korrelgrootte van de grond.

2. Het meetelement: de waterspanning wordt gemeten met een druksensor die gebaseerd kan zijn op verschillende meetprincipes. Mogelijkheden zijn b.v.: trillende-snaar sensoren, rekstrook sensoren, halfgeleider rekstrook sensoren of capacatieve druksensoren.

Het BAT systeem voor waterspanningsmetingen

Het BAT meetsysteem is inmiddels een tiental jaren oud en heeft inmiddels zijn derde generatie bereikt, maar is nog relatief onbekend in Nederland. Het systeem is als volgt te beschrijven. Het hoofdonderdeel is een filtertip, die na gevuld te zijn met ontgast water, naar de gewenste meetdiepte wordt gedrukt. Het wegdrukken wordt niet uitgevoerd met behulp van sondeerbuisen maar met gekoppelde gasbuisen. Het meetelement is gescheiden van het filter en kan later via de gasbuisen aan de filtertip gekoppeld en ontkoppeld worden.

De metingen kunnen op drie manieren worden uitgevoerd. De meest eenvoudige lijkt sterk op het meten van de waterhoogte in een peilbuis. De waterspanningsmeting wordt daarbij handmatig uitgevoerd. De sensor wordt neergelaten in de gasbuis en gekoppeld aan de filtertip. Na enkele minuten is de waarde gestabiliseerd en wordt dan in het digitale geheugen van de sensor opgeslagen. Hierna kan de sensor ontkoppeld worden en de gehele procedure herhaald worden bij een volgende waterspanningssensor op de meetlocatie.

Een alternatieve methode is om alle filtertips gedurende langere tijd te voorzien van een met datalogger uitgeruste sensor. De meetgegevens worden dan periodiek uit de sensoren gehaald. Door de continue registratie worden de waterspanningen met een hogere frequentie als functie van de tijd gemeten. Deze methode vereenvoudigt de interpretatie van de metingen omdat trendmatig

gedrag beter gescheiden kan worden van incidentele uitschieters.

De meest geavanceerde methode is om alle filtertips te voorzien van eigen sensoren die met elkaar verbonden zijn via een enkele kabel. De sensoren vormen dan een digitaal netwerk waarbij alle gegevens direct beschikbaar zijn. Het wekelijks uitlezen van de dataloggers is dan niet meer noodzakelijk en alle gegevens zijn direct beschikbaar op de juiste plaats.

Vergelijking van eigenschappen van waterspanningsmeters

Lokaliseerbaar: een waterspanningsmeting met de filtertip wordt altijd uitgevoerd met een gaspijp naar het maaiveld. Hierdoor is het altijd mogelijk om nauwkeurig te achterhalen waar en op welke diepte de meting wordt uitgevoerd. Dit zelfde voordeel heeft ook een aan sondeerstangen gekoppelde waterspanningsmeter die na gebruik wordt teruggewonnen. Het bekend zijn van de diepte van de meetlocatie is van belang bij consoliderende terreinen. Indien de gaspijp of sondeerbuis een obstakel vormt, kan beter een verloren type waterspanningssensor gebruikt worden. In dit geval komt alleen een kabel naar het maaiveld.

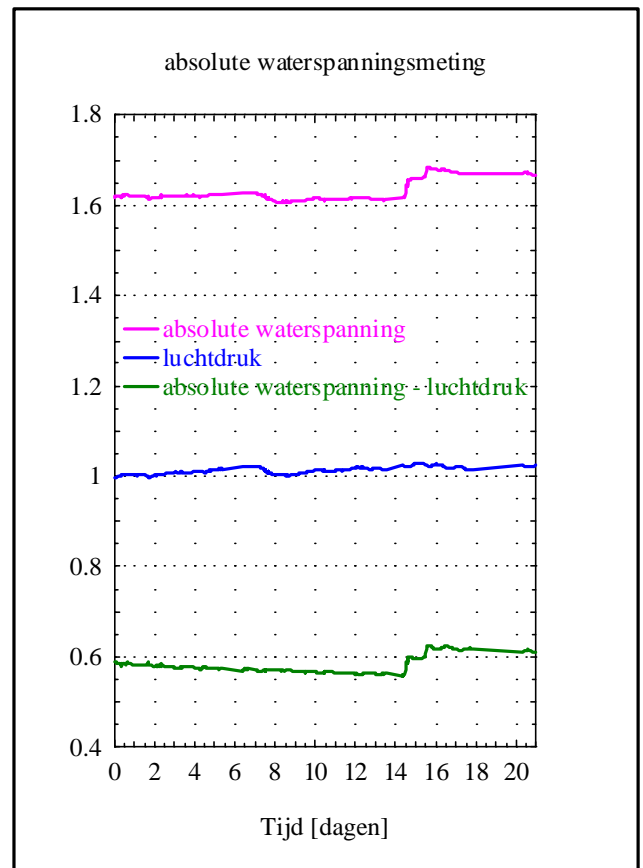
Scheiding: de stabiliteit van het meetelement in een waterspanningssensor is van groot belang omdat de meting in een ongunstige omgeving over een lange tijd betrouwbaar en nauwkeurig moet worden uitgevoerd. De meetelementen voor de waterspanningssensoren worden daarom vooral gekozen op betrouwbaarheid en stabiliteit. Voorbeelden zijn trillende-snaar sensoren of in halfgeleidermateriaal geïntegreerde reksensoren. In de praktijk ontstaan toch vaak omstandigheden waarbij de resultaten aanzienlijk afwijken van de verwachting en de vraag rijst of het meetelement correct functioneert. Bij het BAT systeem wordt het meetelement gekoppeld aan de filtertip. Deze koppeling kan zonder problemen vele tientallen keren worden uitgevoerd. Hierdoor ontstaat de mogelijkheid het meetelement te vervangen of te controleren op de schaalfactor en op het nulpunt, waardoor de onzekerheid ten aanzien van het juist functioneren van het meetelement wordt uitgesloten. Opgemerkt wordt dat deze scheiding ook is te realiseren met behulp van een drukschakelaar in de waterspanningssensor. De drukmeting vindt dan op het maaiveld plaats. In de sensor wordt alleen bepaald of een op het maaiveld aangebrachte druk groter of gelijk is aan de waterspanning in de grond.

Inbrengen: het wegdrukken van waterspannings-sensoren in weinig doorlatende gronden geeft vervormingen in de grond die een aanzienlijke, maar tijdelijke, verhoging van de waterspanning geven. Hierdoor ontstaat het risico dat het meetelement

overbelast wordt en niet meer nauwkeurig functioneert. Dit risico is uit te sluiten door tijdens het wegdrukken van de sensor de waterspanning te meten of, zoals bij het BAT systeem, het meetelement pas na het plaatsen te koppelen aan het filter. De filtertip is nauwelijks gevoelig voor de gevolgen van een eventuele drukoverbelasting.

Kunststof: een minder bekend probleem bij waterspanningsmetingen is de zogenaamde galvanische werking die ontstaat bij gebruik van verschillende metalen. In de grond kan dit leiden tot corrosie en gasvorming. Dit probleem kan aanzienlijk verminderd worden door de waterspanningsmeter van één enkele metaalsoort te maken. Een andere oplossing is een filtertip van kunststof waarbij het probleem volledig is opgelost. De meest gebruikte filtertip voor het BAT systeem is daarom gemaakt van kunststof. Als de rvs filtertip gebruikt wordt vanwege de hoge grondweerstand ontstaat ook corrosie gevaar. De eerste gekoppelde gaspijp dient dan van rvs te zijn om de kans op corrosie in de omgeving van het filter te minimaliseren.

Absoluut: het is gebruikelijk om de waterspanningsmeting te corrigeren voor variatie in de luchtdruk. De reden hiervoor is dat de luchtdruk zowel op de grondspanning als op de waterspanning werkt waardoor de korrelspanning minder beïnvloed wordt.



Figuur 1: grafiek met de gemeten absolute waterspanning als functie van de tijd. Het dissiperen van de waterspanning is duidelijk zichtbaar na het toepassen van de correctie voor de luchtdruk. De abrupte stijging op dag 14 en 15 wordt veroorzaakt door het aanbrengen van een ophoging

De meest eenvoudige methode is een relatieve meting waarbij een dunne compensatie luchtslang vanaf het meetelement wordt verbonden met de buitenlucht waardoor direct het verschil bepaald wordt tussen de waterspanning aan de ene zijde en de luchtdruk aan de andere zijde van het meetelement. Deze methode is echter niet erg populair bij waterspanningssensoren. De compensatieslang kan door condensvorming verstopt raken en het meetelement door vocht worden aangetast. Met behulp van hygroscoopische of semi permeabele materialen worden deze problemen verminderd. Echter, bij waterspanningssensoren is er een sterke voorkeur voor absolute druksensoren waarbij de luchtdruk met een aparte sensor wordt gemeten. Een voorbeeld van een meting is gegeven in *figuur 1*. De luchtdruk op zeeniveau is gemiddeld 1013 mbar maar kan sterk variëren waardoor een grote fout ontstaat indien de correctie niet wordt uitgevoerd. Dit blijkt uit de figuur. Variaties van ongeveer 100 mbar (≈ 1 meter waterkolom) zijn mogelijk tijdens langdurige metingen.

Andere grondwatermetingen

Consolidatiecoëfficiënt c_h : het plaatsen van een waterspanningsmeter in weinig doorlatende gronden geeft een tijdelijke verhoging van de waterspanning. Deze verhoging kan gebruikt worden om de lokale consolidatiecoëfficiënt te bepalen. Het meten moet dan direct na het plaatsen worden gestart. Met behulp van een mathematisch model blijkt dat de halveringstijd van de drukverhoging een verband heeft met de consolidatiecoëfficiënt. Een goede schatting volgens Torstensson [1] is:

$$c_h \approx \frac{r_o^2}{t_{50\%}} \quad (2)$$

c_h = consolidatiecoëfficiënt [m^2/s]
 r_o = straal van het filter [m]
 $t_{50\%}$ = druk halveringstijd [s]

Het toepassen van deze bepaling is vooral zinvol bij metingen tijdens het ophogen van minder draagkrachtige terreinen waarbij het gebruik van waterspanningsmeters goed tot zijn recht komt. Na de aanvang van het werk kan dan de zettingsprognose verbeterd worden met de extra informatie. Na het aanbrengen van de belasting kan met de dissipatie van de waterspanning een tweede meting van de consolidatiecoëfficiënt worden uitgevoerd. De c_h meting volgens *formule (2)* is daarom goed te controleren. (zie ook *figuur 4*)

Doorlatendheid k : de filtertip geeft de mogelijkheid om de doorlatendheid k van de grond te meten. In dit geval wordt de filtertip gekoppeld aan een vat met een andere druk dan de lokale waterspanning. In het geval van een lagere druk wordt water opgezogen.

Bij een hogere druk wordt water in de grond geïnjecteerd. Het drukverloop als functie van de tijd heeft een eenduidige relatie met de doorlatendheid k van de grond. Deze relatie is volgens Bengtson [2]:

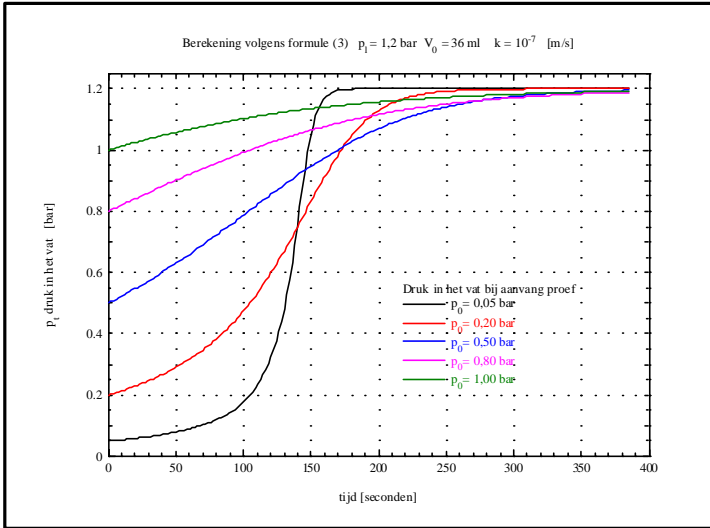
$$k = \frac{V_o p_o}{F t} \left(\frac{1}{p_1 p_o} - \frac{1}{p_1 p_t} + \frac{1}{p_1^2} \left(\ln \left(\frac{p_o - p_t}{p_o} \frac{p_t}{p_t - p_1} \right) \right) \right) \quad (3)$$

k = doorlatendheid [m^4/Ns]
 p_o = druk in het vat bij aanvang van de proef [Pa]
 p_t = druk in het vat als functie van de tijd [Pa]
 p_1 = waterspanning in de grond [Pa]
 t = tijd [s]
 F = flowfactor van de filtertip volgens Horslev [3]
 $[m]$
 V_o = volume van het vat [m^3]

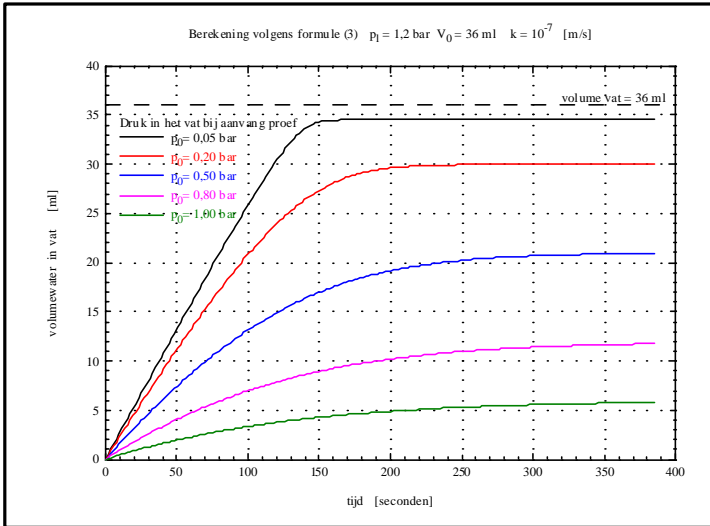
Figuur 2 geeft een aantal lijnen voor verschillende waarden van de begindruk in het vat. Het meetbereik van de doorlatendheid k van de filtertip loopt van 10^{-12} tot 10^{-5} [m/s]. De kleinste waarde wordt beheerst door de maximale tijdsduur van een meting, terwijl de grootste waarde begrensd wordt door de stromingsweerstand in de koppeling van de filtertip naar het vat. Een andere beperking vormt de tijdsresolutie van de sensor. De grote doorlatendheid moet daarom gemeten worden met een klein drukverschil tussen het vat en de lokale waterspanning. De weerstand van de koppeling is dan minimaal en de druk als functie van de tijd is goed gedefinieerd. Dit effect is zichtbaar in *figuur 2*. Bij de laagste begindruk gaat de druk als functie van de tijd plotseling sterk omhoog. De gemeten waarde van de doorlatendheid is dan sterk afhankelijk van het moment waarop de koppeling met de filtertip gemaakt wordt en kan dan niet nauwkeurig bepaald worden (zie ook *figuur 5a, 5b en 6*).

Watermonsters: de filtertip kan ook gebruikt worden voor het nemen van grondwatermonsters. De methode is zoals beschreven bij de doorlatendheidsmeting. Vanzelfsprekend dient de begindruk lager te zijn dan de waterspanning. De aan het vat gekoppelde druksensor is nu optioneel maar biedt wel een grotere controle tijdens het uitvoeren van de proef. Indien de inname lang genoeg wordt voortgezet is de druk in het vat gelijk aan de waterspanning. Het watermonster, inclusief de aanwezige bodemgassen wordt onder deze druk ontkoppeld waarna het monster geanalyseerd kan worden. Deze methode maakt het mogelijk om monsters te nemen zonder externe verontreinigingen en contact met de lucht. De monsters hebben een zeer constante kwaliteit omdat de methode weinig gevoelig is voor menselijke fouten. Opgemerkt wordt dat de tip voor het plaatsen wordt gevuld met schoon water. De inname moet daarom 1 à 2 maal worden uitgevoerd om een representatief grondwatermonster te verkrijgen.

Hydraulic fracturing: *formule 1* geeft aan dat de korrelspanning gelijk aan nul wordt indien de waterspanning gelijk is aan de grondspanning. De

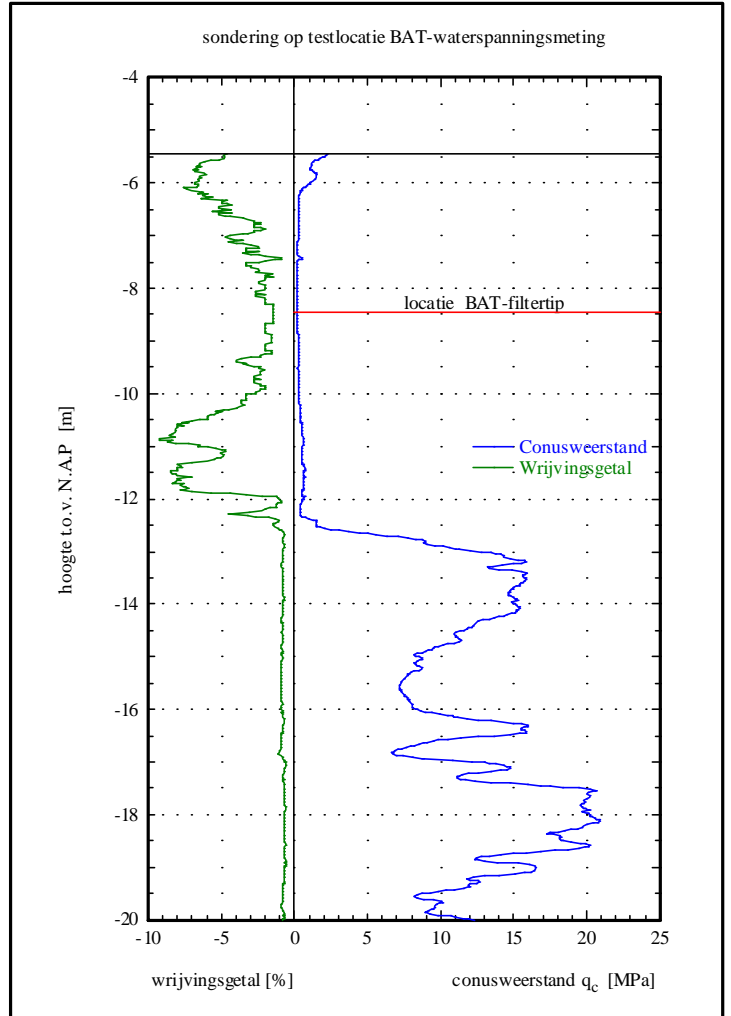


Figuur 2a: Druk als functie van tijd volgens formule 3. De begindruk in het vat is gevarieerd. De flowfactor en het volume van het vat zijn 0,23 m en 36 ml. Deze parameterkeuze is gebaseerd op het BAT systeem

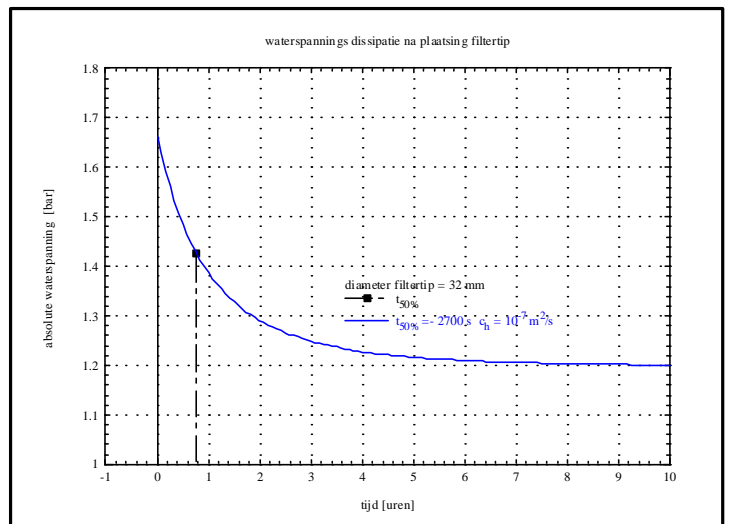


Figuur 2b: Opgezogen volume water als functie van de tijd voor de druktijd metingen uit figuur 2a

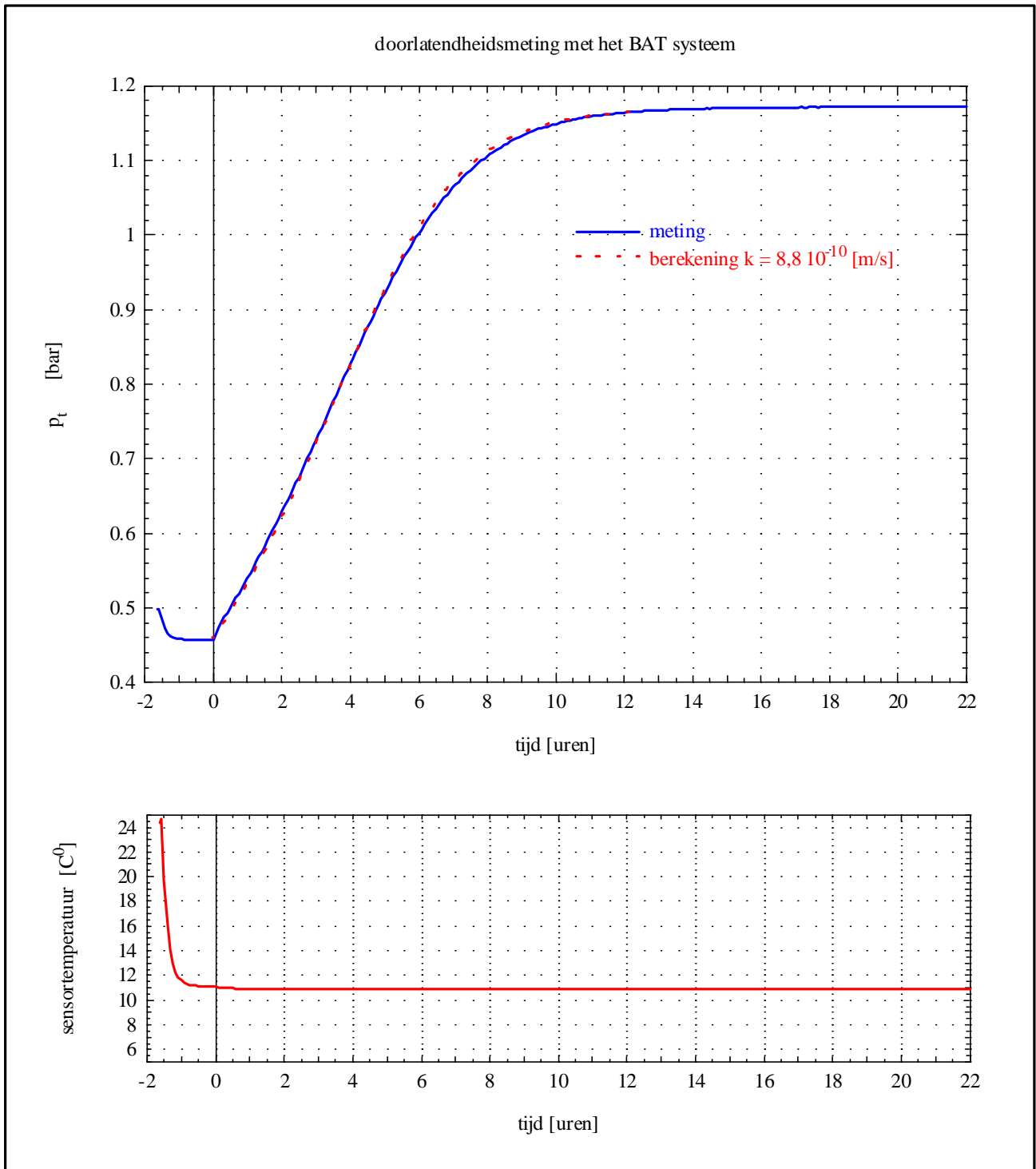
filtrertip kan in minder doorlatende gronden worden gebruikt om deze waarde van de waterspanning te bepalen. De meting wordt uitgevoerd als een doorlatendheidsproef waarbij het vat gevuld wordt met water en gas met een aanzienlijke overdruk. Zolang de druk tijdens de injectie van het water groter is dan de korrelspanning (in horizontale dan wel verticale richting) zal de doorlatendheid door "scheuren" in de grond vergroot worden. Nadat de druk voldoende is verlaagd, sluit de grond zich en verloopt de curve als grond met de normale doorlatendheid. In de druk-tijd meting is dit omslagpunt duidelijk zichtbaar. (zie figuur 7).



Figuur 3: Sondering van een testlocatie. De filtrertip is geplaatst op -8,5 m t.o.v. N.A.P. Het boorrapport vermeldt: KLEI, matig siltig, zwak humeus met zandlaagjes, enkele schelpstukjes. De volgende metingen zijn met het BAT systeem uitgevoerd: een consolidatie proef, een doorlatendheidsmeting en een hydraulische fracturing proef

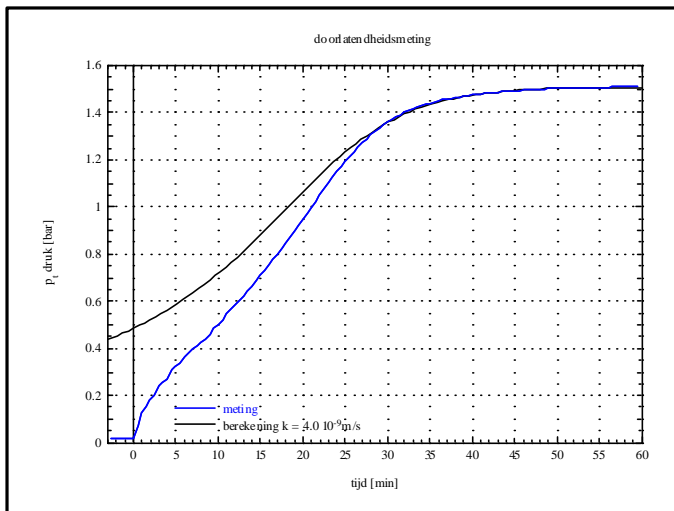


Figuur 4: Dissipatie van de waterspanning na het plaatsen van de filtrertip. De halveringstijd bedraagt ongeveer 2700 s. De volgens formule 2 berekende consolidatiecoëfficiënt c_h is dan $10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$. Figuur 3 geeft de sondering op de testlocatie

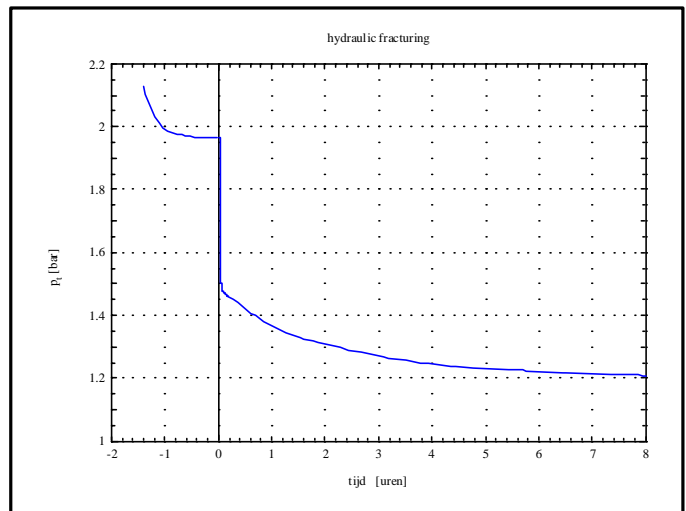


Figuur 5a: Doorlatendheidsmeting met het BAT-systeem. In de grafiek is ook de berekende curve volgens *formule 2* gegeven. De k is $8,8 \cdot 10^{-10}$ m/s. De daling van de druk in vat voor de aanvang van de proef wordt veroorzaakt door de afkoeling van het gas in het vat. *Figuur 3* geeft de sondering op de testlocatie

Figuur 5b: De sensortemperatuur als functie van de tijd tijdens de doorlatendheidsmeting in figuur 5a. Het temperatuurverschil tussen het maaiveld en de meetlocatie veroorzaakt een drukdaling in het vat. De sensor kan pas aan de filtertip gekoppeld worden als de temperatuur van het gas is gestabiliseerd op de lokale omgevingstemperatuur



Figuur 6: Doorlatendheidsmeting in sterk gas houdende grond. De druk in het vat bij de aanvang van de proef bedroeg 25 mbar. Aan het einde van proef bevatte het vat 15 % gas met een druk van 1,52 bar in plaats van 1,5 %. De berekening volgens formule 2 is dan niet toepasbaar.



Figuur 7: Hydraulische fracturing proef. Het snijpunt van de beide asymptoten ligt bij 1,48 bar. Gedurende de snelle daling van de druk is de waterspanning groter dan de korrelspanning. Figuur 3 geeft de sondering op de testlocatie

Grondwaterstroming: de filtertip biedt ook mogelijkheden voor onderzoek naar grondwaterstroming. Dit is mogelijk door het injecteren van een gecontroleerde hoeveelheid vloeistof met een chemisch additief. Op andere locaties worden hierna periodiek grondwater monsters genomen en onderzocht op het chemisch additief. Hierdoor wordt de stroming van het water in kaart gebracht.

Conclusie

Het BAT-systeem is een interessant alternatief voor het meten van waterspanningen dat tot nu toe weinig aandacht heeft gekregen in Nederland. Het is een hoogwaardige en economische methode met een groot aantal extra mogelijkheden. Naast toepassingen in de funderingstechniek biedt het systeem ook op het gebied van milieuonderzoek unieke mogelijkheden.

Referenties

- 1 **Torstensson, B-A.**
1978, The pore pressure probe. Proc. Geoteknikedagen, pp. 34.1-34-15, Tapir forlag, Oslo, Norway.
- 2 **Bengtsson, P.E.**
1984. Personal communication
- 3 **Horslev, M.J.**
1951. Time lag and soil permeability in ground water observations. Corps of Engineers. Waterways Experiment Station. Vickburg, Mississippi. Bull. 36,50 pp.

Meer gegevens over verschillende soorten waterspanningsmeters zijn te vinden in:

T.H. Hanna

Field Instrumentation in Geotechnical Engineering, Trans Tech Publications, Germany, ISBN 0-87849-054-X