

1 Ondergrondinformatie uit sondeergrafieken

1.1 Inleiding

Grondwater is over het algemeen een van de belangrijkste aspecten bij de voorbereiding en de constructie van infrastructurele projecten in Nederland. Het (tijdelijk) verwijderen van grondwater om de bouw droog te kunnen uitvoeren moet, om bijvoorbeeld vergunning-technische redenen, ruimschoots van te voren worden voorbereid. Een knelpunt hierin is vaak het ontbreken van tijd, informatie of de mogelijkheid (Tenders!) om dit naar behoren te kunnen uitvoeren. Bij het beoordelen van bijvoorbeeld een toekomstig bemalingsdebiet is kennis van de opbouw van de ondergrond en het gedrag van het grondwater in de ondergrond van wezenlijk belang.

Idealiter wordt de doorlatendheid van de ondergrond indirect bepaald middels het uitvoeren van pompproeven of berekend aan de hand van sedimentkarakteristieken, met name korrelgrootteverdeling, maar vaak moet worden teruggegrepen op indicatieve methoden (REGIS), of eerdere ervaringen in de regio.

Een gegeven is het dat voor vrijwel elk bouwproject een veelheid aan sonderingen wordt geplaatst, over het algemeen ten behoeve van draagkrachtberekeningen.

In deze notitie wordt ingegaan op een methodiek die ontwikkeld is om aan de hand van sondeergegevens een indicatieve waarde van o.a. de doorlatendheid, de weerstand en andere bodemaspecten van de ondergrond te genereren.

Deze methodiek wordt in dit artikel voorgelegd om een (kleine) discussie te starten of deze methodiek grosso modo hout snijdt en zo ja, wat de randvoorwaarden zijn om deze methodiek toe te mogen passen.

1.2 Opbouw artikel

Dit artikel gaat in op de volgende zaken

- Sonderingen algemeen, wat gebeurt er in de ondergrond tijdens het sonderen
- Analyseren van de sondeergrafieken
- Wat betekenen de sondeergrafieken
- Afleiding van de doorlatendheid (k-waarden), Weerstand, % fijne deeltjes, indicatie interne wrijvingshoek en een indicatie van de mate van compactie.
- Mogelijke validatie van de methodiek voor doorlatendheden
- Genereren van de Bergingsfactor conform van der Gun

Tot slot wordt er een spreadsheet (Xlsx) aangeboden op basis waarvan snel, op basis van een Gef-file, een visualisatie gemaakt kan worden.

1.3 Inhoud

1	Ondergrondinformatie uit sondeergrafieken.....	- 1 -
1.1	Inleiding	- 1 -
1.2	Opbouw artikel.....	- 1 -
1.3	Inhoud.....	- 2 -
2	Sonderingen	- 4 -
2.1	Algemeen.....	- 4 -
2.2	Normeringen	- 5 -
2.3	Hypothese.....	- 6 -
2.3.1	Uitgangspunt.....	- 6 -
2.3.2	Doel.....	- 6 -
3	Berekening van het k-getal uit sondeergegevens	- 7 -
3.1	Methodiek	- 7 -
3.2	k-getal	- 7 -
3.3	Doorlatendheid van een gehele aquifer	- 8 -
3.4	Weerstand van een aquitard	- 8 -
3.4.1	Basis	- 8 -
3.5	Vergelijk met Robertson	- 9 -
3.6	Vergelijk met laboratoriumproeven.....	- 10 -
3.6.1	Inleiding	- 10 -
3.6.2	Vergelijk	- 11 -
4	Resultaten	- 13 -
4.1	Analyse	- 13 -
4.2	Pompproeven	- 13 -
4.2.1	Analyse	- 14 -
4.2.2	Invloed open water	- 16 -
4.3	Casus Gasleiding.....	- 19 -
5	Conclusie doorlatendheden en weerstand.....	- 21 -
6	Lithologische kolom.....	- 22 -
7	Berekening % fines	- 23 -
7.1	Algemeen.....	- 23 -
7.2	Methodiek	- 23 -
8	Indicatie Interne wrijvingshoek	- 24 -
8.1	Algemeen.....	- 24 -
8.2	Methodiek	- 24 -
9	Indicatie compactiegraad	- 25 -
9.1	Algemeen.....	- 25 -
9.2	Methodiek	- 25 -
10	Bergingsfactor en spreidingslengte	- 26 -

10.1	Bergingsfactor.....	- 26 -
10.2	Spreidingslengte.....	- 26 -
11	DIY Spreadsheet	- 27 -
11.1	Algemeen.....	- 27 -
11.1.1	Invoeren waarden	- 27 -
11.1.2	Uitleg sheet.....	- 28 -
11.2	Disclaimer	- 28 -
12	Gebruikte literatuur	- 29 -

2 Sonderingen

2.1 Algemeen

In principe is sonderen het wegduwen van gronddeeltjes. Met behulp van een conusvormige punt wordt met constante druk en met constante snelheid een metalen punt in de grond geduwd.

De weerstand die de ondergrond teruggeeft is afhankelijk van een aantal (soms samenhangende) aspecten en parameters zoals (niet uitputtend):

- Watergehalte
- Korrelgrootte
- Korrelgrootteverdeling
- Porie-volume
- Voorkomen organische deeltjes
- Voorkomen (secundaire) mineralen
- Consolidatie van de lagen

Naast het meten van de resulterende weerstand kan tijdens het sonderen een meting worden gedaan van de wrijving, het “plakken” van de grond net boven de conuspunt. Verder kan de sondering worden uitgebreid met het meten van de lokale waterspanning, de geleidbaarheid van de lokale ondergrond of de lokale temperatuur.

Het grote voordeel van sonderen is de relatief lage prijs en de redelijk goede reproduceerbaarheid. Wel moet worden opgemerkt dat sondeergrafieken van dezelfde locatie van elkaar kunnen afwijken door de scherpte van de conuspunt, de afwijkende (stompe) hoek van de punt, de grootte van de conuspunt en de intreedruk. Hierdoor kunnen, zelfs binnen de grenzen die de normering stelt, twee verschillende sondeerbedrijven binnen een zelfde onderzoeksgebied, tot verschillende uitkomsten komen. Bij het interpreteren van sonderingen die door twee of meer sondeerbedrijven zijn gemaakt binnen dezelfde regio is het hierom aan te raden om de vergelijkbaarheid te controleren.

Met name het aspect wrijvingsgetal kan sterk afwijken, voor de in dit artikel gepresenteerde methodiek blijkt dit geen onoverkomelijk bezwaar te zijn.

2.2 Normeringen

De sondeernorm NEN 3680 dateert uit 1982 en geldt alleen voor mechanische sonderingen.

Mechanische sonderingen worden meestal gebruikt in gebieden waar de ondergrond relatief vast tot hard is en/of sterk grind- of steenhoudend.

Elektrische sonderingen hebben een veel grotere nauwkeurigheid dan mechanische. Ze dienen te worden uitgevoerd volgens de in 1996 verschenen sondeernorm NEN 5140. Deze norm gaat uit van vier kwaliteitsklassen, te weten:

Klasse	Parameter	Nauwkeurigheid	Meetinterval
1	Conusweerstand	0,05 Mpa (3%)	0,02 meter
	Plaatselijke wrijvingsweerstand	0,01 Mpa (10%)	
	Helling	2°	
	Sondeerdiepte	0,2 meter (1%)	
2	Conusweerstand	0,25 Mpa (5%)	0,05 meter
	Plaatselijke wrijvingsweerstand	0,05 Mpa (15%)	
	Helling	2°	
	Sondeerdiepte	0,2 meter (2%)	
3	Conusweerstand	0,5 Mpa (5%)	0,1 meter
	Plaatselijke wrijvingsweerstand	0,05 Mpa (20%)	
	Helling	5°	
	Sondeerdiepte	0,2 meter (2%)	
4	Conusweerstand	0,5 Mpa (5%)	0,1 meter
	Plaatselijke wrijvingsweerstand	0,05 Mpa (20%)	
	Sondeerlengte	0,1 meter (1%)	

Het verschil tussen klasse 3 en 4 is het wel of niet meten van de helling van de sondeerconus. De nauwkeurigheid beschouwt het complete meetsysteem, vanaf de inwendige opnemer in de sondeerconus tot en met het grafisch weergeven van de resultaten. Voor de interpretatie van lithologische karakteristieken voldoen alle vier de kwaliteitsklassen, het merendeel van de in Nederland uitgevoerde sonderingen ligt in klasse 1 en 2.

2.3 Hypothese

2.3.1 Uitgangspunt

Uitgangspunt van de omzetting van sondeerwaarden in doorlatendheden (k-waarden) is de aanname dat tijdens het sonderen de weerstand van de ondergrond in zekere relatie staat tot het lokale poriënvolume. Verder uitgangspunt is dat het daadwerkelijke (effectieve) poriënvolume in zekere relatie staat tot de doorlatendheid van de ondergrond.

Een volgende aanname is het vermoeden dat het wrijvingsgetal een maat is voor de hoeveelheid fijne deeltjes in de ondergrond, fijne deeltjes kunnen de poriën verstoppen en zo de k-waarde sterk doen afnemen. Ter illustratie is in de onderstaande tabel een vergelijk gemaakt van de invloed van de aanwezigheid van fijne deeltjes op een zandmatrix (*bron: Handboek zandboek, 2004*).

Percentage deeltjes kleiner dan 16 µm (Slib)	Doorlatendheid [m/dag]
0	14
5	0,9
10	0,3
30	0,06

Het verloop van de doorlatendheid wijst op een exponentieel verband van de vorm $y=a.e^{bx}$, waarin y voor de k-waarde staat in [m/dag] en x voor het percentage slibdeeltjes.

In sonderingen is de "wrijving" in feite een smering van de sondeerkop. Als deze in een fijnkorreliger pakket komt neemt het poriënvolume theoretisch toe en kan er gemakkelijker, met minder weerstand, een conus worden ingeduwd. Hier tegenover staat het feit dat een grofkorreliger sediment minder vrije poriëruimte heeft en hierdoor meer weerstand biedt.

2.3.2 Doel

Doel is het onderkennen van een mogelijke relatie op basis tussen het verloop van de k-waarde met de diepte en de gemeten sondeerwaarden. Op basis van deze berekende k-waarden kan vervolgens de KD-waarde van een aquifer worden berekend. Dit op basis van het gegeven dat de som van alle meetintervallen (vaak 0,02 meter) binnen een aquifer de KD-waarde van de hele aquifer geeft.

3 Berekening van het k-getal uit sondeergegevens

3.1 Methodiek

Aan de hand van bekende doorlatendheden (uit bijvoorbeeld literatuur, vuistregels, falling-head proeven etc.) is empirisch een verhouding tussen de conusweerstand en het wrijvingsgetal bepaald, uitgaande van de formulevorm $y=a.e^{bx}$

Deze waarde is vervolgens iteratief geoptimaliseerd totdat er een basisformule ontstond die in en een watervoerend traject ($k=1$ [m/dag] of hoger) een redelijk betrouwbare waarde opleverde.

Deze methode werkt vanzelfsprekend niet in lagen waarin niet gesondeerd kan worden, met name grindrijke lagen (met zeer hoge doorlatendheden, boven 100 m/dag, worden met deze methode niet correct berekend (onderschatting van de werkelijke doorlatendheid).

NB: dit betreft dus een empirische vuistregel zonder natuurkundige onderbouwing.

3.2 k-getal

Het k-getal wordt uit GEF-files per meettraject (bijvoorbeeld 0,02 meter) als volgt berekend:

- Eerst worden alle meetwaarden omgerekend in Mpa (Megapascal, $1 \text{ Mpa}=10 \text{ kgf/cm}^2$)
- De totale weerstand die de conus meet is de factor A
- De plaatselijke wrijving is de factor B
- Vervolgens wordt het wrijvingsgetal W uitgerekend
- Daarna wordt het k-getal bepaald.

Voor het bepalen van het wrijvingsgetal geldt de berekening:

$$W = (B/A)*100 \quad [-]$$

De algemene herleiding voor het k-getal is dan

$$K = A/(f*(e^W)^3) \quad [\text{m/dag}]$$

Hierin is f een constante ter grootte van 0,825. Deze factor is empirisch bepaald en kan mogelijk gerelateerd worden aan het feit dat bij het sonderen de conus niet direct de waarde van het direct aangrenzende materiaal meet maar ook nog invloed van net buiten de conus 'voelt'.

Dit k-getal is gelijk aan de k-waarde (doorlatendheid) per meettraject, veelal 0,02 meter.

3.3 Doorlatendheid van een gehele aquifer

De KD-waarde van een aquifer wordt berekend aan de hand van de optelling van alle k-waarden van het meetinterval (vaak 0,02 meter) in een aquifer, herleid naar meterschaal. De boven – en onderzijde van een aquifer worden visueel bepaald, maar vaak betreft dit een duidelijke lithologische grens (kleilagen of veenlagen).

3.4 Weerstand van een aquitard

3.4.1 Basis

Naast het k-getal wordt in dit artikel een W-getal geïntroduceerd. Deze is bepaald als

$$W = (B/A) * 100 \quad [-]$$

De algemene herleiding voor het k-getal in aquitards is, bij $W \leq 2$,

$$K = A / ((e^{(W^3)}) * f) \quad [m/dag]$$

En voor $W > 2$

$$K = A / ((e^W) * f) \quad [m/dag]$$

Hierin is f op 0,825 te stellen. Deze waarde is bepaald aan de hand van het vergelijk met de praktijk. . Opgemerkt wordt dat bij een $W > 2$ in de uiteindelijke berekeningen een arbitraire ondergrens aan de doorlatendheid is gesteld van circa $1.10e^{-4}$ [m/dag]. Deze correctie wordt in het spreadsheet uitgevoerd, maar kan eenvoudig gewijzigd worden (NB: dit is de huidige empirische oplossing). De reden hiervoor ligt in het feit dat anders de berekening tot extreem lage doorlatendheden genereert die op basis van literatuurwaarden voor dit type afzettingen (klei, leem, veen, keileem etc.) onrealistisch laag zijn te noemen. Herleiding tot weerstand van de aquitard
Voor de herleiding naar de weerstand van een aquitard is de volgende empirische verhouding gevonden:

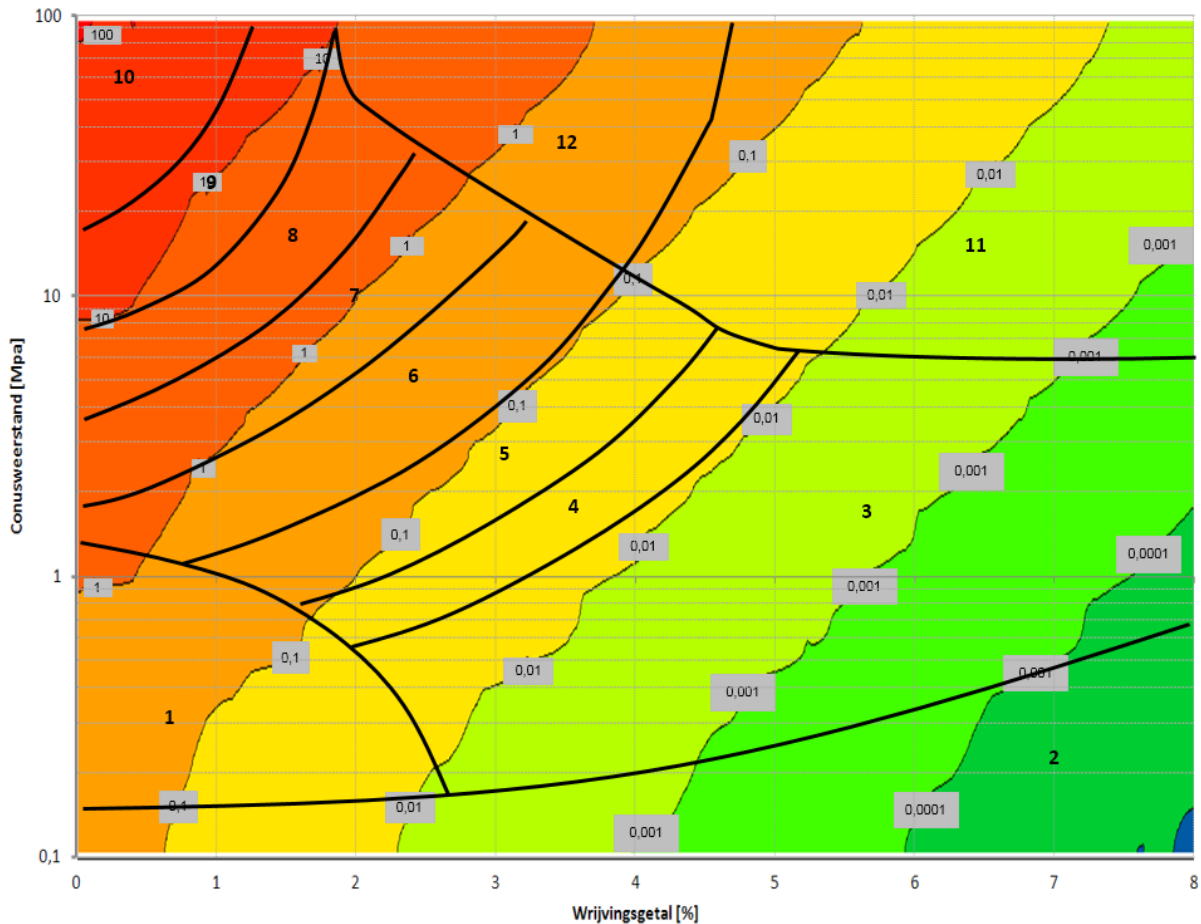
$$\text{Weerstand} = 0,63 * (1/e^{(\text{Log}(K^{1,6}))}) \quad [\text{dagen}]$$

Deze formule geeft een relatieve benadering van de weerstand van het meettraject (over het algemeen 0,02 meter). De totale weerstand van de aquitard is dan de som van alle weerstanden. NB: dit geeft dus een verticale weerstand, de horizontale doorlatendheid van een aquitard kan (vuistregel) een factor 10 hoger liggen.

NB: het k-getal (uit de formule in 3.2) is dus, voor wrijvingsgetallen boven 2, niet gelijk aan de k-waarde.

3.5 Vergelijk met Robertson

Bij vergelijking van de op deze wijze gegenereerde doorlatendheden met het conusweerstand-wrijvingsgetal diagram van Robertson (1986) worden acceptabele doorlatendheden voor de verschillende grondtypes berekend. In de onderstaande figuur zijn de berekende waarden (in kleur, k-waarde in [m/dag]) gecombineerd met het Robertsondiagram.



Vergelijk berekende doorlatendheden in m/dag met het Robertsondiagram.

- 1 Los gepakt zeer fijn zand
- 2 Organisch materiaal
- 3 Klei
- 4 Siltige klei tot klei
- 5 Kleiige silt tot siltige klei
- 6 Zandige silt tot kleiige silt
- 7 Siltig zand tot zandige silt
- 8 Zand tot siltig zand
- 9 Zand
- 10 Grindig zand tot zand
- 11 Zeer compact fijnkorrelig (overgeconsolideerd)
- 12 Zand tot kleiig zand (overgeconsolideerd)

3.6 Vergelijk met laboratoriumproeven

3.6.1 Inleiding

Voor het bepalen van doorlatendheid van aquitards worden doorlatendheidsmetingen in laboratoria uitgevoerd. Op basis van proeven op gestoken monsters wordt in een laboratorium setting een indicatie gemaakt van de doorlatendheid van een deel van de laag waar het monster uit gestoken is. Er zijn over het algemeen twee soorten proeven:

- Samendrukkingsproeven met de Taylor-methode, deze geeft een k_v voor het monster
- Falling-Head proeven waarbij de hoeveelheid water wordt gemeten die per tijdseenheid door een monster wordt doorgelaten

De relevantie van deze bepalingen voor de veldsituatie is onbekend. Uit literatuur komt naar voren dat bij Falling-Head proeven een schaalfactor meespeelt waarbij de doorlatendheid in kleiige sedimenten bijvoorbeeld tot een factor $\log 2.4$ (*Shackelford, 1991*) hoger is bij een large-scale proef (op een vierkante meter) dan bij een small-scale (op circa 10 cm^2).

De in de laboratoria gevonden waarden wijken af van de waarde die uit de sondeergegevens wordt berekend. Deze afwijking bedraagt maximaal $\log 5.6$ (oftewel een waarde die een factor 400.000 afwijkt van de sondeerberekening). Hierbij wordt opgemerkt dat de sondeerberekening niet de werkelijke waarde weergeeft maar louter dient als referentiewaarde.

3.6.2 Vergelijk

Van een aantal infrastructurele projecten is voor verschillende diepten de laboratoriumwaarde van de doorlatendheid bepaald t.o.v. de sondeerwaarde uit de meest nabijgelegen sondering, van het traject met de vergelijkbare diepte.

Hiernaast is van een aantal waterwingebieden, waar langdurige pompproeven zijn uitgevoerd om de totale weerstand van een deklaag te bepalen, de weerstand vergeleken met een sondeerwaarde over het traject van de aquitard. Deze vergelijking is opgenomen in de volgende figuur.

De projecten betroffen:

A4	Falling Head en Taylor proeven
N61	Taylor proeven
A2 Eindhoven	Taylor proeven
Buitenring Parkstad Limburg (BPL)	Taylor proeven
Waterwingebieden	Pompproeven

Hierbij zijn bij de BPL monsters uit löss-afzettingen beproefd en bij de overige projecten monsters uit klei-, veen- en leemhoudende afzettingen. Bij de A4 lijkt het dat de Taylorproeven gemiddeld genomen een waarde van log 1.44 (een factor 27) boven de Falling-Head proeven uitkwamen. Uit de vergelijking met de sondeerwaarden komt naar voren dat de relatie met de daadwerkelijke pompproeven redelijk goed is te noemen (tussen log -0,4 en 0,3 (een factor 0,4 en 2 respectievelijk)); maar dat de laboratoriumproeven afweken over 6,8 logschalen (tussen een factor 0,06 en 400.000). Deze spreiding is groot. Hiernaast valt op dat de afwijking van de sondeerwaarden groter lijkt te worden naar de diepte toe en naarmate het lutumgehalte stijgt, maar ook deze relatie is uitermate zwak.

Benadrukt wordt dat de doorlatendheid van aquitards uit sondeerwaarden niet geijkt is (als dat al mogelijk is) maar dat de berekeningen mogelijk wel een doorlatendheid opleveren die meer in de buurt van “werkelijke” waarden (uit pompproeven) komt.

Onderbouwend hiervoor is dat in laboratoria soms doorlatendheden van $1,10^{-11}$ [m/sec] en lager worden gevonden. Als dit al meetbaar is onder laboratoriumomstandigheden betekent dit dat een waterdruppel in deze aquitard, met deze lage doorlatendheid, meer dan 3000 jaar per meter reist. Dit is onder de Nederlandse omstandigheden op basis van hydrochemie en omgevingskennis ongeloofwaardig. In de onderstaande figuur zijn de metingen uitgezet tegen de berekende weerstand.



4 Resultaten

4.1 Analyse

Voor het valideren van de doorlatendheden in aquifers, zoals bepaald met de methode uit hoofdstuk 3, wordt gebruik gemaakt van de doorlatendheden zoals deze bepaald zijn bij pompproeven en/of bij bemalingen ten behoeve van projecten. De volgende procedure is toegepast:

- Op de locatie waar van een pompproef gegevens bekend zijn wordt gezocht naar een dichtbij liggende sondering. Indien er geen sonderingen in de buurt/op de locatie aanwezig zijn wordt de locatie niet gebruikt.
- Er is alleen gebruik gemaakt van die locaties waar het bepompte pakket in de sondering begrensd is door een waterremmende laag aan de onderzijde (en vaak ook aan de bovenzijde)
- In de sondering is de KD-waarde van de aquifer bepaald.
- Deze KD-waarde is vergeleken met de KD-waarde zoals deze in de pompproeven is bepaald

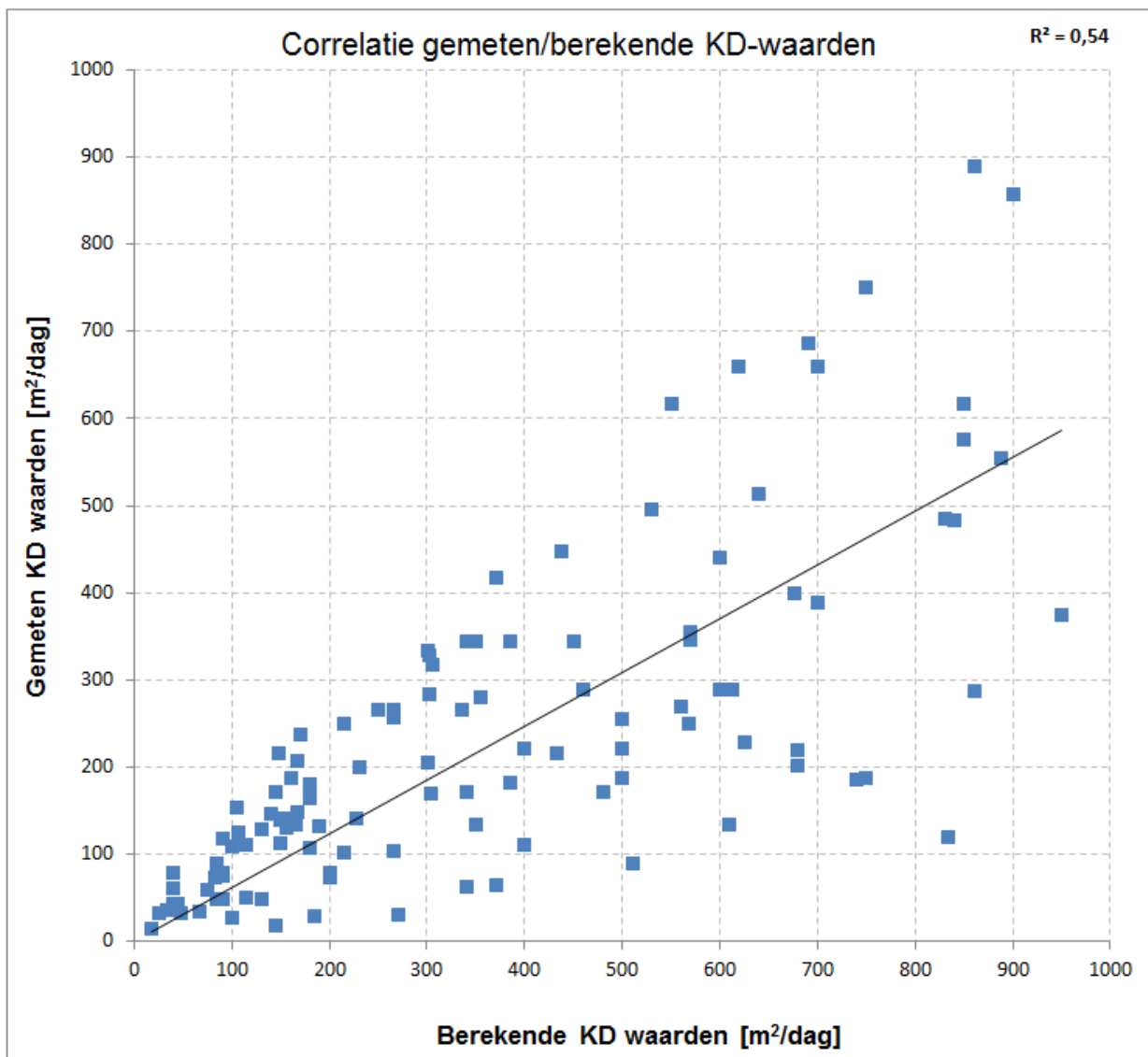
4.2 Pompproeven

In de jaren 50, 60 en 70 van de 20^e eeuw zijn voorafgaand aan de aanleg van grote infrastructurele werken pompproeven uitgevoerd. Deze sonderingen zijn deels opgenomen in de archieven van de RID, en deels in de archieven van TNO.

In totaal zijn, verspreid over Nederland, circa 500 pompproeven beschouwd. Van deze voldeden er 116 aan de voorwaarden zoals opgenomen in paragraaf 4.1.

4.2.1 Analyse

De vergelijking tussen de gemeten KD-waarden en de berekende KD-waarden levert de volgende grafiek op:

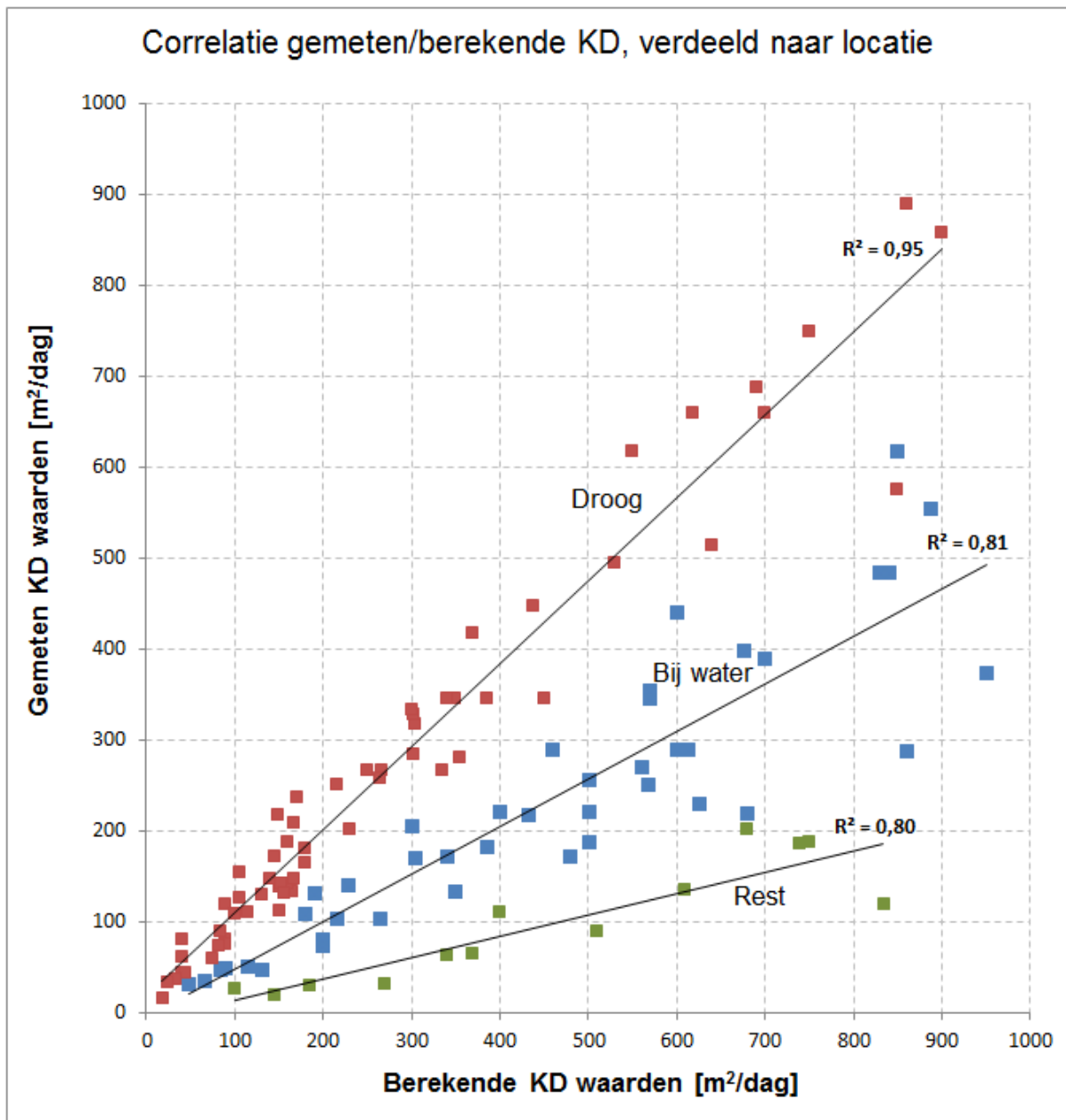


Hieruit komt naar voren dat er nog een grote spreiding aanwezig is tussen de berekende KD (uit sonderingen) en de gemeten KD. De correlatiecoëfficiënt is laag: 0,54.

Bij een verdere uitsplitsing van de fysieke locaties op basis van de nabijheid van open water (waarbij het open water de gepompte aquifer aansnijdt ontstaat) vallen de meetwaarden uiteen in 3 klassen:

- Pompproeven in de directe omgeving van open water
- Pompproeven zonder open water in de directe omgeving
- Een restklasse waarin vooral pompproeven voorkomen die gedaan zijn in sterk gelaagd materiaal (estuariene afzettingen; glaciale afzettingen met een sterke korrelgrootte wisseling).

Dit levert het volgende beeld op:



In deze benadering is de correlatiecoëfficiënt tussen de "droge" pompproeven, de "rest"-pompproeven en de waternabije pompproeven beter dan 0,8.

De Restgroep wordt gekenmerkt door een hoge gemeten KD ten opzichte van de uit de sonderingen berekende. Deze laatste categorie wijkt dermate af dat ze buiten de methodiek wordt gehouden. In een latere notitie wordt op dit aspect teruggekomen.

4.2.2 Invloed open water

Het is aannemelijk dat indien een watergang (of een retourbemaling) aan een pomp pakket water kan leveren (voedende grens) het af te voeren debiet hoger zal zijn dan indien een pomp pakket geen voedende grens in de nabijheid heeft. Een gemeten debiet zal dan in deze methodiek hoger liggen dan de uit de sonderingen (met alleen bodemparameters) wordt berekend.

Dit extra debiet kan berekend worden uitgaande van een hiervoor opgestelde formule van Theis uit 1941:

$$\frac{\Delta Q}{Q_w} = \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{Sl^2}{4KDt}} \right)$$

Hierin is :

ΔQ	Totale debiet uit watergang	$[m^3]$
Q_w	Debiet uit de pomp	$[m^3]$
erfc	complementaire error functie	
S	Bergingscoëfficiënt (porositeit bij freatische pakketten)	[-]
l	Afstand tot de rivier	[m]
KD	Doorlaatcapaciteit van de ondergrond	$[m^2/dag]$
t	Totale duur onttrekking	[dagen]

Uit deze formule volgt dat naarmate de afstand tot de rivier afneemt naar 0 de erfc nadert tot 1 (al het water komt uit de rivier bij een afstand 0), en dat bij grote afstand tot de rivier de erfc nadert tot 0, oftewel 100% van het water komt uit de ondergrond.

Indien rekening wordt gehouden met een wandweerstand op de overgang van de stroom naar de aquifer heeft Hantush in 1965, op basis van werk uit 1954 van Balmer c.s., de volgende verfijning van de formule van Theis bepaald:

$$\frac{\Delta Q}{Q_w} = \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{Sl^2}{4KDt}} \right) - \exp \left(\frac{KDt}{SL^2} + \frac{l}{L} \right) \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{KDt}{SL^2}} + \sqrt{\frac{SL^2}{4KDt}} \right)$$

Hierin is:

L Een waarde voor de lek door de wand van de stroom gelijk aan:

$$L = \frac{K}{K'} b'$$

Met:

K	K-waarde van de aquifer
K'	De k-waarde van de wand
b'	De dikte van de wand

Opgemerkt moet worden dat Hantush uitgaat van een watergang die net zo diep is als de aquifer dik is (fully-penetrating). Hunt (1999) geeft in een artikel aan dat, indien wordt uitgegaan van een realistische diepte van de watergang er weinig verschil is met de formule van Hantush. Met andere woorden: de K' en de b' die in de formule van Hunt worden ingevoerd hebben een verband met de L van Hantush.

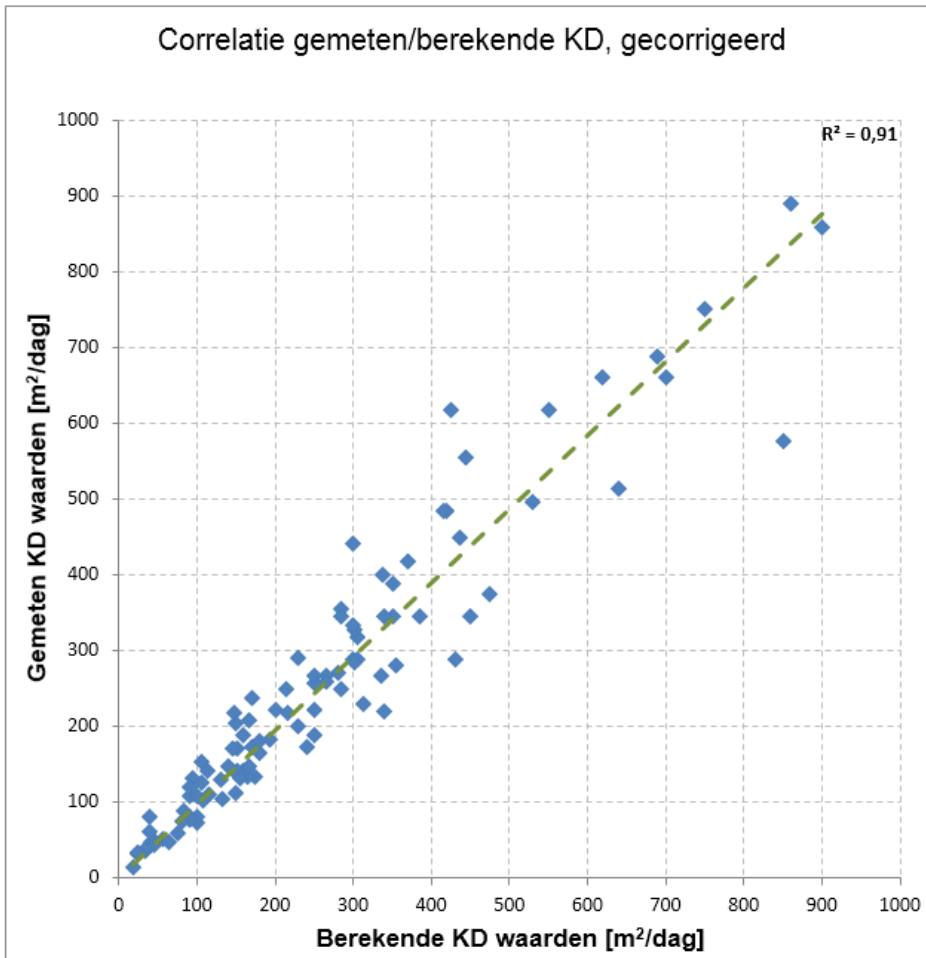
Op basis van de praktijk is het in de Nederlandse situatie mijns inziens acceptabel de formule van Hantush toe te passen met een waarde van $k'=0,0167$ [m/dag] (weerstand 60 dagen) en een $b'=0,2$ [m].

In de uitwerking van de pompproeven worden vervolgens voor pompproeven die nabij watergangen liggen de volgende componenten berekend:

- Het debiet zonder watergang (Q_0), in deze notitie berekend met de KD-waarde uit de sonderingen.
- De rechterzijde van de formule van Hantush (alle parameters zijn immers bekend), dit is een getal tussen 0 en 1.
- Deze uitgangspunten in de formules invullen leidt tot een enkele onbekende (ΔQ)

Het totaal te onttrekken debiet wordt dan in een conservatief scenario Q_0 plus ΔQ . Opgemerkt wordt dat het ondergronddebiet zal afnemen naarmate er meer water uit de voedende grens komt (bij een afstand van 0 meter komt er ook niets meer uit de ondergrond).

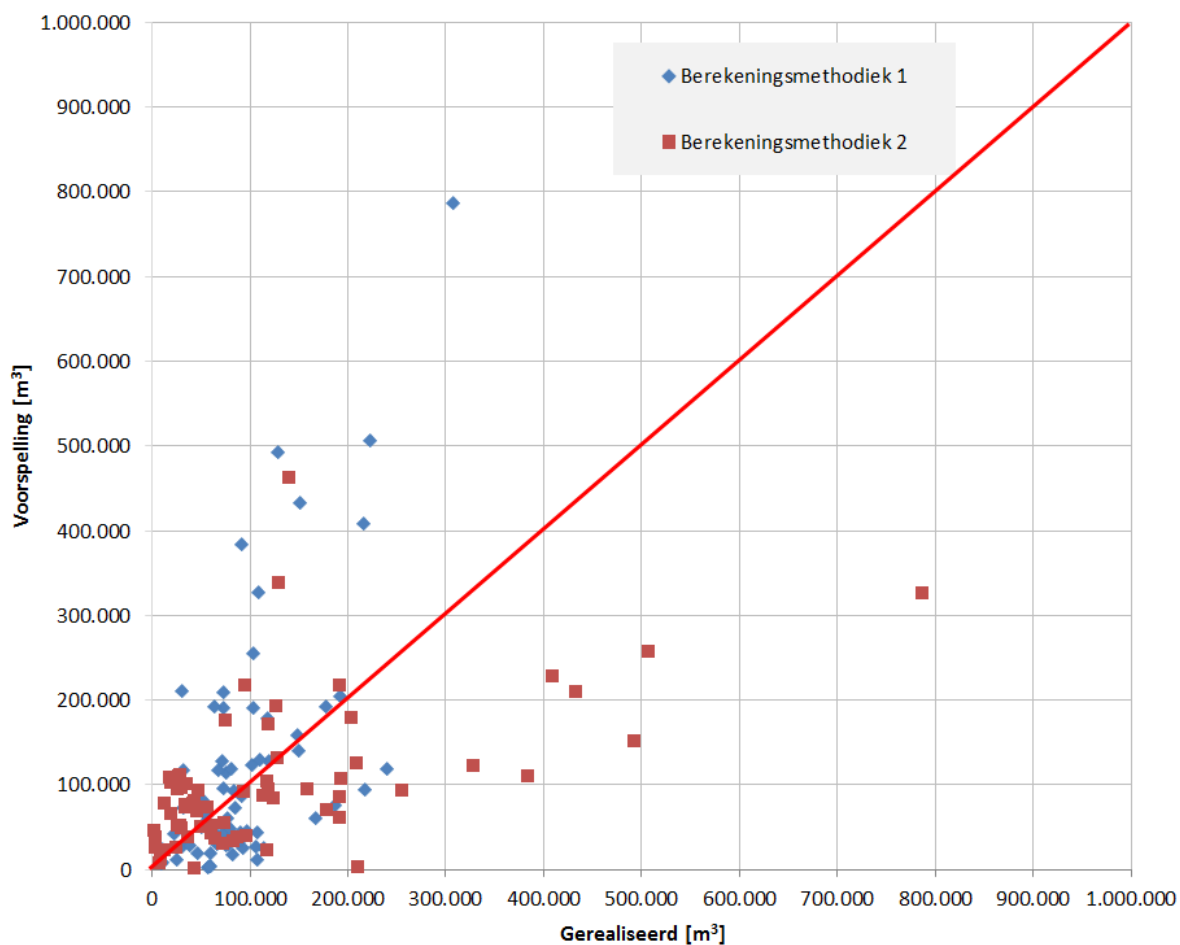
In praktijk lijkt het erop dat de Q_0 -waarde zeer snel de uit sonderingen berekende waarde benadert. Gecorrigeerd op basis van de formule van Hantush ontstaat het volgende beeld.



De relatie is opvallend goed te noemen, de berekende debieten zijn, uitgaande van de k-waarde die aan de hand van de sondeergrafieken is bepaald, vergelijkbaar met de gerealiseerde waarden. Dit verband moet in toekomstige bemalingen nog verder worden getoetst.

4.3 Casus Gasleiding

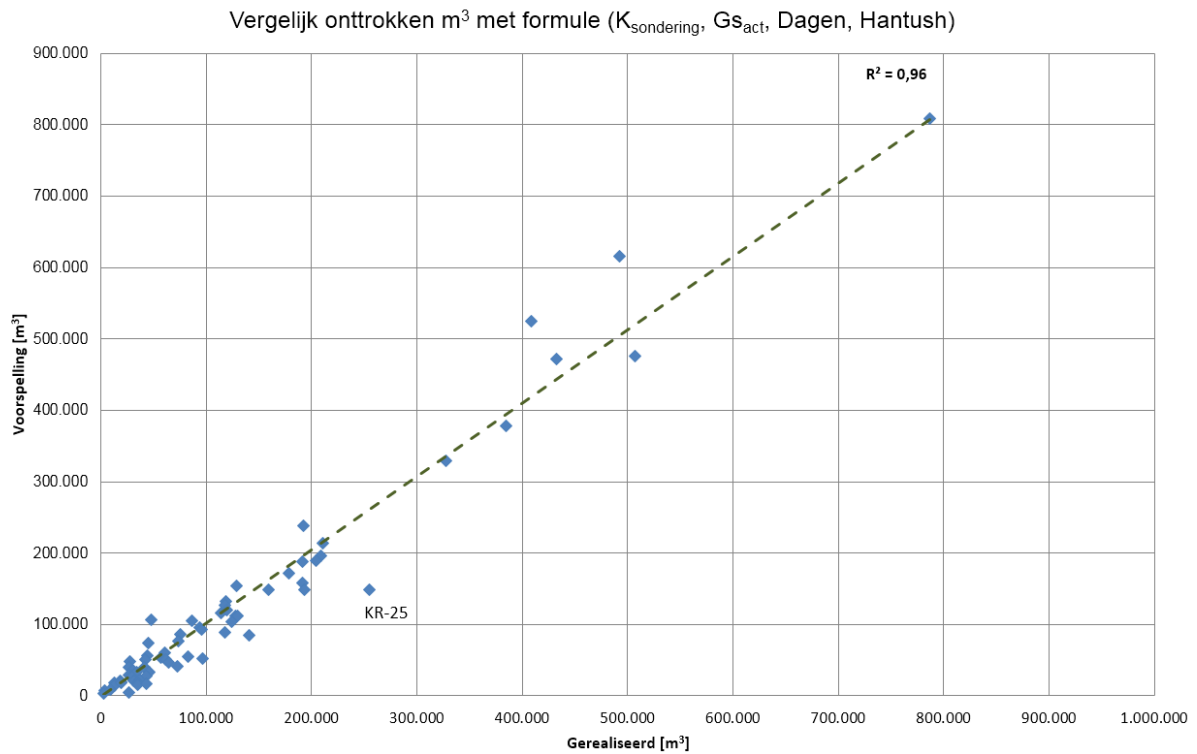
De aanleg van een gasleiding tussen Beuningen en Odiliapeel bood een goede gelegenheid om deze benadering te toetsen aan de werkelijk gerealiseerde debieten. In het voortraject zijn de verwachte debieten berekend op basis van een ingeschatte duur van de bemaling en de grondwaterstand op GHG-niveau, de K-waarden zoals uit de pompproeven door de externe adviseur waren bepaald (berekenningsmethodiek 1). Hiernaast zijn de K-waarden op basis van sonderingen bepaald (berekenningsmethodiek 2). De uitkomsten zijn vergeleken met de daadwerkelijk gerealiseerde debieten.



Uit deze figuur komt naar voren dat de vooraf ingeschatte waarden bij de externe adviseur, met name bij de grotere onttrekkingen, over het algemeen een onderschatting laten zien (minder berekend dan gerealiseerd). De berekening op basis van sonderingen heeft meer te maken met een algemene overschatting.

Beide methodieken gingen uit van een grondwaterstand op GHG-niveau en een vooraf bepaalde bemalingsduur. Een groot voordeel bij dit project is dat de werkelijke bemalingsduur bekend is. Daarnaast is de daadwerkelijke uitgangswaarde voor de grondwaterstanden bekend.

Indien deze waarden worden heringevoerd in berekeningsmethodiek 2 (die al een k-waarde op basis van de sonderingen in zich hadden) ontstaat het volgende beeld:



De correlatie tussen de praktijk en de werkelijkheid is hier opvallend goed. Strecking KR-25 blijkt niet goed te berekenen te zijn, dit kan veroorzaakt zijn door de lokale geologie (i.c. nabijheid van een randbreuk van de Venloslenk). Opgemerkt wordt, ten overvloede, dat in deze berekeningsmethodiek alle variabelen bekend waren (i.c. de k-waarde uit sonderingen) en dat dus een hoge correlatie voor de hand ligt.

5 Conclusie doorlatendheden en weerstand

Op basis van een vergelijking tussen gemeten KD-waarden van aquifers uit pompproeven lijkt het erop dat aan de hand van sondeergegevens een redelijke benadering van de doorlatendheid van een aquifer kan worden ingeschat.

Op basis van een serie pompproefgegevens, aangevuld met metingen uit de praktijk is er voor deze stelling een goede correlatie gevonden.

Opgemerkt moet worden dat bij het toepassen van deze methodiek voorkomen moet worden dat er een te grote betrouwbaarheid aan wordt opgehangen. Daarvoor is meer onderzoek en praktijkervaring noodzakelijk.

Voor het valideren van weerstanden in aquitards kan mogelijk worden teruggevallen op kweldebieten uit natuurlijke polders.

7 Berekening % fines

7.1 Algemeen

Het inschatten van het gehalte aan fijne deeltjes aan de hand van sondeergegevens gaat al zeker terug tot het werk van Robertson en Wride uit 1998. In 2014 heeft Yi op het 3^e ISCP in Las Vegas een paper gepresenteerd aan de hand waarvan een redelijke inschatting kan worden gegenereerd van het percentage deeltjes kleiner dan 70 mu aan de hand van sondeergegevens. Deze methodiek is in het spreadsheet opgenomen.

7.2 Methodiek

Deze methode gaat uit van het vertalen van de combinatie van de conusweerstand (Q_c) en het wrijvingsgetal (F_r) naar een soil behavior type (SBT) met als symbool de I_c .

Deze empirische verhouding is volgens Robertson & Wride (1998) als volgt:

$$I_c = [(3,47 - \log Q_c)^2 + (\log F_r + 1,22)^2]^{0.5}$$

Yi geeft op basis hiervan de volgende percentage verdelingen, de gehalten worden met een empirische formule benaderd.

Waarde I_c	% fines (<75 mu)
0 – 1,31	0
1,31 - 2,5	$42,0 * I_c - 55,0 + 10 * \sin[((I_c - 2,5) / 1,19) * \pi]$
2,5 – 3,1	$83,3 * I_c - 158,3$
>3,2	100
Daarnaast:	
Als $1,31 < I_c < 2,36$ en $F_r < 0,6$	$5 * F_r$

NB: let op de afronding achter de komma, soms 2 getallen en soms een getal. In het DIY-spreadsheet heeft deze berekening een eigen grafiek.

8 Indicatie Interne wrijvingshoek

8.1 Algemeen

Op basis van metingen van de interne wrijvingshoek bij verschillende projecten is er een (vage) correlatie tussen de interne wrijvingshoek en de sondeerwaarden. Deze waarde mag alleen als indicatie worden beschouwd, voor een eerste indruk. Hier blijven laboratoriummetingen onontbeerlijk.

8.2 Methodiek

Deze methode gaat uit van het vertalen van de combinatie van de conusweerstand (Q_c) en het wrijvingsgetal (F_r). Deze empirische verhouding is als volgt:

$$\text{Interne Wrijvingshoek [graden]} = (22 * (Q_c)^{0,08}) * (1/F_r)^{0,2}$$

In het DIY-spreadsheet heeft deze berekening een eigen grafiek.

9 Indicatie compactiegraad

9.1 Algemeen

In de geotechniek is het gebruikelijk om van losse en vaste pakking te spreken. Hoewel dit in de sedimentologie wat vreemd overkomt (de natuur richt zich over het algemeen naar een optimale compactiegraad bij afzetting, waarna de compactie toeneemt bij toenemende bovenbedekking) kan er toch een indicatie van gegeven worden.

In mijn opinie is het beter om te spreken van meer en minder compactie, waarbij in sonderingen meer compactie zich uit in een hogere conuswaarde (Q_c) bij gelijk soortelijk gewicht van de matrix. Er bevindt zich dan meer materiaal in een cm^3 . De verhouding tussen de Q_c en het gewicht van de matrix geeft zo een indicatie van de compactiegraad. Met name in glaciaal samengeperste ondergronden (bijvoorbeeld Noord-Nederland) geeft deze verhouding een duidelijk beeld. Ook hier geeft de grafiek en indicatie, aanvullend onderzoek blijft noodzakelijk.

9.2 Methodiek

Voor het bepalen van de compactiegraad dient er een soortelijk gewicht aan een sondeerwaarde te worden toegekend. Hierbij wordt uitgegaan van de in deze [notitie](#) bepaalde weerstand in dagen.

De toekenning is als volgt:

Weerstand [dagen]	Bodemsoort	Gewicht [kN/m^3]
>115	Jong veen	10
101-115	Kleilig veen	13
51-101	Venige / humeuze klei	15
1-51	Klei	16
0-1	Zand	18

De compactiegraad is op basis hiervan gedefinieerd als het gewicht per sondeerinterval (vaak 0,02 meter) / Q_c . De resulterende waarde ligt over het algemeen tussen 0 (extreem los, bijvoorbeeld waterrijk jong veen) en 200 (extreem compact, bijvoorbeeld geconsolideerd keileem).

10 Bergingsfactor en spreidingslengte

10.1 Bergingsfactor

Door van der Gun (1978) is een empirische formule voor het toekennen van een waarde aan de elastische bergingscoëfficiënt S [-]. Deze formule is als volgt:

$$S = 1,8 \cdot 10^{-6} \cdot (d_2 - d_1) + 0,88 \cdot 10^{-3} \cdot (d_2^{0,3} - d_1^{0,3})$$

Hierin is d_1 de afstand van de top van de watervoerende laag (waarvan de S bepaald dient te worden) tot aan de grondwaterspiegel en d_2 de afstand van de onderzijde van de watervoerende laag (waarvan de S bepaald dient te worden) tot aan de grondwaterspiegel.

In het DIY spreadsheet kunnen deze waarden handmatig worden ingevoerd,

10.2 Spreidingslengte

De spreidingslengte is een waarde [m] die gebruikt wordt in modelstudies. Ze is gedefinieerd met de formule:

$$\lambda = (KD \cdot c)^{0,5}$$

Voor een modelstudie geldt vaak dat de rand van een model op minimaal 3.l van de onttrekkingsbron dient af te liggen om te voorkomen dat het model “aan de rand gaat hangen”.

Het DIY spreadsheet genereert deze waarden op basis van de KD-waarde van de onderliggende aquifer en de c-waarde van de bovenliggende aquitard. De waarden voor KD en c worden handmatig bepaald(zie hoofdstuk 11).

11 DIY Spreadsheet

11.1 Algemeen

Voor het snel omzetten van sondeergegevens naar waarden is een spreadsheet in Excel ontwikkeld. Dit is te downloaden¹. Voor het toepassen zijn er de volgende aspecten van belang.

11.1.1 Invoeren waarden

Vanuit .Gef-files, in feite tekst-files, worden de meetwaarden (in onderstaand voorbeeld blauw geblokt) gekopieerd

```
#MEASUREMENTVAR = 9,0,-,PPT u3 niet gemeten
#MEASUREMENTVAR = 10,1,-,helling gemeten
#MEASUREMENTVAR = 13,0,m,voorgegraven diepte
#MEASUREMENTVAR = 16,35,m,einddiepte sondering
#MEASUREMENTVAR = 17,0,-,stopcriterium: Einddiepte bereikt
#MEASUREMENTVAR = 20,8.724, MPa, nulmeting helling N-S voor sondering
#MEASUREMENTVAR = 21,8.765, MPa, nulmeting helling N-S na sondering
#MEASUREMENTVAR = 22,0.02352, MPa, nulmeting helling E-W voor sondering
#MEASUREMENTVAR = 23,0.02449, MPa, nulmeting helling E-W na sondering
#MEASUREMENTVAR = 32,-108.94, MPa, nulmeting helling N-S voor sondering
#MEASUREMENTVAR = 33,-108.14, MPa, nulmeting helling N-S na sondering
#MEASUREMENTVAR = 34,-111.24, MPa, nulmeting helling E-W voor sondering
#MEASUREMENTVAR = 35,-111.64, MPa, nulmeting helling E-W na sondering
#STARTDATE = 2009,1,28
#STARTTIME = 0,0,0
#XYID = 31000,91686.51,436290.09,0.01,0.01
#ZID = 31000,-1.24,0.01
#EOH =
```

0.0050	0.3040	0.0020	-9999.9900	0.4000	-0.4000	-0.2000	0.0050	111.0000
0.0100	0.3450	0.0020	-9999.9900	0.4000	-0.4000	-0.2000	0.0090	111.5000
0.0150	0.4070	0.0030	-9999.9900	0.4000	-0.4000	-0.1000	0.0150	111.9000
0.0200	0.4680	0.0030	-9999.9900	0.2000	-0.2000	-0.1000	0.0200	112.4000
0.0250	0.5340	0.0030	-9999.9900	0.4000	-0.4000	-0.1000	0.0250	112.9000
0.0300	0.6290	0.0040	-9999.9900	0.3000	-0.3000	-0.1000	0.0290	113.4000
0.0350	0.7850	0.0040	-9999.9900	0.4000	-0.3000	-0.2000	0.0340	113.9000
0.0400	0.9330	0.0040	-9999.9900	0.4000	-0.3000	-0.2000	0.0390	114.4000
0.0450	1.1180	0.0040	-9999.9900				0440	114.9000
0.0500	1.2530	0.0050	-9999.9900				0490	115.5000
0.0550	1.3890	0.0060	-9999.9900				0540	116.0000
0.0600	1.5000	0.0060	-9999.9900	0.3000	-0.3000	-0.1000	0.0590	116.4000
0.0650	1.6110	0.0070	-9999.9900	0.2000	-0.2000	-0.1000	0.0640	116.9000
0.0700	1.7260	0.0070	-9999.9900	0.3000	-0.3000	-0.1000	0.0690	117.4000
0.0750	1.8450	0.0070	0.3694	0.3000	-0.3000	-0.1000	0.0740	117.9000
0.0800	1.9640	0.0080	0.3981	0.2000	-0.2000	0.0000	0.0790	118.4000
0.0850	2.0870	0.0090	0.4234	0.3000	-0.2000	-0.2000	0.0840	118.8000
0.0900	2.2020	0.0100	0.4461	0.3000	-0.3000	-0.1000	0.0890	119.3000
0.0950	2.3260	0.0110	0.4665	0.4000	-0.4000	0.0000	0.0940	119.8000
0.1000	2.4450	0.0110	0.4447	0.4000	-0.3000	-0.3000	0.0990	120.3000
0.1050	2.5850	0.0110	0.4255	0.2000	-0.2000	0.0000	0.1050	120.8000
0.1100	2.7080	0.0120	0.4456	0.3000	-0.3000	0.1000	0.1100	121.2000
0.1150	2.8440	0.0130	0.4648	0.2000	-0.2000	-0.1000	0.1150	121.7000
0.1200	2.9630	0.0140	0.4833	0.3000	-0.3000	-0.1000	0.1200	122.2000
0.1250	3.0740	0.0150	0.5010	0.3000	-0.2000	-0.2000	0.1250	122.7000
0.1300	3.1760	0.0150	0.4857	0.2000	-0.2000	0.0000	0.1300	123.2000
0.1350	3.2750	0.0160	0.5030	0.2000	-0.2000	0.0000	0.1350	123.6000
0.1400	3.3820	0.0170	0.5199	0.1000	-0.1000	0.0000	0.1400	124.1000
0.1450	3.4800	0.0170	0.5066	0.3000	-0.3000	-0.1000	0.1450	124.6000
0.1500	3.5630	0.0180	0.5234	0.2000	-0.2000	-0.1000	0.1500	125.1000

Deze waarden worden gekopieerd naar de A1-cal van het tabblad <invoerblad> . Zorg dat dit blad eerst is leeggeruimd. Via het menu <gegevens> kan <tekst naar kolommen> worden gekozen. Kies hier voor scheiding door middel van spatie.

¹ [Spreadsheet](#)

Vervang vervolgens de punt door een komma (via ctrl-h).

In het tabblad <grafieken> wordt vervolgens de uitwerking opgebouwd.

Mochten er nog aanpassingen nodig zijn in de rekenregels, het tabblad <rekenblad> kan zichtbaar worden gemaakt door de optie <zichtbaar maken>, te vinden door rechts klikken op het tabblad-labeltje.

11.1.2 Uitleg sheet

De grafieken worden in de voorafgaande hoofdstukken nader uitgelegd.

Hiernaast kan nog een vinkje in de juiste sondebron worden gezet. Deze is nodig omdat verschillende sondefirma's met verschillende notaties werken (kPa, Mpa, m , cm etc.). Door het juiste vakje aan te vinken kan de juiste grafiek getekend worden. (NB: zorg dat in de opties voor Excel (achter het tabblad <Bestand>) in het submenu Formules, de berekeningsopties op Automatisch staan, anders gebeurt er niets).

In de kolommen AI (Telstaat K, de doorlatendheid) en AJ (Totale weerstand) staan de doorlatendheden en de weerstanden. Deze kunnen worden ingevuld, na sommatie, in de juiste cellen:

[m aquitard]	
[dagen]	
#DEEL/0! [m/dag]	#DEEL/0! [m/sec]
#DEEL/0! [dag/m]	

Vul bij de dikte van een aquitard de dikte in meter in, vul bij de weerstand de sommatie in dagen in. De overige waarden worden dan automatisch berekend.

[m/dag]	0,0E+00 [m/sec]
[m ² /dag]	

Vul bij de k-waarde in [m/dag] de gemiddelde waarde uit de telstaat in en bij de KD-waarde de sommatie gedeeld door 50 (want er gaan 50 meetwaarden in en strekkende meter).

Voor de rest wijst een en ander zichzelf. Ik heb bewust de sheet niet beveiligd opdat een ieder hem naar beleven kan optimaliseren.

11.2 Disclaimer

Deze sheet is gebaseerd op empirische inzichten. Gebruik is volledig op eigen risico en ontslaat je niet van degelijk aanvullend onderzoek (bijvoorbeeld pompproeven,).

12 Gebruikte literatuur

CROW	2004	Handboek Zandboek	
De Ridder, N.A.	1966	Analysis of the pumping test 'De Vennebulten' near Varsseveld	Land and Water Manag. Res., Wageningen, Report no. 335,s pp.
DHV	1997	VAM Wijster: Pompproeven en optimalisatie beheersmaatregel	Intern rapport VAM N.V.
Glover, R.E., Balmer G.G.	1954	River depletion resulting from pumping a well near a river,	Trans. Am. Geophys. Union, v. 35, 468-470.
Hantush, M.S.	1965	Wells near streams with semipervious beds	J. Geophysical Res., 70(12), 2829-2838.
Hunt, B.	1999	Unsteady stream depletion from ground-water pumping	Ground Water, 37(1), 98-102.
Nienhuis P. c.s.	1999	Analyse van pompproeven met onvolkomen putfilters in verticaal heterogene pakketten op basis van meerlagenstroming	Stromingen 5, nr 1 pp39-52
Pomper A.B.	1996	Schatting van doorlaatfactoren (k-waarden) aan de hand van in boorarchieven aanwezige boorbeschrijvingen	TNO rapport 05-038-B Nederlandse Hydrologische vereniging, Stromingen 2
Robertson P.K. et al.	1986	Use of Piezometer Cone data.	In-Situ'86 <i>Use of In-situ testing in Geotechnical Engineering</i> , GSP 6 , ASCE, Reston, VA, Specialty Publication, pp 1263-1280.
Robertson, P.K. and Wride, C.E.	1998	Evaluating cyclic liquefaction potential using the cone penetration test.	Canadian Geotechnical Journal 35(1): 442-459.
Shackelford, C. D. and Javed, F.	1991	Large-Scale Laboratory Permeability Testing of a Compacted Clay Soil	Geotechnical Testing Journal, GTJODJ, Vol. 14, No. 2, June 1991, pp, 171-179
Spaans watermanagement	2009	Bemalingsadvies ten behoeve van de aanleg van een halfopen tunnel op de kruising Soestdijkerstaartweg en Oostereind te Hilversum	Rapportage PHS/8103
Theis, C. V.	1941	The effect of a well on the flow of a nearby stream.	Trans. Am. Geophys. Union pt. 3.
Van Der Gun, J.	1979	Schatting van de elastische bergingscoëfficiënt van zandige watervoerende pakketten	Delft, Jaarverslag 1979 TNO dienst waterverkenning, p51-61
Witteveen +Bos	1992	Bronbemaling RWZI Ede	
Witteveen +Bos	1995	Evaluatiebemaling RWZI Ede	WB/VISB/rap 44.001

