

1 Toepassingen van het Noordbergum-effect

1.1 Inleiding

Tijdens pompproeven, met name in gebieden die overgeconsolideerde grondlagen kennen, wordt bij het aan- en uitzetten van de pomp(en) geregeld het Noordbergum-effect geregistreerd. Dit is een stijging van de grondwaterdruk in een over- of onderliggend watervoerend of waterremmend pakket wat niet gelijktijdig gepompt wordt. Aan de hand van dit verschijnsel wordt in dit artikel een methode voorgesteld om op basis van de doorlatendheid van de gepompte aquifer en de duur van het Noordbergum-effect, een uitspraak te doen over de weerstand van een aquitard.

1.2 Opbouw artikel

Dit artikel gaat in op de volgende zaken

- Achtergrond van de Noordbergum-effect (hoofdstuk 2)
- Registraties van het effect met bijbehorende parameters (hoofdstuk 3)
- Een afleiding voor de bepaling van de weerstand van de aquitard (hoofdstuk 4)
- Conclusie en aanbevelingen (hoofdstuk 5)

2 Beschrijving van het Noordbergum-effect

2.1 Algemeen

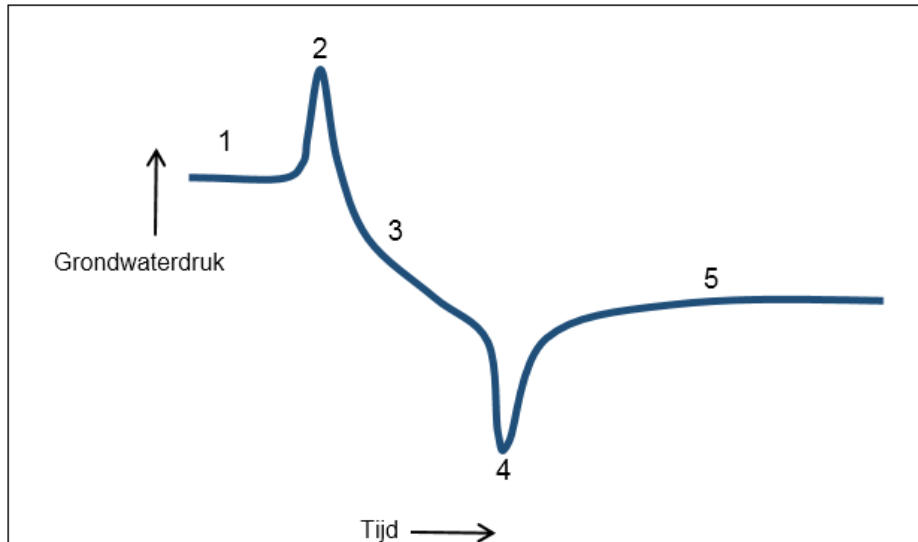
In 1955 is door de toenmalige directeur van de RID (ir. Santing) een effect beschreven wat geconstateerd is bij een grondwaterwinning bij Noordbergum. Hier werd geconstateerd dat, bij het bemalen van een diepere aquifer in een watervoerende laag boven die aquifer (tussen beide aquifers bevindt zich een waterremmende, overgeconsolideerde laag), bij het aanzetten van de pomp de stijghoogte in het bepompte pakket daalde, maar in het overliggende pakket steeg. Deze stijging verdween na verloop van tijd waarna de waterdruk weer terugkeerde naar de uitgangswaarde. Op dat moment was er geen verklaring aanwezig, maar vermoed werd dat een en ander samenhang met de elasticiteit van de bodemmatrix.

In Verruyt (2013) staat een en ander uitgewerkt. Uiteindelijk is duidelijk geworden dat het effect optreedt als, ten gevolge van het stromen van het water in het bepompte pakket, de bodemmatrix herschikt waardoor de aquifer in praktijk iets dikker wordt. Hierdoor stijgt de druk in de overliggende aquitard. Afhankelijk van de doorlatendheid van de aquitard is de duur van het effect lang (bij een lage doorlatendheid van de aquitard) of kort (bij een relatief hoge doorlatendheid van de overliggende aquitard).

Naast het optreden van het Noordbergum-effect bij het aanzetten van de pompen treedt een vergelijkbaar effect (maar in spiegelbeeld) op bij het uitzetten van de pompen. Dit effect is voor het eerst door Languth en Trekalis (1989) beschreven en staat bekend als het Rhade-effect.

2.2 Beschrijving van een meting van het verschijnsel

Een "standaard"-Noordbergum/Rhade effect (het verloop van de grondwaterdruk tijdens bijvoorbeeld een pompproef) in een naastliggende aquifer of aquitard kan als volgt worden geschematiseerd (figuur 2.2.1.):



Figuur 2.2.1. Schematisatie effecten

Hierin zijn de volgende fases te onderkennen:

Fase	Beschrijving
1	Grondwaterdruk voorafgaand aan bijvoorbeeld een pompproef
2	Verhoging van de grondwaterstand na het aanzetten van de pompen (Noordbergum-effect)
3	Normale daling ten gevolge van de onttrekking
4	Verlaging van de grondwaterstand na uitzetten van de pompen (Rhade-effect)
5	Herstel van de grondwatersand tot een stationair niveau.

De duur van het effect is de tijd (in minuten) die ligt tussen de eerste verhoging/verlaging en het moment dat de nullijn weer wordt gepasseerd. Op dit moment is onduidelijk of de intensiteit van het pompen de duur en/of sterkte van de effecten beïnvloedt

3 Registraties effect

3.1 Literatuur gegevens

3.1.1 *Young (1990)*

In een alluviale vlakte in Oregon is een 3-13 meter dik pakket ongeconsolideerd zand en grind aanwezig met daarboven een 3-15 meter dik pakket zandige silt. Het zandpakket is watervoerend en een lokaal belangrijke aquifer. Tijdens een pompproef in het zandpakket is in de buurt van Okuda het Noordbergum effect gedurende 1 minuut gemeten. De doorlatendheid van het zand/grindpakket is hier bepaald op 150 [m/dag], de doorlatendheid van de overliggende zandige silt is bepaald op 4 [m/dag]. Young geeft aan dat dit voor een zandige silt hoog is.

3.1.2 *Hart (2012)*

Tijdens een congres in Minneapolis heeft Hart (2012) de resultaten gepresenteerd waarin hij reversed groundwater fluctuations heeft gemodelleerd. In vergelijking met gemeten waarden komt hij tot de conclusie dat een $K_{\text{aquifer}}/K_{\text{aquitard}}$ verhouding van 1000:1 (3 logfactoren) de duur van het Noordbergum-effect 8 minuten was (circa 4 minuten stijging en evenzoveel daling). Bij een verhouding van 7 logfactoren duurde het effect 8+ dagen (minimaal 11.520 minuten).

3.1.3 *Gellasch (2012)*

In zijn proefschrift uit 2012 heeft Gellasch een serie registraties van het Noordbergum en het Rahde-effect beschreven bij pompproeven in geconsolideerde afzettingen. In hoofdstuk 3 van dat proefschrift is een uitgebreide analyse opgenomen. Gedurende 9 minuten is het Noordbergum-effect waargenomen. Door de aanwezigheid van breuken is de aquitard lokaal lek. Op basis van het proefschrift bedraagt de verhouding $K_{\text{aquifer}}/K_{\text{aquitard}}$ $8,5 \cdot 10^2$. Op basis van deze metingen kan gesteld worden dat het Noordbergum-effect tevens meetbaar is in geconsolideerde afzettingen, hier van Cambrium-leeftijd.

3.1.4 *Chen (2005)*

Tijdens pompproeven in de High Plains aquifer is het Noordbergum effect gemeten. In deze aquifer zijn een diepe en een ondiepe aquifer gescheiden door een aquitard. De doorlatendheid van de bepompte aquifer bedraagt circa 5 [m/dag], de aquitard is berekend op $3 \cdot 10^{-3}$ [m/dag]. Het verschil tussen beide waarden bedraagt dan $1,7 \cdot 10^3$. De duur van het Noordbergum-effect bedroeg, volgens de registraties in figuur 3 van het artikel, 10 minuten.

3.1.5 *Rodrigues (1982)*

In Portugal is bij het dorpje Rio Maior tijdens pompproeven het Noordbergum-effect gemeten gedurende 300 minuten. Hier ligt een diatomee houdende bruinkoollaag (de aquitard) op een aquifer met zand. De gemiddelde doorlatendheid van de aquifer bedraagt hier 5-6 [m/dag], de aquitard is berekend op circa $1,5 \cdot 10^{-5}$ [m/dag]. Het verschil tussen beide waarden bedraagt dan $3,3 \cdot 10^5$. Naast de pompproef is op deze locatie de doorlatendheid tevens in het laboratorium gemeten aan de hand van monsters. De doorlatendheid lag hierbij 1-4 logfactoren lager.

3.1.6 *Burlingame (2008)*

Op het FLAC/DEM symposium on Numerical Modeling heeft Burlingame in 2008 een presentatie gegeven over de bepaling van aquifer en aquitard parameters. In de Manasquan aquifer rapporteert hij een K-waarde van $5 \cdot 10^{-3}$ [m/sec], in de overliggende aquifer een k-waarde van $5,7 \cdot 10^{-9}$ [m/sec]. De duur van het Noordbergum-effect hier bedroeg circa 11 uur (660 minuten).

3.1.7 *Burbey (2013)*

In een met breuken dooraderd kristallijn gesteente in Virginia is door Burbey het Noordbergum-effect beschreven tijdens het bemalen van een breukvlak. Het effect duurde 100 minuten. In het artikel worden een aantal scenario's uitgewerkt voor de doorlatendheid van de breukvlakken. De Host rock (het kristallijne gesteente) is berekend op een K_h van $3,4 \cdot 10^{-4}$ [m/dag] voor een breukvlak van 0,5 cm breed. De K_h van het breukvlak is bepaald op 74 [m/dag]. In het artikel merkt hij op dat rekentechnisch het effect te modelleren was bij een K_h van het breukvlak die een factor 20 kleiner was (3,7 [m/dag]) dan eerder was berekend. Waarschijnlijk spelen bij stroming door breukvlakken nog vele (onbekende) factoren een rol. Indien de waarde 3,7 [m/dag] wordt aangehouden is de verhouding $K_{\text{aquifer}}/K_{\text{aquitard}}$ $1,09 \cdot 10^3$.

3.1.8 *HRI (1991)*

In een bij een rechtszaak behorend document is in 1991 bij een pompproef in New Mexico het Noordbergum effect beschreven. Deze duurde zeer lang (circa 1,5 dag, 2160 minuten). Op basis van de beschrijving wordt voor de bepompte aquifer (de Westwater-zandsteen) een k-waarde van 0,3 [m/dag] aangehouden. Voor de overliggende aquitard (de Bushy-schalie) zijn uit de literatuur waarden bekend van $4,5 \cdot 10^{-8}$ [m/dag]. De verhouding $K_{\text{aquifer}}/K_{\text{aquitard}}$ komt hiermee op $7,4 \cdot 10^6$.

3.2 Dissipatietesten

Tijdens sonderingen kan met behulp van de waterspanningssensor (U1, U2), bij de passage van een aquitard een tijdelijke stop worden uitgevoerd. Tijdens die stop vloeit de drukopbouw (ontstaan door de sondeervoortgang) af. Naarmate de aquitard minder doorlatend is zal deze afvloeiing langer duren. Deze wijze van testen (dissipatietest) wordt gebruikt om een indicatie over de doorlatendheid van de aquitard te krijgen. In Mayne (2002) is een methodiek om deze dissipatietesten uit te werken opgenomen. Hierin geeft hij de formule

$$k \text{ (cm/s)} \approx 1/(251 * t_{50})^{1,25}$$

Hierin is:

k k-waarde in cm per seconde van de aquitard

t₅₀ De tijd die nodig is om 50% van de ontstane overdruk af te laten vloeien, in seconden

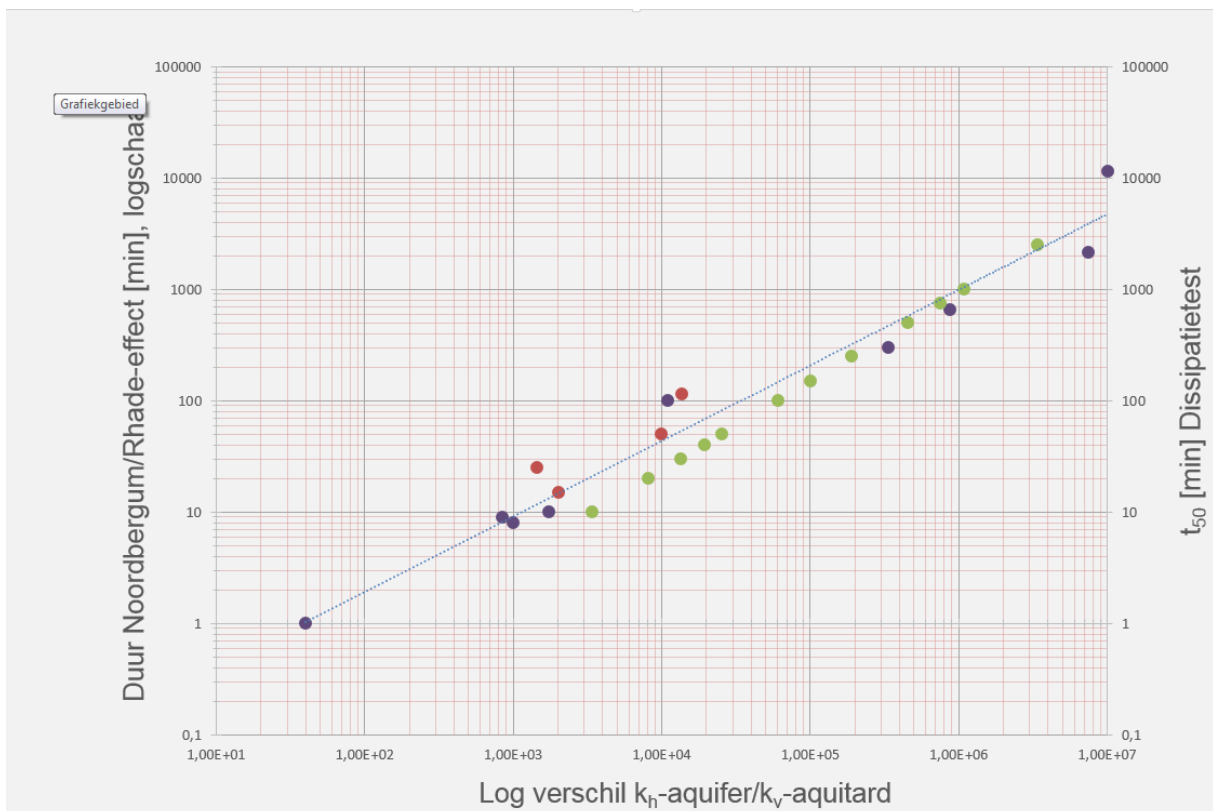
Indien deze waarde wordt herleid naar [m/dag] kan bij een k_{aquifer} van 1 [m/dag] de volgende reeks berekend worden:

Tijd T50	k	k	bij aquifer k=1
[min]	[cm/s]	[m/dag]	Verhouding
10	3,37E-07	2,91E-04	3,43E+03
20	1,42E-07	1,22E-04	8,17E+03
30	8,54E-08	7,38E-05	1,36E+04
40	5,96E-08	5,15E-05	1,94E+04
50	4,51E-08	3,90E-05	2,57E+04
100	1,90E-08	1,64E-05	6,11E+04
150	1,14E-08	9,87E-06	1,01E+05
250	6,03E-09	5,21E-06	1,92E+05
500	2,54E-09	2,19E-06	4,57E+05
750	1,53E-09	1,32E-06	7,58E+05
1000	1,07E-09	9,21E-07	1,09E+06
2500	3,39E-10	2,93E-07	3,41E+06

4 Bepaling weerstand aquitard

4.1 Algemeen

De gemeten duur van een Noordbergum en/of Rhade effect is uitgezet tegen het verschil van de k -waarde van de aquifer versus de k -waarde van de aquitard. Deze laatste ligt tussen 0 en 7 log-factoren. In de onderstaande grafiek zijn de tijd en het verschil beide op een log-schaal weergegeven. De blauwe punten komen uit de literatuur, de rode punten zijn eigen metingen (niet beschreven in dit artikel), de groene punten zijn de berekende waarden uit de dissipatietesten cf. Mayne.



Figuur 4.1.1. Overzicht metingen duur effect vs. doorlatendheidsverschil

Opgemerkt wordt dat het aantal metingen beperkt is. Niettemin lijkt er op basis van deze metingen een lineair verband te bestaan tussen de duur van het Noordbergum-/Rhade-effect en de doorlatendheid van de aquitard. Hiernaast liggen de berekende waarden voor de dissipatietesten in dezelfde range.

4.2 Empirische formule

Door Excel is de verhouding tussen de duur van het effect en de doorlatendheden van de lagen als volgt bepaald:

$$K_{\text{aquitard}} = K_{\text{aquiifer}} / ((T/0,08)^{1/0,68})$$

Hierin is:

K_{aquiifer} De doorlatendheid van de gepompte laag in [m/dag]

K_{aquitard} De doorlatendheid van de aquitard in [m/dag] die tussen het gepompte pakket en het pakket waarin het Noordbergum-effect is gemeten.

T De duur van het effect in minuten

De correlatie ten opzichte van de rechte lijn in figuur 4.1.1. bedraagt volgens Excel $R^2=0,97$.

5 Conclusie en aanbevelingen

5.1 Conclusies

- Op basis van gegevens uit literatuur en de eigen gegevens afkomstig uit sonderingen¹ is de suggestie zeer sterk dat op basis van de duur van een Noordbergum-effect/Rhade-effect een uitspraak kan worden gedaan over de weerstand van een aquitard. Binnen twee dagen kan hiermee over het algemeen een indicatie worden verkregen van de k-waarde van deze aquitard (NB: de verticale doorlatendheid van de aquitard). Dit is sneller dan met welke andere methode dan ook.
- De correlatiecoëfficiënt van de grafiek in paragraaf 4.1.1. suggereert een betrouwbare vuistregel. Op dit moment is de methodiek met name geschikt voor overgeconsolideerde waterremmende lagen.
- Op basis van paragraaf 3.1.1. zou de methodiek zelfs opgaan voor overgeconsolideerde silten (dus ook Löss).
- Dat het Noordbergum-effect een matrix-effect lijkt te zijn blijkt uit het gegeven dat ook in vaste gesteenten en breukvlakken de vuistregel opgaat.
- Het Noordbergum-effect is te beschouwen als een vorm van een dissipatietest.

5.2 Aanbevelingen

Om het verband tussen de duur van het Noordbergum-effect en de doorlatendheid van de aquitard verder te onderbuwen dienen meer pompproeven te worden geanalyseerd. Hierbij is het essentieel dat in ieder geval de eerste dag per minuut de waterdruk gemeten wordt. Dit moet zowel boven de aquitard als onder de aquitard. Het Noordbergum-effect treedt per definitie op in de niet-bepompte pakket.

¹ Het bepalen van doorlatendheden op basis van sonderingen is een methodiek die momenteel in eigen beheer in ontwikkeling is. Ondanks het feit dat hiermee in watervoerende pakketten de correlatie met pompproeven zeer goed is, en in waterremmende lagen waarschijnlijk goed, kan er niet met zekerheid gesteld worden dat dit een realistische methodiek is. Het enige wat duidelijk is dat als sonderingen met deze Noordbergum-effect methodiek worden bewerkt de onderlinge resultaten vergelijkbaar (maar niet absoluut) zijn.

De ligging van de punten in de grafiek in paragraaf 4.1.1. is overigens opvallend.

6 Literatuur

Burbey	2013	Poroelastic Effects on Fracture Characterization	Vol. 51, No. 6—Groundwater—November-December 2013 (pages 904–913)
Burlingame, M.J.	2008	Determination of aquifer and aquitard properties by inverse hydromechanical modeling	Abstrct 1st Intl. FLAC/DEM Symposium on Numerical Modeling, August 2008
Chen, X	2005	Vertical movement of water in a High Plains Aquifer induced by a pumping well	Environ Geol (2005) 47:pp 931-941
Gellasch, C.A.	2012	Vulnerability of urban public supply wells in fractured siliciclastic aquifer systems	Dissertatie, University of Wisconsin
Hart, D.J.	2012	Fully three-dimensional poroelastic model simulating reverse groundwater fluctuations during aquifer pumping	MGWC, 57th annual congress, Minneapolis, Minnesota
HRI	1991	Pump Test Analysis Crowpoint Project	Rapport february 1992, McKinley County, New Mexico
Langguth, H.R., Treskatis, C.	1989	Reverse water level fluctuations in semiconfined aquifer systems "Rhade effect"	Journal of Hydrology, Volume 109, Issue 1, p. 79-93.
Mayne, P.W.	2002	Flow properties from piezocone dissipation tests	Georgia Tech: http://geosystems.ce.gatech.edu/Faculty/Mayne/papers/
Rodrigues, J. D.	1982	The Noordbergum Effect and Characterization of Aquitards at the Rio Maior Mining Project	Groundwater, vol. 21, no 2, pp 200-207
Young, W.H.	1990	Hydrology of the Ontario area Malheur County, Oregon	State of Oregon, Ground Water Report No. 34

7 Inhoud

1	Toepassingen van het Noordbergum-effect.....	1
1.1	Inleiding	1
1.2	Opbouw artikel.....	1
2	Beschrijving van het Noordbergum-effect	2
2.1	Algemeen.....	2
2.2	Beschrijving van een meting van het verschijnsel.....	3
3	Registraties effect.....	4
3.1	Literatuur gegevens	4
3.1.1	Young (1990)	4
3.1.2	Hart (2012).....	4
3.1.3	Gellasch (2012)	4
3.1.4	Chen (2005).....	4
3.1.5	Rodrigues (1982)	5
3.1.6	Burlingame (2008)	5
3.1.7	Burbey (2013)	5
3.1.8	HRI (1991)	5
3.2	Dissipatietesten	6
4	Bepaling weerstand aquitard.....	7
4.1	Algemeen.....	7
4.2	Empirische formule	8
5	Conclusie en aanbevelingen	9
5.1	Conclusies	9
5.2	Aanbevelingen	9
6	Literatuur	10
7	Inhoud.....	11