

Ontwerpnormen fijnzandige aquifers

Deelrapport Werkpakket I

Penvoerder onderzoek:

IF Technology
Velperweg 37
Postbus 605
6800 AP ARNHEM
T 026 - 35 35 555
F 026 - 35 35 599
E info@iftechnology.nl

Consortiumleden:

Universiteit van Utrecht
Postbus 80011
3508 TA UTRECHT

Samenvatting

Energieopslagsysteem

Een energieopslagsysteem bestaat uit een of meerdere onttrekkingsputten en infiltratieputten. Voor het juist dimensioneren van deze putten zijn ontwerpnormen opgesteld; een norm voor het dimensioneren van infiltratieputten en een norm voor het dimensioneren van onttrekkingsputten. De infiltratienorm is gebaseerd op de verstoppingsnelheid van de put door fijne deeltjes. De onttrekkingsnorm is gebaseerd op het voorkomen van zandlevering. In de onttrekkingsnorm wordt aangenomen dat er een lineair verband is tussen de toegestane snelheid op de boorgatwand en de doorlatendheid van de aquifer:

$$v_b = \frac{k}{12}$$

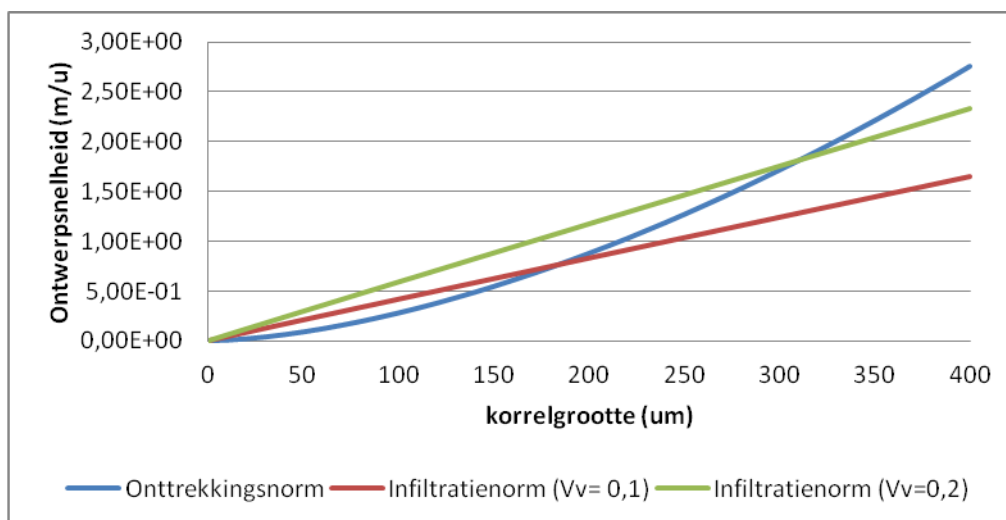
k = doorlatendheid [m/d]
 v_b = stroomsnelheid op de boorgatwand [m/h]

De infiltratienorm wordt weergegeven als:

$$v = 1000 \left(\frac{k}{150} \right)^{0.6} * \sqrt{\frac{v_v}{2 * MFI_{mea} U_{eq}}}$$

v = ontwerpsnelheid [m/h]
 k = doorlatendheid [m/d]
 v_v = specifieke verstoppingsnelheid [m/j]
 MFI_{mea} = gemeten MFI [s/l²]
 U_{eq} = aantal equivalente vollasturen per jaar [u]

De doorlatendheid kan met behulp van de methode van Shepherd gecorreleerd worden aan de gemiddelde korrelgrootte. In figuur 0.1, is een vergelijking gemaakt tussen de onttrekkingsnorm en de infiltratienorm door de ontwerpsnelheid uit te zetten tegen de gemiddelde korrelgrootte van het pakket. Hierbij zijn voor de infiltratienorm vaste waarden gekozen, de MFI (2 s/l²) en het aantal equivalente vollasturen (1.500 h). De verstoppingsnelheid is gevarieerd (0,1 m/j en 0,2 m/j).



Figuur 0.1 Vergelijking onttrekkings- en infiltratienorm.

Bij een verstoppingsnelheid van 0,1 m/j geeft de onttrekkingsnorm de laagste ontwerp-snelheid tot een korrelgrootte van 180 μm . Wanneer er een verstoppingsnelheid van 0,2 m/j wordt gekozen, ligt deze grens bij een korrelgrootte van 310 μm .

Hoge temperatuuropslag

Bij hoge temperatuuropslag is er een groot verschil tussen de opslagtemperatuur en de omgevingstemperatuur. Door het verschil in dichtheid tussen het opgeslagen warme water en het omringende grondwater gaat het warmere water opdrijven. Deze dichtheidsstrooming is doorgaans het belangrijkste proces dat zorgt voor warmteverliezen. Het opslagrendement wordt bepaald door de dikte van de aquifer, het temperatuurverschil met het omringende grondwater en de doorlatendheid van de aquifer. Van deze parameters is de doorlatendheid veruit de meest belangrijke. Bij een lagere doorlatendheid wordt de dichtheidsstrooming onderdrukt en neemt het opslagrendement toe. Om deze redenen is het interessant om te kijken naar de mogelijkheid van hogetemperatuuropslag in fijnzandige aquifers.

Het nadeel van fijnzandige aquifers is dat er volgens de huidige ontwerpnorm slechts een beperkt debiet aan kan worden onttrokken. Bij een dergelijk debiet zijn de systemen economisch gezien moeilijk rendabel te maken. De vraag is daarom in hoeverre deze normen verruimd kunnen worden.

De huidige ontwerpnormen zijn gebaseerd op de gemiddelde doorlatendheid van het opslagpakket.

De doorlatendheid kan als volgt berekend worden:

$$k = \frac{\rho_f \cdot g}{\mu} \cdot K_i$$

k = doorlatendheid [m/s]

ρ_f = dichtheid van vloeistof [kg/m³]

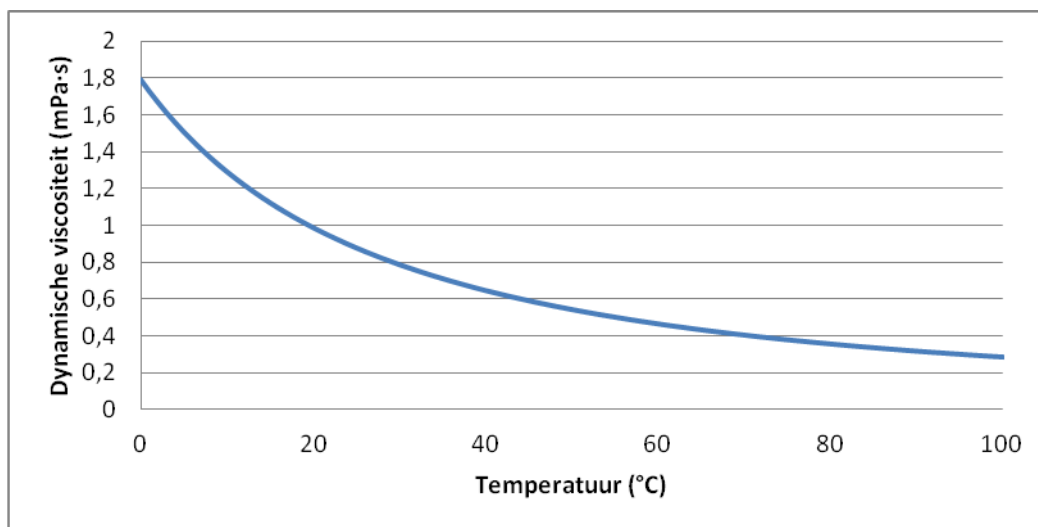
g = valversnelling [m/s²]

μ = dynamische viscositeit [Pa · s]

K_i = intrinsieke permeabiliteit [m²]

De doorlatendheid wordt dus niet alleen bepaald door de eigenschappen van het sediment (K_i), maar ook door de viscositeit en dichtheid van het water, die afhankelijk zijn van de temperatuur, de druk en het zoutgehalte van het water is afhankelijk van de temperatuur van het water, de druk en het zoutgehalte. Voor “standaard” energieopslagsystemen is de invloed van deze parameters op de doorlatendheid relatief klein door de beperkte temperatuurverschillen.

Bij hogetemperatuuropslagsystemen hebben het zoutgehalte en de druk geen grote invloed op de viscositeit en dichtheid. De viscositeit van water neemt echter sterk af bij hogere temperaturen. Dit aspect kan derhalve niet verwaarloosd worden. Figuur 0.2 geeft de relatie tussen viscositeit en temperatuur.



Figuur 0.2 Dynamische viscositeit uitgezet tegen temperatuur.

Uit het voorgaande blijkt dat het voor het dimensioneren van bronnen voor hogetemperatuuropslag noodzakelijk is om rekening te houden met de invloed van de temperatuur op de doorlatendheid. De doorlatendheid in de reeds bestaande normen dient hiertoe vervangen te worden door de intrinsieke permeabiliteit. Verder dient de dichtheid en de viscositeit van het water bij de temperatuur van het onttrokken en geïnfiltreerde water bepaald te worden.

Aanpassing ontwerpnormen

Indien de temperatuur meegenomen wordt, gaat de onttrekkingsnorm er als volgt uit zien:

$$v_b = 7200 * \frac{\rho_f \cdot g}{\mu} \cdot K_i$$

v_b = stroomsnelheid op de boorgatwand [m/h]

De invloed van de temperatuur op de doorlatendheid geldt evenzeer voor de infiltratienorm.

$$v = 1000 \left(576 * \frac{\rho_f \cdot g}{\mu} \cdot K_i \right)^{0.6} * \sqrt{\frac{v_v}{2 * MFI_{mea} U_{eq}}}$$

v = ontwerpsnelheid [m/h]

K_i = intrinsieke permeabiliteit [m^2]

ρ_f = dichtheid [kg/m^3]

g = valversnelling [m/s^2]

μ = dynamische viscositeit [kg/ms]

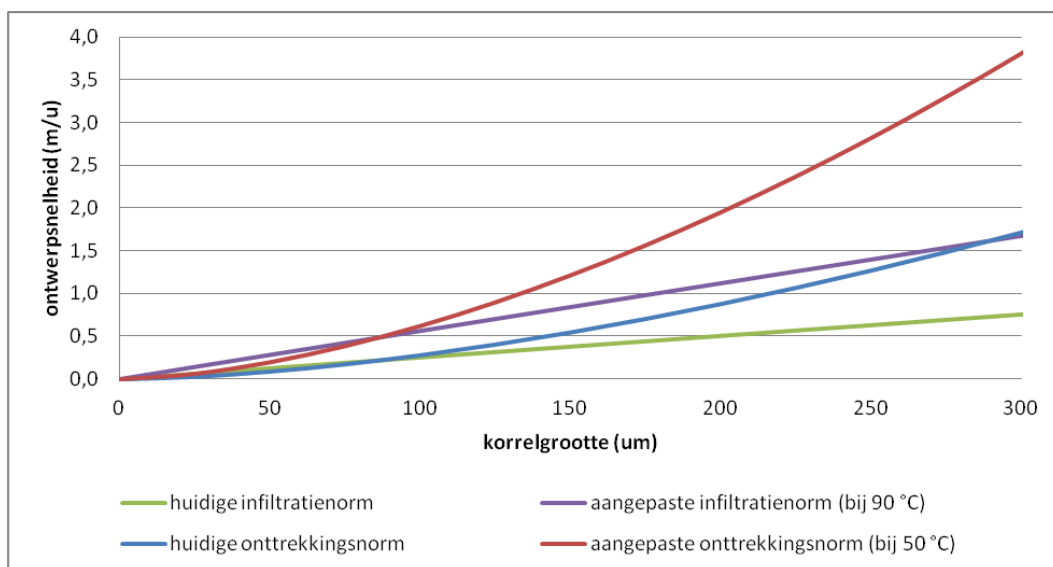
v_v = specifieke verstoppingsnelheid [m/j]

MFI_{mea} = gemeten MFI [s/l^2]

U_{eq} = aantal equivalente vollasturen per jaar [u]

Zowel voor de onttrekkingsnorm als de infiltratienorm zal de ontwerpsnelheid hoger zijn bij een hogere temperatuur. Doordat in de infiltratienorm ($1/\mu$) tot de macht 0,6 wordt verheven en in de ontwerpnorm niet, gaat de verandering van de ontwerpsnelheid met temperatuur niet gelijk op.

In figuur 0.3 is de huidige onttrekkings- en infiltratienorm vergeleken met de aangepaste normen. De weergegeven norm is gebaseerd op de warme bron van de case in Gorinchem. Hierin bedraagt de minimale onttrekkingstemperatuur uit de warme bron ongeveer 50°C en de infiltratietemperatuur ongeveer 90°C. Uit de vergelijking blijkt dat door het integreren van de temperatuur in de ontwerpnormen in deze case de ontwerpsnelheid ruim twee keer zo groot mag zijn in vergelijking met de huidige ontwerpnormen.



Figuur 0.3 Vergelijking tussen de huidige ontwerpnormen en de aangepaste ontwerpnormen voor de case Gorinchem.

Praktijkervaringen

In Nederland zijn enkele bronnen voor hogetemperatuuropslag en vele bronnen voor energieopslag gerealiseerd. De onderzochte bronnen voor hogetemperatuuropslag voldoen niet aan de huidige ontwerpnormen. Een deel van de bronnen voldoet ook niet aan de aangepaste ontwerpnormen. Over het algemeen voldoen de bronnen voor 'standaard' energieopslag wel aan de huidige ontwerpnormen. Van de onderzochte bronnen overschrijden enkele wel de ontwerpnormen.

Van enkele bronnen (van zowel hogetemperatuuropslag als 'standaard' energieopslag) is bekend dat er zandlevering optreedt. De oorzaak van deze zandlevering hoeft niet direct te liggen bij het overschrijden van de ontwerpnormen. Mogelijke oorzaken kunnen ook zijn een verkeerde keuze van filtergrind en -spleten, grote variatie in korrelgrootte, filters in kalksteen en scheve debietverdeling over het filtertraject of een combinatie van deze oorzaken. Een directe relatie tussen het overschrijden van de norm en zandlevering is (nog) niet gevonden.

Aanbevelingen

Een nadeel van de gebruikte methode van Shepherd is dat deze relatie geen rekening houdt met de porositeit, een parameter die wel degelijk van belang is voor de doorlatendheid. In de aangepaste normen wordt de gemiddelde korrelgrootte omgerekend naar een doorlatendheid (bij 12°C) en deze doorlatendheid wordt vervolgens omgerekend naar een intrinsieke permeabiliteit. Deze intrinsieke permeabiliteit wordt vervolgens weer teruggerekend naar een doorlatendheid voor de onttrekkings- dan wel infiltratietemperatuur. Een manier om de invloed van de porositeit op de doorlatendheid te berekenen is met behulp van de methode van Kozeny-Carman. Hieronder staat een mogelijke vorm van de formule van Kozeny-Carman weergegeven:

$$k = \left(\frac{\rho_f g}{\mu} \right) \left(\left(\frac{n^3}{(1-n)^2} \right) \left(\frac{(D50)^2}{180} \right) \cdot 10^{-12} \right)$$

k = doorlatendheid [m/s]

ρ_f = dichtheid [kg/m³]

g = valversnelling [m/s²]

μ = dynamische viscositeit [kg/ms]

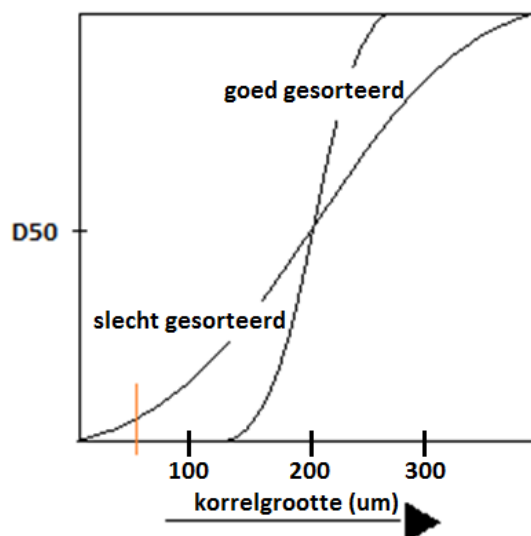
n = porositeit [-]

$D50$ = gemiddelde korrelgrootte [um]

intrinsieke permeabiliteit: $\left(\frac{n^3}{(1-n)^2} \right) \left(\frac{(D50)^2}{180} \right) \cdot 10^{-12}$

Volgens de methode van Kozeny-Carman is de doorlatendheid sterk afhankelijk van de porositeit. De porositeit is echter meestal niet bekend. Het verdient de aanbeveling om na te gaan of de porositeit vooraf kan worden ingeschat. Mogelijkheden zijn de methoden van Archie (op basis van EC-metingen en VES-metingen) of porositeit-diepte relaties.

Een ander belangrijk aspect dat van invloed is op het ontwerp van putten is de mate van sortering van het zand in de bodem. De sortering van het zand heeft een directe invloed op de mate van zandtransport in de bodem. Een gemiddelde poriediameter is kleiner dan de korrelgrootte. Theoretisch gezien is zandtransport door een volledig homogeen zand daarom niet mogelijk en zijn in dat geval hoge ontwerpsnelheden toegestaan. Immers, geen van de korrels heeft een diameter die door de poriën past. Figuur 0.4 laat zien hoe bij twee soorten zand, beide met een gemiddelde korrelgrootte van 200 um, het slecht gesorteerde zand meer korrels bevat die door de gemiddelde poriegrootte (op basis van de vaak gebruikte schatting van $\frac{1}{6} * D50$) passen.



Figuur 0.4 Schematische weergave van twee korrelgrootteverdelingen. De rode lijn komt overeen met de gemiddelde poriegrootte op basis van $\frac{1}{6} * D50$.

Vanuit dit perspectief gezien is de korrelgrootteverdeling van een poreus medium een erg belangrijke factor voor zandtransport. Het verdient de aanbeveling dit aspect nader te onderzoeken en na te gaan welke mogelijkheden er zijn om dit te verwerken in een ontwerpnorm.

Daarnaast wordt aanbevolen om zoveel mogelijk beschikbare informatie te analyseren, waarbij gekeken wordt in welke mate bronnen voldoen aan de huidige ontwerpnorm. Het analyseren van flowmetingen kan hierbij inzicht geven of en in welke mate overschrijding van de onttrekkingsnorm optreedt als gevolg van onder andere scheve debietverdelingen over het filtertraject. Verder wordt nader onderzoek naar de oorzaken van zandlevering bij bronnen waar zandlevering optreedt aanbevolen.

Symbolenlijst

symbool	beschrijving	eenheid
A	oppervlakte	m^2
β_f	compressibiliteit van water	m^2/N
C_d	sleepkrachtcoëfficiënt	–
D_{50}	gemiddelde korrelgrootte	μm
D_{10}	10% korrelgrootte van korrelgrootteverdeling	–
D_{60}	60% korrelgrootte van korrelgrootteverdeling	–
d_p	gemiddelde poriediameter	μm
$\frac{dh}{dx}$	hydraulische gradient	–
F_d	sleepkracht	N
g	valversnelling	m/s^2
H	filterlengte	m
k	doorlatendheid	m/d
K_i	intrinsieke permeabiliteit	m^2
MFI_{mea}	gemeten MFI	s/l^2
n	porositeit	–
n_0	porositeit aan de oppervlakte	–
ϕ	krumbein korrelgrootte	–
P	druk	N/m^2
P	poriewater druk	N/m^2
Sk	scheefheid	–
S_{std}	standaarddeviatie	–
σ_{vt}	totale verticale spanning	N/m^2
σ_{ve}	effectieve spanning	N/m^2
ρ_w	dichtheid van water	kg/m^3
ρ_p	dichtheid zand	kg/m^3
r_b	straal van het boorgat	m
Re	getal van Reynolds	–
T	temperatuur	$^{\circ}C$
μ	dynamische viscositeit	$Pa \cdot s$
UC	uniformiteitscoëfficiënt	–
U_{eq}	aantal equivalente vollasturen per jaar	h
v	stroomsnelheid	m/s
v_b	stroomsnelheid op de boorgatwand	m/h
v_s	sedimentatiesnelheid	m/s
v_v	specifieke verstopingssnelheid	m/j
w_i	gewichtfracie	–

symbool	beschrijving	eenheid
<i>Q</i>	<i>debiet</i>	m^3/d
<i>z</i>	<i>diepte</i>	<i>m</i>

Inhoudsopgave

Samenvatting	2
Symbolenlijst	9
1 Inleiding	12
1.1 Achtergrond en doelstelling onderzoek.....	12
1.2 Leeswijzer	12
2 Huidige ontwerpnormen	13
2.1 Onttrekkingsnorm	13
2.2 Infiltratienorm.....	14
2.3 Richtlijnen voor de huidige NVOE norm	15
3 De doorlatendheid	17
3.1 Viscositeit	17
3.2 Dichtheid van water.....	18
4 Intrinsieke permeabiliteit.....	20
4.1 Intrinsieke permeabiliteit	20
4.2 Porositeit	22
4.3 Porositeitsafname.....	25
4.4 Porositeit en permeabiliteit.....	27
5 Korrelgrootteverdeling	29
6 Aanpassing ontwerpnormen.....	33
7 Praktijkervaringen.....	36
7.1 Hogetemperatuuropslag.....	36
7.2 'Standaard' energieopslag	37
8 Aanbevelingen.....	38
Literatuurlijst.....	41
Bijlagen:	
1 Processen en theorieën die ten grondslag liggen aan zandtransport	

1 Inleiding

1.1 Achtergrond en doelstelling onderzoek

Voor het duurzaam klimatiseren van gebouwen wordt veel gebruik gemaakt van koude- en warmteopslagsystemen in de bodem (KWO). Met een KWO-systeem wordt winterkoude opgeslagen in de bodem om deze in de zomer te kunnen gebruiken voor koeling. In de zomer wordt warmte opgeslagen om vervolgens in de winter te gebruiken voor verwarming.

Een op dit moment minder toegepaste variant van energieopslag in de bodem is hogetemperatuuropslag. Hierbij wordt restwarmte, uit bijvoorbeeld een warmtekrachtcentrale of geothermiebronnen, opgeslagen in de bodem om op momenten met een grote warmtevraag nuttig in te kunnen zetten. Hierbij worden temperaturen tot circa 90 °C opgeslagen. Als gevolg van een groot verschil in dichtheid tussen het opgeslagen warme water en het omringende grondwater gaat het warmere water opdrijven (dichtheidsstroming). Het opslagrendement wordt onder andere bepaald door de dikte van de aquifer, het temperatuurverschil met het omringende grondwater en de doorlatendheid van de aquifer. Van deze parameters is de doorlatendheid de belangrijkste (zie Deelrapport Werkpakket III). Om deze dichtheidsstroming te beperken wordt hogetemperatuuropslag bij voorkeur in fijnzandige aquifers gerealiseerd. Het nadeel van fijnzandige aquifers is dat er volgens de huidige ontwerpnorm slechts een beperkte capaciteit aan kan worden onttrokken. Hierdoor zijn de systemen economisch gezien moeilijk rendabel te maken. Daarom is onderzocht of de huidige ontwerpnormen aangepast kunnen worden.

Dit onderzoek richt zich op de ontwerpnormen voor hogetemperatuuropslag. Bij hoge temperatuuropslag kan, als gevolg van de invloed van de hogere temperatuur op de waterkwaliteit, verstopping van de bronnen optreden¹. Dit staat echter los van het ontwerp van de bronnen van de hogetemperatuuropslag. Daarom zijn de effecten van een hogere temperatuur op de waterkwaliteit niet meegenomen in dit onderzoek.

1.2 Leeswijzer

Hoofdstuk 2 bespreekt kort de huidige onttrekkings- en infiltratienorm. In hoofdstuk 3 wordt gekeken hoe temperatuur invloed heeft op de doorlatendheid. Hoofdstuk 4 geeft een overzicht van de processen die de porositeit en intrinsieke doorlatendheid bepalen. Hoofdstuk 5 geeft een verklaring hoe de sortering invloed kan hebben op zandtransport. Hoofdstuk 6 geeft de aanpassingen voor ontwerpnormen voor hogetemperatuuropslag. In hoofdstuk 7 worden aanbevelingen gedaan om deze ontwerpnormen verder te verbeteren.

¹ Meer Met Bodemenergie, rapport 'Hogetemperatuuropslag'

2 Huidige ontwerpnormen

Een energieopslagsysteem bestaat uit een of meerdere onttrekkingsputten en infiltratieputten. Voor het juist dimensioneren van deze putten zijn ontwerpnormen opgesteld; een norm voor het dimensioneren van infiltratieputten en een norm voor het dimensioneren van onttrekkingsputten. De infiltratienorm is gebaseerd op de verstoppingsnelheid van de put door fijne deeltjes. De onttrekkingsnorm is gebaseerd op het voorkomen/minimaliseren van zandlevering (Buik, 2001; Fortuin, 1998).

2.1 Onttrekkingsnorm

Het debiet wat uit een put gehaald kan worden, wordt bepaald door de straal van het boorgat, de filterlengte en de snelheid op de boorgatwand:

$$Q = v_b * 2\pi r_b * H$$

$$Q = \text{debiet [m}^3/\text{d]}$$

$$v_b = \text{stroomsnelheid op de boorgatwand [m/d]}$$

$$r_b = \text{straal van het boorgat [m]}$$

$$H = \text{filterlengte [m]}$$

De NVOE onttrekkingsnorm geeft de toegestane snelheid op de boorgatwand welke gebaseerd is op een minimale zandlevering van de put:

$$v_b = 2 * k$$

$$k = \text{doorlatendheid [m/d]}$$

$$v_b = \text{stroomsnelheid op de boorgatwand [m/d]}$$

Deze norm is gebaseerd op de aanname dat er een lineair verband is tussen de stroomsnelheid en de doorlatendheid van de aquifer.

$$v = k * \frac{dh}{dx}$$

$$\frac{dh}{dx} = \text{hydraulische gradient [-]}$$

Deze maximale gradiënt is empirisch afgeleid op twee (Buik, 2001). Over het algemeen wordt de snelheid op de boorgatwand uitgedrukt in [m/h]. De ontwerpnorm wordt gegeven door:

$$v_b = \frac{k}{12}$$

k = doorlatendheid [m/d]

v_b = stroomsnelheid op de boorgatwand [m/h]

2.2 Infiltratienorm

De infiltratie norm is gebaseerd op de verstopping van de put door fijne deeltjes (Buik, 2001).

$$v = 1000 \left(\frac{k}{150} \right)^{0.6} * \sqrt{\frac{v_v}{2 * MFI_{mea} U_{eq}}}$$

v = ontwerpsnelheid [m/h]

k = doorlatendheid [m/d]

v_v = specifieke verstoppingsnelheid [m/j]

MFI_{mea} = gemeten MFI [s/l^2]

U_{eq} = aantal equivalente vollasturen per jaar [h]

MFI (membraan filter index) is de beste parameter die gemeten kan worden aan het water dat geïnfiltreerd wordt om de verstoppingsnelheid te voorspellen (Buik, 2001).

In zowel de onttrekkings- als de infiltratienorm is de doorlatendheid opgenomen. De doorlatendheid is een maat voor het gemak waarmee water door een bodem kan stromen. De doorlatendheid kan met behulp van de methode van Shepherd worden ingeschat op basis van de gemiddelde korrelgrootte:

$$k = 150 * (D50/1000)^{1.65}$$

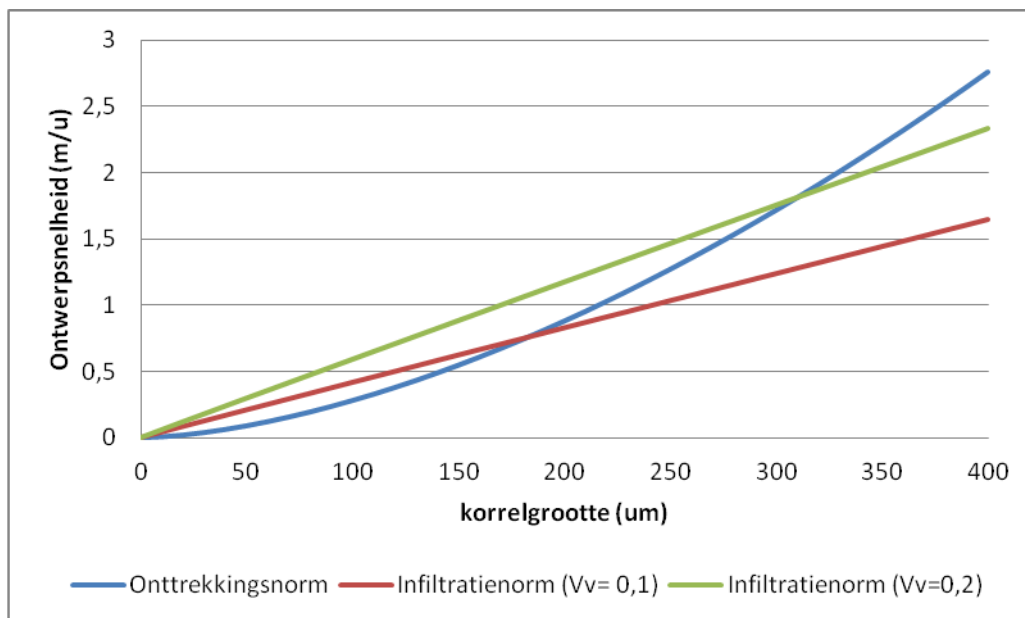
k = doorlatendheid [m/d]

$D50$ = gemiddelde korrelgrootte [μm]

In figuur 2.1, is een vergelijking gemaakt tussen de onttrekkingsnorm en de infiltratienorm door de ontwerpsnelheid uit te zetten tegen de gemiddelde korrelgrootte van het pakket. Hierbij zijn voor de infiltratienorm vaste waarden gekozen voor de verstoppingsnelheid, de MFI (2 s/l^2) en het aantal equivalente vollasturen (1.500 uur).

Tot een korrelgrootte van 180 μm is, bij een verstoppingsnelheid van 0,1 m/j, de onttrekkingsnorm maatgevend voor het ontwerp van de bron. Wanneer er een verstoppingsnelheid van 0,2 m/j wordt gekozen, zal de onttrekkingsnorm maatgevend zijn tot een korrelgrootte van 320 μm . In de infiltratienorm is niet alleen de doorlatendheid van belang, maar zijn de vollasturen en de verstoppingsnelheid extra parameters die kunnen variëren.

Bij een hogere verstoppingsnelheid blijft de onttrekkingsnorm tot grovere zanden de maatgevende ontwerpnorm. Bij meer vollasturen zal de infiltratienorm al bij kleinere korrelgroottes maatgevend zijn.



Figuur 2.1 de ontwerpnelheid voor de onttrekkingsnorm en infiltratienorm bij verschillende korrelgroottes.

Dit onderzoek is gericht op ontwerpnormen voor hogetemperatuuropslag in fijnzandige aquifers. Voor deze pakketten zal de onttrekkingsnorm meestal maatgevend zijn. Dit rapport richt zich daarom voornamelijk op de onttrekkingsnorm en het minimaliseren van zandtransport.

2.3 Richtlijnen voor de huidige NVOE norm

In het document NVOE-richtlijnen voor Ondergrondse Energieopslag (2006), worden de richtlijnen genoemd voor het ontwerp en realisatie van pompputten.

De snelheid op de boorgatwand

De snelheid op de boorgatwand wordt bepaald door de gemiddelde doorlatendheid (k-waarde). De gemiddelde doorlatendheid wordt bepaald over de gehele diepte waarin het filter wordt geplaatst. De bepaling van de snelheid op de boorgatwand wordt gegeven door een lineaire relatie met de doorlatendheid. De norm geldt voor elke k-waarde; door de lineaire relatie bestaat er geen bovengrens aan de maximale snelheid.

Minimale korrelgrootte

De NVOE norm geldt dus voor elke doorlatendheid. De doorlatendheid wordt bepaald door de gemiddelde korrelgrootte van het pakket. In principe geldt de norm dan ook voor elke korrelgrootte. Bij voorkeur wordt een filter alleen geplaatst in de grovere lagen van de aquifer. In het ontwerp wordt echter een minimale korrelgrootte van $\geq 160 \mu\text{m}$ gehanteerd. Deze minimale korrelgrootte heeft ook betrekking op de keuze van zandomstorting en de filterspleet van de bron.

3 De doorlatendheid

De toegestane snelheid op de boorgatwand wordt bepaald aan de hand van de gemiddelde doorlatendheid van het pakket. Ook de infiltratienorm wordt voor een grote mate bepaald door de doorlatendheid. Eén van de methoden om de doorlatendheid in te schatten is de methode van Shepherd. Deze methode wordt veelal gebruikt als betere informatie (zoals pomp- of capaciteitsproeven) ontbreekt. De doorlatendheid wordt met de methode van Shepherd ingeschat op basis van de gemiddelde korrelgrootte (D50). Hierdoor is Shepherd erg praktisch in het gebruik; er is enkel de D50 nodig en deze kan eenvoudig worden vastgesteld.

Echter de doorlatendheid is niet alleen afhankelijk van de korrelgrootte, maar ook van de eigenschappen van de aquifer en van het water dat door deze aquifer stroomt. De doorstroomeigenschappen van de aquifer worden uitgedrukt in de intrinsieke permeabiliteit, K_i . De doorlatendheid wordt als volgt berekend:

$$k = \frac{\rho_w \cdot g}{\mu} \cdot K_i$$

k = doorlatendheid [m/s]

ρ_w = dichtheid van water [kg/m³]

g = valversnelling [m/s²]

μ = dynamische viscositeit [[Pa · s]

K_i = intrinsieke permeabiliteit [m²]

De doorlatendheid is dus ook afhankelijk van de dichtheid en viscositeit, die op hun beurt afhankelijk zijn van de temperatuur van het water, de druk en het zoutgehalte. Voor "standaard" energieopslagsystemen is de invloed van deze parameters op de doorlatendheid beperkt. Wanneer gebruik gemaakt wordt van hogetemperatuuropslag is het van belang om dit aspect mee te nemen in de bepaling van de doorlatendheid.

3.1 Viscositeit

De viscositeit van water is sterk afhankelijk van de temperatuur, minder sterk afhankelijk van de saliniteit en bijna verwaarloosbaar afhankelijk van de druk (Adams en Bachu, 2002). Het effect van temperatuur op de viscositeit kan worden beschreven met een Arrhenius-type relatie:

$$\mu = A e^{\left[\frac{E_a}{RT}\right]}$$

Hierin is E_a de activatie energie (J/mol); R de gasconstante (J/mol/K) en T de temperatuur (K). Naast dit verband zijn de waarden van viscositeit van water ook uitvoerig experimenteel bepaald. Deze waarden zijn vele malen nauwkeuriger.

Mercer (1975) leidde hieruit de volgende vergelijking af.

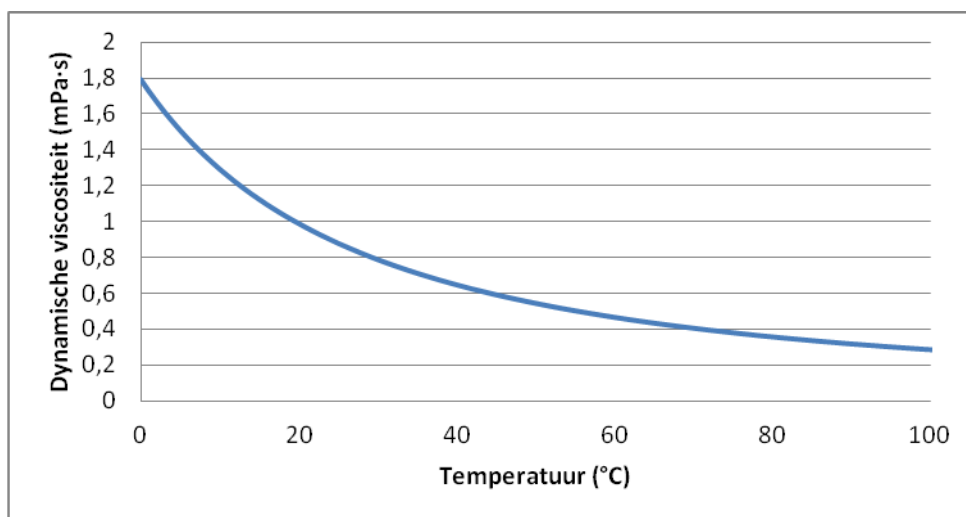
$$\mu = \frac{1}{[(5.38 + 3.80A - 0.26A^2)10^3]}$$

$$A = 0.01(T - 150)$$

μ = dynamische viscositeit [Pa · s]

T = temperatuur [°C]

Wanneer de concentratie van water kleiner is dan 50.000 mg/L, en de druk kleiner is dan 20 MPa kan de viscositeit nauwkeurig worden bepaald met de vergelijking van Mercer (Adams en Bachu, 2002). Figuur 3.1 geeft weer hoe viscositeit verandert met temperatuur. Bij water van 90°C is de viscositeit 70% lager dan voor water bij 20°C.



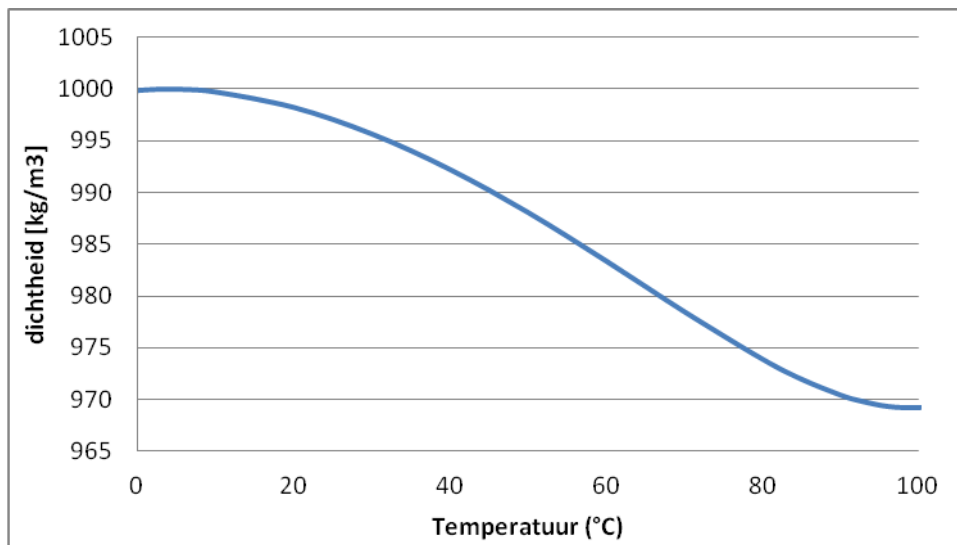
Figuur 3.1 Dynamische viscositeit uitgezet tegen de temperatuur. De viscositeit is berekend met de vergelijking van Mercer (1975).

3.2 Dichtheid van water

De dichtheid van het water is afhankelijk van de temperatuur, druk en de concentratie van opgeloste stoffen. Een benadering van de dichtheid als functie van de temperatuur wordt gegeven door Gill (1982):

$$\rho_w = 999,842594 + 6,793952 \cdot 10^{-2} \cdot T - 9,09529 \cdot 10^{-3} \cdot T^2 + 1,001685 \cdot 10^{-4} \cdot T^3 - 1,120083 \cdot 10^{-6} \cdot T^4 + 6,536332 \cdot 10^{-9} \cdot T^5$$

Het effect van de temperatuur op dichtheid is weergegeven in figuur 3.2. Water van 90°C, heeft een 3% lagere dichtheid dan water van 20 °C.



Figuur 3.2 Dichtheid van water uitgezet tegen de temperatuur. De dichtheid is berekend met de vergelijking van Gill (1982)

Compressibiliteit

De dichtheid van water kan ook veranderen naarmate de druk toeneemt. De mate van verandering van de dichtheid met druk wordt gegeven door de compressibiliteit van water:

$$d\rho_w = \rho_w \beta_f dP$$

$$\beta_f = \text{compressibiliteit van water [m}^2/\text{N]}$$

$$\beta_f = 4.7 \times 10^{-10} \text{ [m}^2/\text{N]}$$

$$P = \text{druk [N/m}^2\text{]}$$

$$\rho_w = \text{dichtheid van water [kg/m}^3\text{]}$$

Op een diepte van 500 meter, heeft het water een dichtheid van 1002.3 kg/m^3 , een verschil van 0,2 %. Voor de ontwerpnorm is de invloed van de druk op de dichtheid en de viscositeit verwaarloosbaar klein. Het is de viscositeit die sterk afneemt bij hogere temperaturen. Het temperatureffect is daarmee een belangrijk aspect dat meegenomen zou moeten worden in de ontwerpnorm.

4 Intrinsieke permeabiliteit

Naast de eigenschappen van het water wat door de aquifer stroomt, wordt de doorlatendheid bepaald door de doorstroomeigenschappen van de aquifer. De intrinsieke permeabiliteit is een van de belangrijkste, maar ook meest variabele parameter in de geohydrologie. Het is dan ook belangrijk om de doorlatendheid vooraf goed in te schatten. De meest nauwkeurigste methode is het uitvoeren en interpreteren van een pompproef, maar dat is pas mogelijk na het realiseren van de put. Om toch een inschatting te kunnen maken, zijn er voor de bepaling van de doorlatendheid formules opgesteld die de permeabiliteit correleren aan de poriediameter, de korrelgrootte en de mate van sortering (Kasenow, 2002).

4.1 Intrinsieke permeabiliteit

De intrinsieke permeabiliteit is een functie van de vorm en de diameter van de poriën in het poreuze medium. Een vergelijking om de intrinsieke permeabiliteit te bepalen is de Kozeny-Carman vergelijking (1939). De vergelijking is oorspronkelijk opgesteld door Kozeny (1927) en aangepast door Carman (1939). De Kozeny-Carman vergelijking is een van de meest geaccepteerde en gebruikte vergelijking voor het bepalen van de permeabiliteit (Carrier, 2003).

$$K_i = \left(\frac{n^3}{(1-n)^2} \right) \left(\frac{(D_{50})^2}{180} \right) \cdot 10^{-12}$$

K_i = intrinsieke permeabiliteit [m^2]

n = porositeit [-]

D_{50} = gemiddelde korrelgrootte [μm]

In de Kozeny-Carman vergelijking wordt er naast de gemiddelde korrelgrootte ook de porositeit van het zand meegenomen om de intrinsieke permeabiliteit te bepalen; de gemiddelde porositeit in slecht gesorteerde zanden is kleiner dan in goed gesorteerde zanden met eenzelfde D_{50} (Fitts, 2002). Ook neemt de porositeit af met de diepte, wat het gevolg is van de samendrukking onder invloed van de massa van de bovenliggende lagen.

Voor het opstellen van een ontwerpnorm voor hogetemperatuuropslag is het van belang om het temperatuureffect in de bepaling van de doorlatendheid mee te nemen. Omdat een viscositeitsterm niet voorkomt in de formule van Shepherd zal de doorlatendheid op een andere manier bepaald moeten worden. Twee goede opties zijn:

- Shepherd's bepaling voor de doorlatendheid omrekenen naar intrinsieke permeabiliteit.
- Overstappen naar de Kozeny-Carman vergelijking.

Shepherd: Doorlatendheid omrekenen naar permeabiliteit

Shepherd's vergelijking bepaalt de doorlatendheid op basis van één bodemeigenschap (D50) en laat de eigenschappen van het water dat door de aquifer stroomt buiten beschouwing. Omdat de gemiddelde korrelgrootte een bodemeigenschap is, zegt het in principe alleen iets over de intrinsieke permeabiliteit. Echter, de eigenschappen van het water spelen wel degelijk een rol in de totstandkoming van een doorlatendheid. Het zou daarom correcter zijn om er van uit te gaan dat Shepherd een bepaling is van de intrinsieke permeabiliteit, onder de aanname dat het gaat om de stroming van water met een temperatuur van 12°C. De intrinsieke permeabiliteit is in dat geval:

$$K_i = k * \frac{\mu}{\rho_f * g}$$

k = doorlatendheid [m/s]

ρ_f = dichtheid van water [kg/m³]

g = valversnelling [m/s²]

μ = dynamische viscositeit [[Pa · s]

K_i = intrinsieke permeabiliteit [m²]

Shepherd (omgerekend naar een doorlatendheid in m/s:

$$k = \frac{1}{576} * (D50/1000)^{1,65}$$

k = doorlatendheid [m/s]

$D50$ = gemiddelde korrelgrootte[um]

$$K_i = \frac{1}{576} * (D50/1000)^{1,65} * \frac{\mu}{\rho_f * g}$$

Bij 12°C: is $(\frac{\mu}{\rho_f * g})$ een constante waarde van: $1,24 \cdot 10^{-7}$ [m · s]

Dit leidt tot de relatie:

$$K_i = 2,16 * 10^{-10} * (D50/1000)^{1,65}$$

Nu Shepherd de intrinsieke permeabiliteit uitdrukt, kunnen temperatureffecten worden meegenomen in de bepaling van de doorlatendheid.

Kozeny-Carman

Met de Kozeny-Carman relatie kan de intrinsieke permeabiliteit direct uit de korrelgrootte worden berekend. Een methode om dit te berekenen is met behulp van de formule van Kozeny-Carman. In tegenstelling tot Shepherd, hangt de Kozeny-Carman vergelijking van meerdere factoren af dan enkel alleen de gemiddelde korrelgrootte. Ook kan in de Kozeny-Carman vergelijking het temperatureffect direct mee worden genomen.

Hieronder staan een mogelijke vorm van de formule van Kozeny-Carman weergegeven:

$$k = \left(\frac{\rho_f g}{\mu} \right) \left(\frac{n^3}{(1-n)^2} \right) \left(\frac{(D50)^2}{180} \right) \cdot 10^{-12}$$

k = doorlatendheid [m/s]

ρ_f = dichtheid van water [kg/m³]

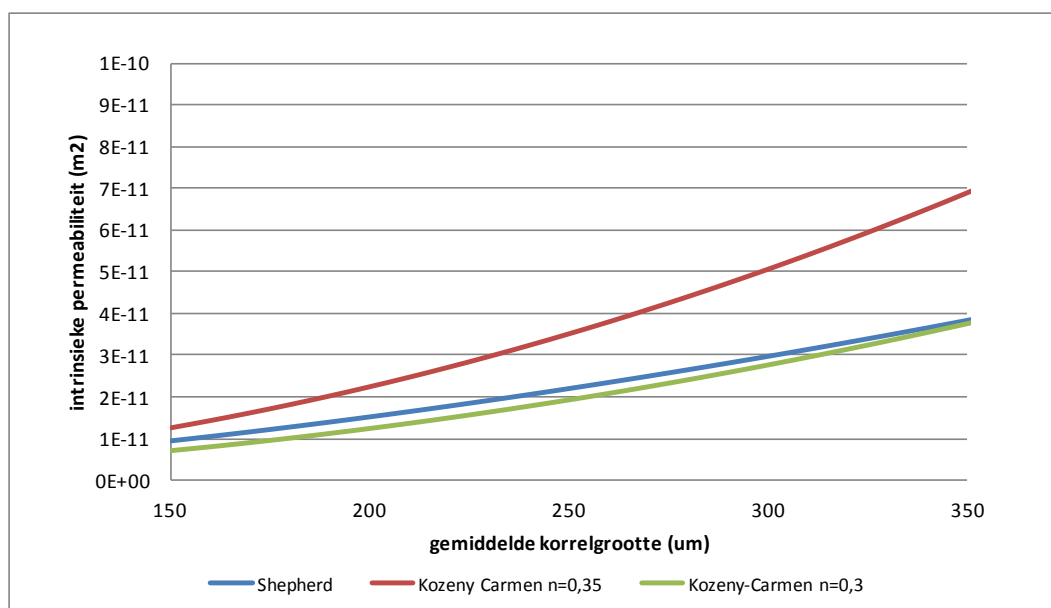
g = valversnelling [m/s²]

μ = dynamische viscositeit [[Pa · s]

n = porositeit [-]

$D50$ = gemiddelde korrelgrootte [um]

Figuur 4.1 geeft een vergelijking van de intrinsieke permeabiliteit bepaald met Shepherd en met Kozeny-Carman. De waarden van beide vergelijkingen zijn in dezelfde orde van grootte (10⁻¹¹). Shepherd's vergelijking bepaalt de permeabiliteit aan de hand van de gemiddelde korrelgrootte. De Kozeny-Carman bevat een extra parameter, de porositeit. De Kozeny-Carman vergelijking komt goed overeen met Shepherd wanneer er een porositeit van 0,3 wordt verondersteld. Bij een porositeit van 0,35 geeft Kozeny-Carman een permeabiliteit (en daarmee ook een doorlatendheid) die 1,85 keer zo groot is.



Figuur 4.1 Intrinsieke permeabiliteit bepaald met Shepherd en Kozeny-Carman

4.2 Porositeit

Een verandering van de porositeit heeft invloed op de intrinsieke permeabiliteit. De eigenschappen en processen die de porositeit bepalen worden in de volgende paragrafen besproken. De porositeit wordt gegeven door:

$$n = \frac{V_v}{V_t}$$

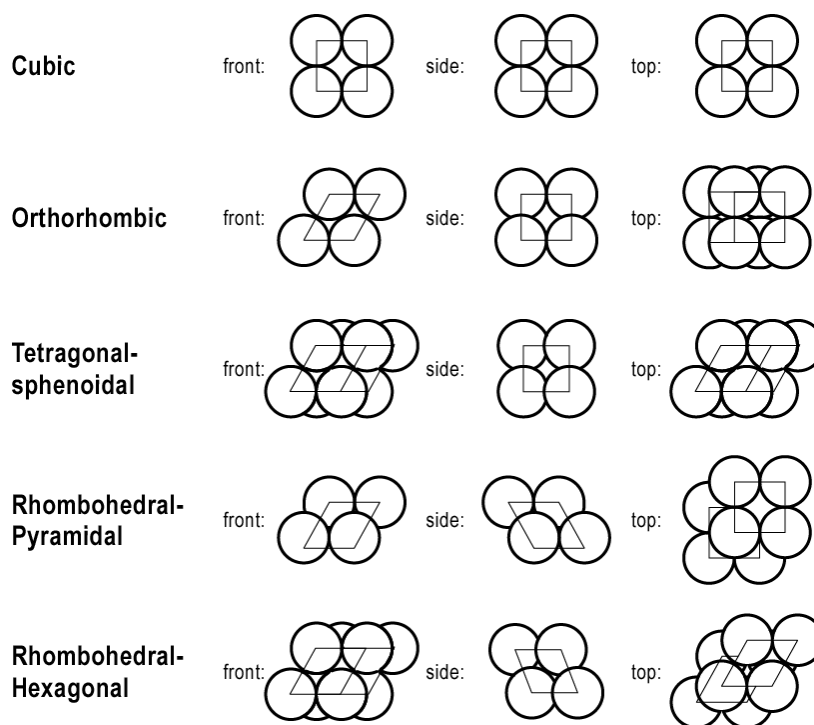
V_v = volume van holtes

V_t = totale volume

De porositeit wordt ook vaak uitgedrukt in percentages. In ongeconsolideerde materialen wordt porositeit voornamelijk bepaald door drie eigenschappen van het medium; korrelstapeling, korrelvorm en de korrelgrootteverdeling.

Korrelstapeling

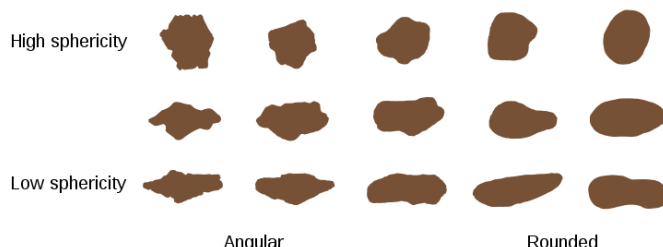
De meest eenvoudige korrelstapeling is van een zand dat enkel bestaat uit bollen van dezelfde grootte. Voor een systeem met een geordende stapeling kan de porositeit wiskundig worden afgeleid. De porositeit is afhankelijk van de stapelingsrangschikking. Het rangschikken van de bollen in een kubieke configuratie (elke bol raakt vier andere bollen) levert een porositeit van 0.48. Rhombohederale stapeling (elke bol raakt acht andere bollen) resulteert in een porositeit van 0.26. De initiële porositeit van uniforme zanden is onafhankelijk van de korrelgrootte. Wiskundig gezien heeft een bodem van uniforme korrels een porositeit tussen de 0.26 en 0.48. Een systeem heeft de neiging om naar een orthorhombische staat te gaan; dit is een stabielere vorm. Orthorhombische stapeling heeft een porositeit van 0.34. Figuur 4.2 geeft de verschillende soorten stapeling weer.



Figuur 4.2 De vijf fundamentele stapelingen van bollen; de opbouw is weergegeven met het kleinste mogelijke aantal bollen. De rechthoekige en ruitvormige vormen geven de eenheidscel weer voor elke stapeling, (Cumberland en Crawford, 1987).

Korrelvorm

Deeltjes met een onregelmatigere vorm hebben grotere tussenuimtes wat kan leiden tot een hogere porositeit.



Figuur 4.3 Sfericiteit van korrels

Tabel 4.1 geeft weer hoe de porositeit toeneemt bij een kleinere sfericiteit. Het effect van losse stapeling en dichte stapeling wordt kleiner naarmate de sfericiteit afneemt.

Tabel 4.1 Porositeit van willekeurige stapeling met uniforme korrelgrootte (Yang, 2003)

sfericiteit	porositeit	
	losse stapeling	dichte stapeling
1,00	0,41	0,32
0,80	0,49	0,40
0,60	0,58	0,51
0,40	0,72	0,67

Korrelgrootteverdeling

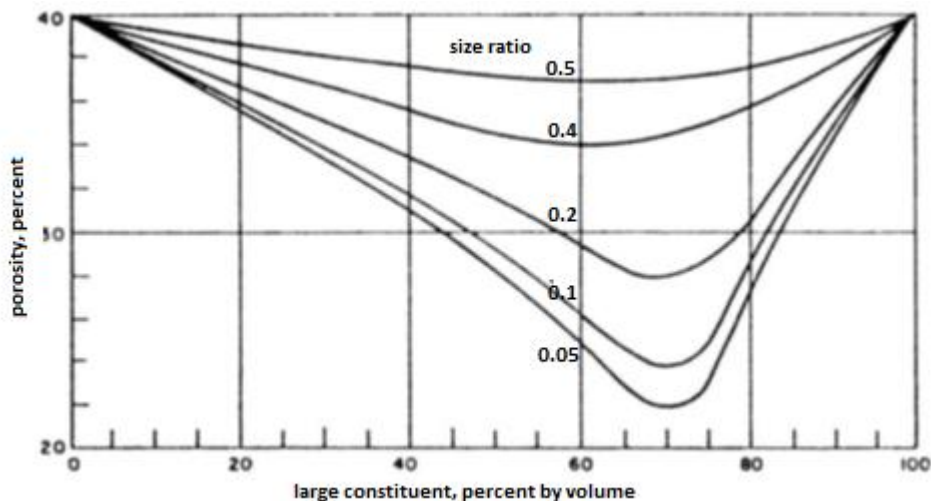
Porositeit is niet alleen afhankelijk van de korrelgrootte en de vorm, maar hangt ook sterk af van de korrelgrootteverdeling. Een bodem bestaat nooit uit korrels met maar één enkele korrelgrootte. Een systeem bestaande uit bollen van verschillende groottes zal altijd een lagere porositeit hebben dan een systeem met bollen van maar één grootte. Deze waarneming is goed verklaard door Fraser (1935). Als een relatief grote bol wordt geïntroduceerd in een verzameling van kleine bollen, dan zal de porositeit op twee manieren worden beïnvloed. De grote bol neemt de volledige ruimte in van het vaste materiaal, welke anders zou worden gevuld met kleinere bollen en de poriën tussen hen; hierdoor zal de porositeit van het systeem afnemen. Ook verstoort het de stapeling van de kleinere bollen wat resulteert in een lossere stapeling van de kleinere bollen in de nabijheid van de grote bol, waardoor de porositeit van het systeem toeneemt.

Het negatieve effect op de porositeit van het eerste fenomeen wordt groter naar mate de grootteverhouding toeneemt, terwijl het positieve effect van het tweede fenomeen juist afneemt bij grotere ratio's. Wanneer het aantal grote bollen toeneemt, dan zal de porositeit gelijkmatig afnemen zolang het aantal kleine bollen groot genoeg is om de grote bollen van elkaar gescheiden te houden.

Als de diameter van de kleine bollen, kleiner is dan de gemiddelde poriegrootte van de grote bollen, zullen de grote bollen steeds meer de structuur bepalen. Als de grote bollen zelfdragend worden en de structuur onafhankelijk is van de kleine bollen, dan zullen de kleine bollen alleen de porieruimtes innemen.

De mate van 'vullen' van de porieruimte zal dan weer afnemen bij een toename van de grote bollen; de porositeit neemt toe (Fraser, 1935).

Omgekeerd, als kleine bollen worden ingevoerd in een stapeling van grote bollen, dan kan dezelfde redenering worden toegepast. Dit effect is goed weergegeven in figuur 4.4.



Figuur 4.4 Porositeit van een sediment met korrels met twee verschillende korrelgroottes (Furnas, 1929).

Ondanks dat dit proces wordt beschreven voor een systeem bestaande uit maar twee verschillende korrelgroottes gaat dezelfde redenering ook op voor sedimenten met een grote spreiding van korrelgroottes. Dat de porositeit zal afnemen wanneer de sortering slechter wordt kan wel verklaard worden; echter een algemene aanvaardbare kwantitatieve vergelijking is nooit afgeleid (Alberts, 2005).

4.3 Porositeitsafname

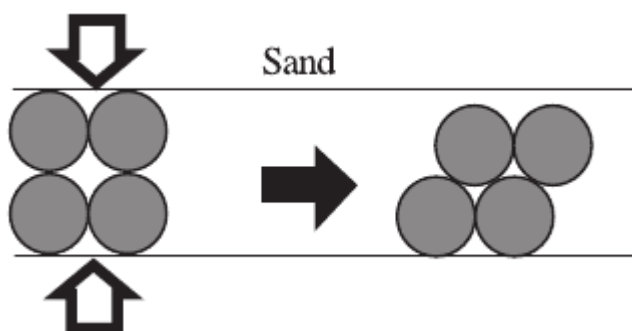
Bodemverdichting is de afname van het totaal volume van het sediment. Het totaal volume omvat het volume van de lege ruimte (V_v) en het volume van het vaste materiaal (V_s).

$$V_t = V_v + V_s$$

De porositeit neemt af met bodemverdichting. Verdichting kan optreden als gevolg van een verticale overbelasting en/of als gevolg van tektonische spanningen (lateraal). Verdichting wordt voornamelijk gezien als een toename in dichtheid met diepte door overbelasting (Alberts, 2005). Verdichting is moeilijk in situ waar te nemen, aangezien de diagenetische processen ongemerkt traag zijn en de meeste processen alleen plaatsvinden op grotere diepte. De processen die betrokken zijn bij verdichting zijn korrelherschikking, korrelvervorming en het oplossen van de korrels door druk.

Korrel herschikking

Korrel herschikking wordt vaak beschreven als het opnieuw rangschikken van korrels in een passend en dichter systeem. Direct na afzetting begint het systeem als een losse rangschikking van korrels. In ongeconsolideerde zanden is de cohesie van korrels laag. De herschikking ontstaat door rotatie en schuiven van de korrels, waardoor de positie en de oriëntatie veranderen. De bodemkorrels herschikken zich in een stabielere en dichtere configuratie, wat resulteert in een volumeafname. In welke mate herschikking en verdichting plaats vindt hangt af van de structuur van de bodem (Holtz en Covacs, 1982).



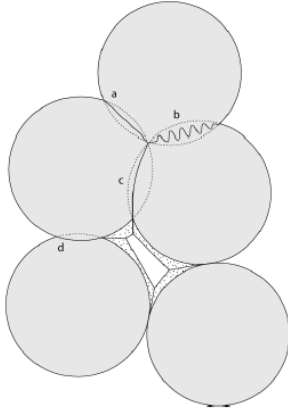
Figuur 4.5 Korrelherschikking door druk

Korrel vervorming

Of korrelvervorming plaats vindt hangt af van de kenmerken van het materiaal. Kwarts vervormt niet snel; de porositeit afname door korrelvervorming speelt voor kwarts dus geen significante rol. Als het percentage van vervormbare korrels toeneemt, speelt dit proces een belangrijk component in porositeitsafname door verdichting (Alberts, 2005).

Oplossing

Het proces van oplossing door druk kan op twee manieren leiden tot porositeitsafname. Oplossing van kwarts bij de contacten tussen de korrels zorgt ervoor dat de korrels dicht bij elkaar kunnen komen. Daarnaast kan ook het neerslaan van het opgeloste materiaal leiden tot afname van de porieruimte. Een kleinere gemiddelde korrelgrootte resulteert eerder in de oplossing van kwarts (Houseknecht, 1984). In figuur 4.6 is de porositeitsafname ten gevolge van oplossing door druk schematisch weergegeven. Hierin is kwartsceement aangegeven met de gestippelde gebieden. De gestippelde lijnen geven de oorspronkelijke korrelgrenzen weer. (a) geeft het contact met gelijke oplossing van beide korrels weer, (b) het contact met gelijke oplossing langs aangrenzend vlak, (c) het contact met ongelijke oplossing van twee korrels en (d) het contact van oplossing van maar één korrel (Houseknecht, 1984).



Figuur 4.6 Schematische weergave van porositeitsafname ten gevolge van oplossing door druk. (Houseknecht, 1984).

Porositeitsafname vergelijking

Een reeks van vergelijkingen zijn afgeleid op basis van porositeit–diepte curves. De meeste eenvoudige vergelijking is van lineaire aard:

$$n = n_0 + az$$

n_0 = gemiddelde porositeit aan de oppervlakte

a = constante

z = diepte

Het gebruik van deze vergelijking is beperkt tot geringe diepte, omdat dit kan leiden tot een negatieve porositeit op grotere diepten. Een veelgebruikte relatie om de porositeit op diepte te voorspellen is van exponentiële vorm. Deze is gegeven door Athy (1930):

$$n = n_0 e^{-bz}$$

b = constante

Veel vergelijkingen voor porositeitsafname met diepte worden steeds uitgebreider en gecompliceerder. Alle verschillende factoren die invloed kunnen hebben worden meegenomen. Deze zijn in de praktijk lastig om te gebruiken. De exponentiële vergelijking van Athy (1930) neemt niet elk detail mee in het porositeit–diepte profiel, maar geeft een goede algemene trend.

4.4 Porositeit en permeabiliteit

Over het algemeen kan gesteld worden dat aquifers met een hogere porositeit ook een hogere doorlatendheid hebben. Er is meer open ruimte voor de stroming van het water, maar ook deze relatie is niet eenduidig. Omdat permeabiliteit een functie is van de poriegrootte, is de poriediameter van belang.

Poriën met een kleine diameter hebben een veel grotere weerstand dan poriën met een grotere diameter. Hierdoor heeft een bodemlaag met een hoge porositeit niet altijd een hogere permeabiliteit.

Klei is een goed voorbeeld hiervan. Klei heeft een zeer lage doorlatendheid (als gevolg van de kleine poriediameter), maar heeft vaak ook een zeer hoge porositeit (als gevolg van de gestructureerde aard van de kleimineralen). De Kozeny-Carman vergelijking kan niet gebruikt worden voor de bepaling van de doorlatendheid van klei (Carrier, 2003).

Wanneer een bodem samendrukking ondergaat zal de porositeit-permeabiliteit relatie wel opgaan; door samendrukking neemt de gemiddelde poriediameter af. De afname in porositeit kan met de Kozeny-Carman vergelijking worden meegenomen in de doorlatendheid van de aquifer.

$$k = \left(\frac{\rho_w g}{\mu} \right) \left(\frac{n^3}{(1-n)^2} \right) \left(\frac{(D50)^2}{180} \right) \cdot 10^{-12}$$

5 Korrelgrootteverdeling

Zoals eerder genoemd, heeft de sortering invloed op de porositeit. Het heeft daarmee indirect een effect op de toegestane snelheid op de boorgatwand. De sortering van het zand heeft daarnaast ook een directe invloed op de mate van zandtransport in een poreus medium. Een nadere uitwerking van processen en theorieën die een rol spelen bij zandtransport zijn in het kort beschreven in bijlage 1.

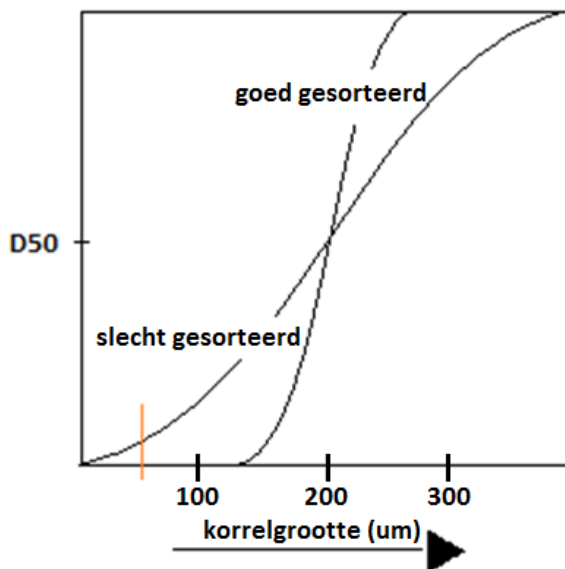
Er bestaan meerdere vergelijkingen om de gemiddelde poriediameter te bepalen aan de hand van de korrelgrootte, waaronder:

$$d_p = \frac{1}{6} * D50 \text{ (Holtz en Kovacs, 1982)}$$

$$d_p = \text{gemiddelde poriediameter [um]}$$

$$D50 = \text{gemiddelde korrelgrootte[um]}$$

Theoretisch gezien is zandtransport door een volledig homogeen zand niet mogelijk. Immers, geen van de korrels heeft een diameter die door de poriën past. Vanuit dit perspectief gezien is de korrelgrootteverdeling van een aquifer een erg belangrijke factor voor zandtransport. Figuur 5.1 laat zien hoe bij twee soorten zand, beide met een gemiddelde korrelgrootte van 200 µm, het slecht gesorteerde zand meer korrels bevat die door de gemiddelde poriegrootte passen. De kans op zandtransport door een poreus medium zal groter zijn bij slecht gesorteerd zand.



Figuur 5.1 Schematische weergave van twee korrelgrootteverdelingen. De rode lijn komt overeen met de gemiddelde poriegrootte op basis van $\frac{1}{6} * D50$.

De mate van sortering van een bodem kan uitgedrukt worden in de standaard deviatie en scheefheid (asymmetrie) van een bodem. Sortering kan uitgedrukt worden in de spreiding van de verdeling. De standaard deviatie kan worden berekend door:

$$S_{std} = \sqrt{\sum_{i=1}^n w_i \phi_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n w_i \phi_i\right)^2}$$

$$\phi_i = {}^2\log(D_0/D)$$

D_0 = referentie diameter [1 mm]

D = diameter van de korrel [mm]

w_i = gewichtsfractie van de korrels met korrelgrootte i .

Tabel 5.1 Standaard deviatie en sorteringsklasse van verschillende afzettingen

Standaard deviatie	Sorteringsklasse	Milieu
< 0.35	zeer goed gesorteerd	Kustduinen
0.35 – 0.50	Goed gesorteerd	Stranden, landinwaartse duinen
0.50 – 0.80	Matig goed gesorteerd	Landinwaartse duinen, rivieren
0.80 – 1.40	Matig gesorteerd	Glaciale en fluviale afzettingen
1.40 – 2.00	Slecht gesorteerd	Glaciale en fluviale afzettingen
2.00 – 2.60	zeer slecht gesorteerd	Glaciale en fluviale afzettingen
> 2.60	Extreem slecht gesorteerd	Glaciale afzettingen

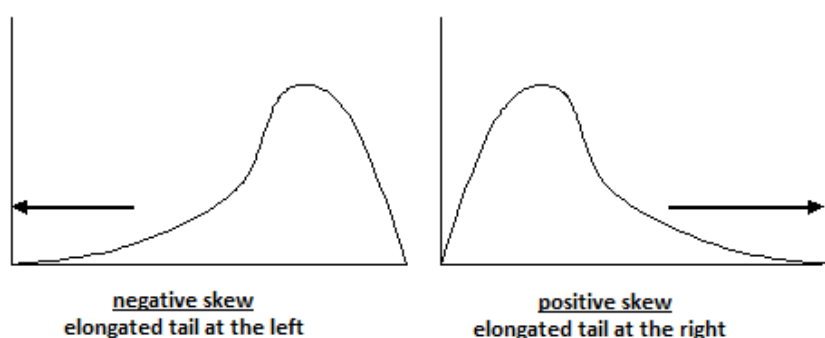
De scheefheid geeft de mate van asymmetrie van een verdeling weer. Voor een negatieve scheefheid betekent dit dat de staart aan de linkerkant van de waarschijnlijkheids dichtheidsfunctie langer is dan aan de rechterkant.

Voor een negatieve scheefheid betekent dit dat er een relatief groter volume aan kleine korrels aanwezig is. De scheefheid is een afleiding van de derde orde van de korrelgrootteverdeling:

$$Sk = \sum_{i=1}^n w_i \left(\frac{\phi_i - \overline{\phi}}{S_{std}} \right)^3$$

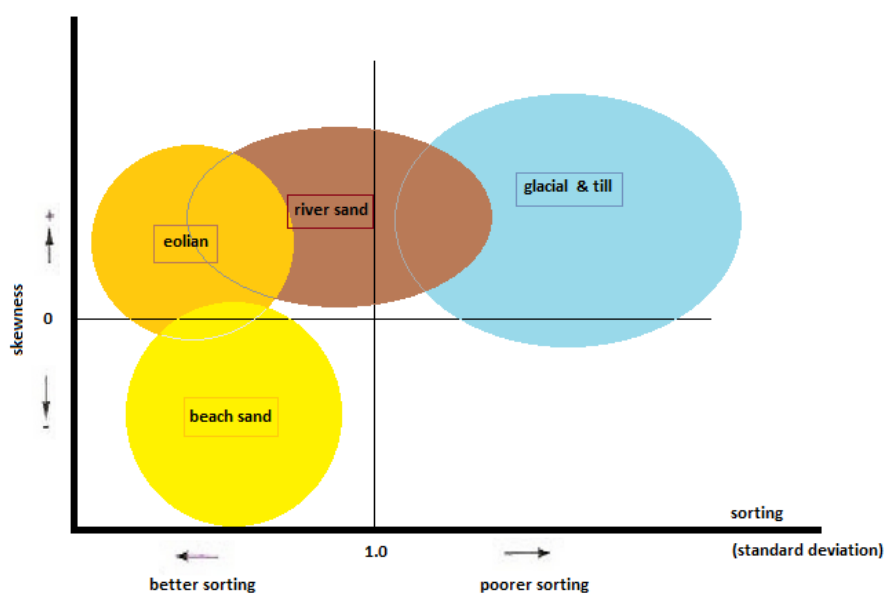
$\overline{\phi}$ = gemiddelde korrelgrootte

Een negatieve scheefheid van een sediment kan leiden tot een relatief nog groter volume aan deeltjes dat de poriën kan passeren.



Figuur 5.2 Schematische weergave van scheefheid.

Om de sortering van een sediment te bepalen is een zeefanalyse nodig. Wanneer een onttrekkingsnorm wordt bepaald is meestal slechts de D50 bekend. In Nederland is wel veel bekend over de geologie en geschiedenis van de bodems. De eigenschappen van het sediment zouden op deze manier een indicatie kunnen zijn voor de gevoeligheid van een formatie voor zandtransport.



Figuur 5.3 Scheefheid en sortering van verschillende afzettingen (Bjørlykke, 2010).

Tabel 5.2 Scheefheid en sortering van verschillende afzettingen

afzetting	scheefheid	sortering
Eolisch	Positief	Zeer goed gesorteerd
Strand	Negatief	Goed gesorteerd
Fluviatiel	Positief	Slecht gesorteerd
Glaciaal	Positief	Zeer slecht gesorteerd

Eolisch afgezet zand is het best gesorteerd. Formaties bestaande uit eolische afzettingen zouden hiermee minder gevoelig zijn voor zandtransport dan fluviale of glaciële afzettingen.

De mate van sortering is van invloed op zandtransport maar het is lastig om dit mee te nemen in een ontwerpnorm. Wanneer er een verband kan worden gelegd tussen sortering en porositeit zou dit wel mee genomen kunnen worden.

6 Aanpassing ontwerpnormen

Voor hogetemperatuuropslag is het belangrijk om het effect van de temperatuur op de dichtheid en de viscositeit van het water mee te nemen in de doorlatendheid. Het temperatuur effect kan op een eenvoudige wijze worden meegenomen in de ontwerpnorm.

Huidige onttrekkingsnorm:

$$v_b = 2 * k$$

v_b = stroomsnelheid op de boorgatwand [m/d]

k = doorlatendheid [m/d]

Berekening van een temperatuurafhankelijke doorlatendheid:

$$k = \left(\frac{\rho_f g}{\mu} \right) \cdot K_i$$

k = doorlatendheid [m/s]

K_i = intrinsieke permeabiliteit [m²]

ρ_f = dichtheid [kg/m³]

g = valversnelling [m/s²]

μ = dynamische viscositeit [kg/ms]

Indien de temperatuur meegenomen wordt, gaat de onttrekkingsnorm er als volgt uit zien:

$$v_b = 7200 * \frac{\rho_f \cdot g}{\mu} \cdot K_i$$

v_b = stroomsnelheid op de boorgatwand [m/h]

Deze studie heeft zich voornamelijk gericht op de onttrekkingsnorm en daarmee op zandtransport en de doorlatendheid van de bodem. Echter, de invloed van de temperatuur op de doorlatendheid geldt evenzeer voor de infiltratienorm.

$$v = 1000 \left(576 * \frac{\rho_f \cdot g}{\mu} \cdot K_i \right)^{0.6} * \sqrt{\frac{v_v}{2 * MFI_{mea} U_{eq}}}$$

v = ontwerpnelheid [m/h]

K_i = intrinsieke permeabiliteit [m²]

ρ_f = dichtheid [kg/m³]

g = valversnelling [m/s²]

μ = dynamische viscositeit [kg/ms]

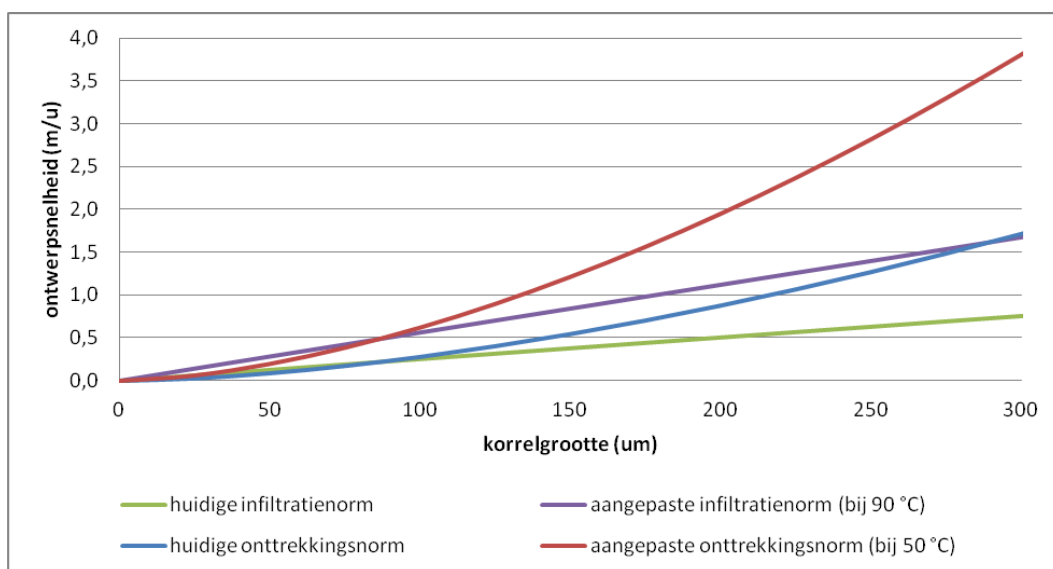
v_v = specifieke verstoppingssnelheid [m/j]

MFI_{mea} = gemeten MFI [s/l²]

U_{eq} = aantal equivalente vollasturen per jaar [u]

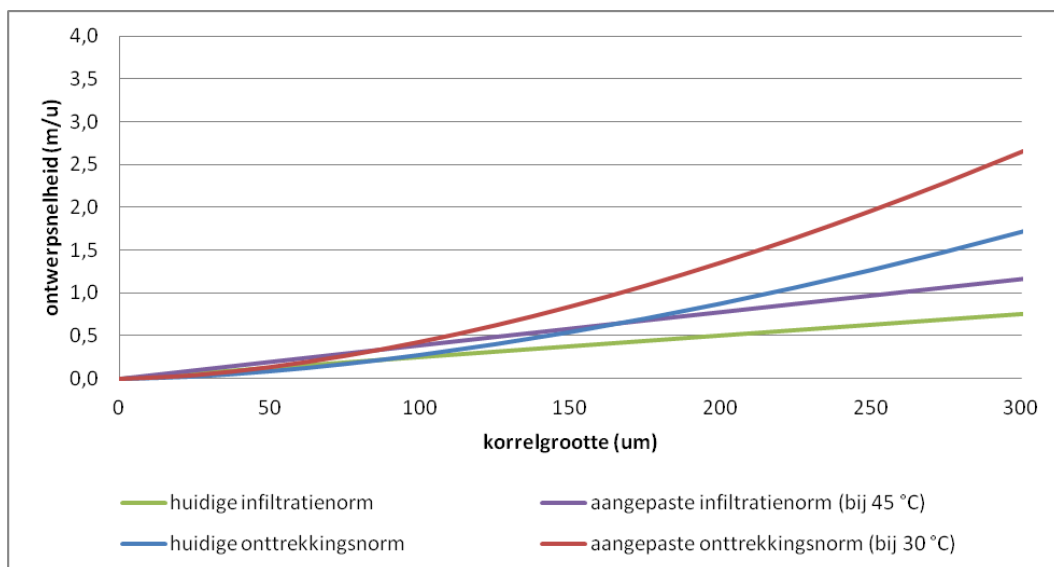
Voor hogetemperatuuropslag is het meenemen van de viscositeit in de doorlatendheid van groot belang. Zowel voor de ontwerpnorm als de infiltratienorm zal de ontwerpsnelheid hoger zijn bij een hogere temperatuur. Doordat in de infiltratienorm ($1/\mu$) tot de macht 0,6 wordt verheven en in de ontwerpnorm niet, gaat de verandering van de ontwerpsnelheid met temperatuur in beide normen niet gelijk op.

In figuur 6.1 is de huidige onttrekkings- en infiltratienorm vergeleken met de aangepaste normen. De weergegeven norm is gebaseerd op de warme bron van de case in Gorinchem. Hierin bedraagt de onttrekkingstemperatuur uit de warme bron 50°C en de infiltratietemperatuur 90°C. Uit de vergelijking blijkt dat door het integreren van de temperatuur in de ontwerpnormen in deze case de ontwerpsnelheid ruim twee keer zo groot mag zijn in vergelijking met de huidige ontwerpnormen.



Figuur 6.1 Vergelijking tussen de huidige ontwerpnormen en de aangepaste ontwerpnormen voor de case Gorinchem voor de warme bron.

In figuur 6.2 is de huidige onttrekkings- en infiltratienorm vergeleken met de aangepaste normen voor de koude bron van de case in Gorinchem. Hierin bedraagt de onttrekkingstemperatuur uit de koude bron 30°C en de infiltratietemperatuur 45°C. Voor de koude bron geldt dat de ontwerpsnelheid ruim 1,5 keer zo groot kan zijn in vergelijking met de huidige ontwerpnormen



Figuur 6.2 Vergelijking tussen de huidige ontwerpnormen en de aangepaste ontwerpnormen voor de case Gorinchem voor de koude bron.

Voor de ontwerpnormen voor “standaard” KWO-systemen wordt de verandering van viscositeit met temperatuur niet meegenomen in de bepaling van de doorlatendheid. Voor zowel de koude bron (infiltratietemperatuur van gemiddeld circa 7°C en een onttrekkings-temperatuur van gemiddeld circa 9°C) als voor de warme bron (infiltratietemperatuur van gemiddeld circa 18°C en een onttrekkingstemperatuur van gemiddeld circa 15°C) zal de ontwerpsnelheid tot 10% afwijken van de huidige norm wanneer het effect van de temperatuur wordt meegenomen. Het is daarom voor KWO-systemen van minder belang om de temperatuur mee te nemen in de bepaling van de doorlatendheid.

7 Praktijkervaringen

7.1 Hogetemperatuuropslag

Universiteit Utrecht

Bij de Universiteit van Utrecht is een hogetemperatuuropslag gerealiseerd. Deze is in 1991 in bedrijf genomen en in 1999 buiten gebruik genomen. De bronfilters zijn in een fijne zandlaag (gemiddelde korrelgrootte circa 100 μm) geplaatst. De bronnen voldoen niet aan de huidige ontwerpnormen en overschrijden de maximaal toelaatbare snelheid op de boorgatwand met bijna een factor 4. Wanneer gebruik gemaakt wordt van de aangepaste ontwerpnorm, waarin de invloed van de temperatuur van het onttrokken grondwater wordt meegenomen, voldoen de bronnen nog steeds niet aan de norm (koude bron 125 % en warme bron 30% overschrijding van de norm). De warme bron is ernstig verstopt geraakt. De vermoedelijke oorzaak hiervan is kalkneerslag als gevolg van de waterbehandeling. Verstopping als gevolg van het overschrijden van de ontwerpnorm is echter niet uit te sluiten.

De Bruggen in Zwammerdam

De hogetemperatuuropslag van De Bruggen in Zwammerdam is van 1998 tot 2004 in gebruik geweest. De bronnen zijn gerealiseerd in een zandlaag met een gemiddelde korrelgrootte van circa 220 μm . De bronnen voldoen niet aan de huidige ontwerpnorm. Wanneer wordt gecorrigeerd voor de onttrekkingstemperatuur voldoen de bronnen wel aan de norm. Het systeem heeft technisch gefunctioneerd zoals beoogd. Bij dit systeem is geen bronverstopping bekend.

NIOO in Wageningen

In 2010 zijn de bronnen voor de hogetemperatuuropslag voor NIOO gerealiseerd. De bronnen zijn gerealiseerd in zandlagen met een gemiddelde korrelgrootte van circa 120 μm . Geconstateerd is dat de capaciteit van de bronnen achter blijft bij de ontwerpverwachting. Uit nader onderzoek blijkt dat met name het onderste gedeelte van het filter nauwelijks water levert. Op basis hiervan is de capaciteit van het systeem verlaagd van 60 m^3/uur naar 20 m^3/uur . Ook bij deze lagere capaciteit is er een overschrijding van de ontwerpnorm. Na een correctie voor de onttrekkingstemperatuur voldoet de warme bron wel aan de norm, maar de koude bron niet. Voor zover bekend is er op dit moment geen sprake van zandlevering als gevolg van te grote stroomsnelheden op de boorgatwand.

7.2 'Standaard' energieopslag

In Nederland zijn veel energieopslagsystemen gerealiseerd. Het ontwerp van deze systemen voldoet over het algemeen aan de NVOE-normen. Dit komt grotendeels doordat het overgrote deel van Nederland uitermate geschikt is voor de toepassing van energieopslag en het ontwerp niet kritisch is. In gebieden met fijne zandlagen en/of een grotere heterogeniteit, zoals bijvoorbeeld het Westland, Zeeland en de Achterhoek, is de capaciteit van de watervoerende pakketten beperkter en wordt kritischer ontworpen. In deze gebieden is een overschrijding van de normen eerder te verwachten. Toch blijkt dat over het algemeen het ontwerp en de gerealiseerde systemen voldoen aan de ontwerpnormen, doordat bij het ontwerp relatief lage doorlatendheden en filterlengtes worden gehanteerd.

Van de vele energieopslagsystemen die gerealiseerd zijn, is van enkele systemen bekend dat er zandlevering optreedt of op heeft getreden. Niet altijd is exact vast te stellen wat de directe oorzaak van de zandlevering is. Het kan ook een combinatie van verschillende oorzaken zijn. Het probleem is over het algemeen dat er niet voldoende informatie beschikbaar is om de exacte oorzaak te bepalen. Er zijn wel een aantal (mogelijke) oorzaken aan te wijzen voor de zandlevering:

Verkeerde keuze filtergrind en grootte filterspleten

In een aantal gevallen is een te grof filtergrind en te grootte filterspleten aangehouden in relatie tot het bodemmateriaal. Dit is veroorzaakt door een verkeerde keuze vooraf of een verkeerde inschatting van de gemiddelde korrelgrootte en de verdeling van de korrelgroottes in het veld. Het kan in deze gevallen ook zo zijn dat hierdoor de ontwerpnorm wordt overschreden.

Grote variatie in korrelgrootte

Er is ook een geval bekend waarbij een grote variatie in korrelgrootte aanwezig was. Voor de keuze van het filtergrind en de filterspleet is rekening gehouden met het minimaliseren van het risico van zandlevering en het beperken van de stijghoogteveranderingen. Deze keuze heeft ertoe geleid dat met name in het begin zandlevering heeft opgetreden. Na intensief ontwikkelen is de zandlevering gereduceerd.

Filters (deels) in (kalk)zandsteen

In de (kalk)zandsteen kunnen scheuren of fijne zandlagen aanwezig zijn. Daarnaast kan het zandsteen fijne fracties bevatten. Bij een project met filters gedeeltelijk in (kalk)zandsteen trad bij alle bronnen zandlevering op. In een van de bronnen bleek, op basis van een flowmeting, slechts een gering gedeelte van de zandsteen water te leveren. Verwacht wordt dat deze laag zand levert.

Scheve debietverdeling over het filter

Op basis van flowmetingen is bij een aantal project aangetoond dat de verdeling van het debiet over het filter niet gelijkmatig is. Hierdoor kan de stroomsnelheid in sommige delen van het filter (vele malen) hoger zijn dan toegestaan volgens de norm. Bij een project in Rotterdam is deze scheve verdeling aangetroffen en is de stroomsnelheid op de boorgatwand in een deel van het filtertraject groter dan volgens de norm toegestaan. Bij dit project is zandlevering vastgesteld.

8 Aanbevelingen

Wanneer het temperatuureffect mee wordt genomen in de doorlatendheid, moet de doorlatendheid bepaald door Shepherd eerst worden omgerekend naar intrinsieke permeabiliteit. Voorlopig zal deze omrekening volstaan. Echter deze manier is omslachtig en het effect van porositeit kan op deze manier niet mee worden genomen in de bepaling van de doorlatendheid. Met name voor projecten op grotere diepte kan deze aanpassing van belang zijn. Overstappen op de Kozeny-Carman vergelijking zou daarom een interessante optie zijn.

Een ander belangrijk aspect dat van invloed is op het ontwerp van putten is de mate van sortering van het zand in de bodem. De sortering van het zand heeft een directe invloed op de mate van zandtransport in de bodem. Een gemiddelde poriediameter is kleiner dan de korrelgrootte. Theoretisch gezien is zandtransport door een volledig homogeen zand niet mogelijk en zijn hoge ontwerpsnelheden toegestaan. Immers, geen van de korrels heeft een diameter die door de poriën past.

Een aanbeveling voor verder onderzoek naar de ontwerpnormen is om de porositeitsbepaling nader te onderzoeken en meer inzicht te krijgen in de Kozeny-Carman vergelijking.

Kozeny-Carman vergelijking:

Meerdere testen tonen aan dat de Kozeny-Carman vergelijking goede voorspellingen geeft voor de doorlatendheid (Chapuis, 2003). De Kozeny-Carman vergelijking (1939) wordt gegeven door:

$$k = C \frac{g}{\mu \rho_f S^2 D_r^2 (1 + e)}$$

k = doorlatendheid [m/s]
 ρ_f = dichtheid [kg/m³]
 g = valversnelling [m/s²]
 μ = dynamische viscositeit [kg/ms]
 e = leegte ratio [-]
 S = specifieke oppervlakte [m²/kg]
 D_r = specifieke gewicht [-]
 C = constante [-]

De eerder genoemde Kozeny-Carman vergelijking kan hier uit herleidt worden:
De leegte ratio (e) kan ook worden uitgedrukt in porositeit (n):

$$e = \frac{n}{e^3 \frac{1-n}{(1+e)} = \frac{n^3}{(1-n)^2}}$$

Het specifiek gewicht wordt gegeven door:

$$D_r = \frac{\rho_s}{\rho_f}$$

$D_r = \text{specifieke gewicht [-]}$

$\rho_s = \text{dichtheid [kg/m}^3\text{]}$

$\rho_f = \text{dichtheid [kg/m}^3\text{]}$

De specifieke oppervlakte kan worden benaderd met een simpele geometrische bepaling (Chapuis en Légaré, 1992):

$$S(d) = \frac{6}{d \cdot \rho_s}$$

$S = \text{specifieke oppervlakte [m}^2\text{/kg]}$

$d = \text{diameter bol (m)}$

$\rho_s = \text{dichtheid van de bol [kg/m}^3\text{]}$

Wanneer deze termen worden vervangen in de vergelijking, kan de formule herschreven worden tot:

$$k = \left(\frac{\rho_f g}{\mu} \right) \left(\frac{n^3}{(1-n)^2} \right) \frac{d^2 C}{36}$$

De constante C kan een waarde van 0.20 – 0.50 aannemen (Carman, 1939). Wanneer een factor C=0.20 wordt gebruikt geeft dit de beste overeenkomst met experimentele resultaten (Carman, 1939). Wanneer C= 0,20 wordt ingevuld in de vergelijking:

$$k = \left(\frac{\rho_f g}{\mu} \right) \left(\frac{n^3}{(1-n)^2} \right) \frac{(d)^2}{180}$$

$d = \text{diameter [m]}$

Een onzekerheid zit in de bepaling van de specifieke oppervlakte en de keuze voor de constante C=0.20. In de formule zitten een paar empirische parameters die per situatie kunnen verschillen. Het verdient de aanbeveling om na te gaan of deze parameters niet voor een aantal universele situaties bepaald kunnen worden. De porositeit kan bijvoorbeeld met behulp van Archie berekend worden:

$$\left(\frac{1}{R_o} \right) = \left(\frac{1}{a n^{-m} R_w} \right)$$

$R_o = \text{elektrische weerstand aquifer [Ohms m]}$

$R_w = \text{elektrische weerstand water [Ohms m]}$

$a = \text{klei factor, tussen 1,00 en 1,09 (0% klei tot 75% klei) [-]}$

$m = \text{cementatie factor, tussen 1,3 en 2,0 (ongeconsolideerd tot volledig geconsolideerd) [-]}$

$n = \text{porositeit [-]}$

De elektrische weerstanden kunnen afgeleid worden uit EC-metingen en VES-metingen.

Voor dit onderzoek is een gedeelte van de beschikbare informatie van gerealiseerde systemen geanalyseerd. De reden hiervoor is dat niet voor alle systemen voldoende data beschikbaar was of lastig te achterhalen. Aanbevolen wordt om zoveel mogelijk beschikbare informatie te verzamelen en te analyseren in welke mate bronnen voldoen aan de huidige ontwerpnorm. Hiervoor wordt ook aanbevolen gebruik te maken van beschikbare flowmetingen om te onderzoeken of en in welke mate overschrijding van de onttrekkingsnorm optreedt als gevolg van onder andere scheve debietverdelingen over het filtertraject. Als vervolg hierop kan ook onderzocht worden wat de oorzaak van een scheve debietverdeling is. Bij overschrijding van de ontwerpnormen is het belangrijk om te kijken of en in welke mate zandlevering optreedt. Aanbevolen wordt om bronnen waar zandlevering optreedt nader te onderzoeken om de oorzaken van de zandlevering te bepalen.

Daarnaast wordt nader onderzoek naar de oorzaken van zandlevering bij projecten waar zandlevering optreedt aanbevolen.

Literatuurlijst

Adams, J.J. and Bachu, S. (2002) Equations of state for basin geofluids: algorithm review and intercomparison for brines. *Geofluids* 2, 257-271

Alberts, L.J.H. (2005) Initial porosity of random packing, TU Delft, The Netherlands

Athy, L.F. (1930) Density, porosity, and compaction of sedimentary rocks. *The American Association of Petroleum Geologists Bulletin* 14, 1-24.

Beek, van C.G.E.M., Breedveld, R.J.M. Juhasz-Holterman, M. Stuyfzand, P.J. (2009) Cause and prevention of well bore clogging by particles. *Hydrogeology Journal*, Vol 17, pp 1877-1886

Beard, D.C. and Weyl, P.K. (1973) Influence of texture on porosity and permeability of unconsolidated sand. *The American Association of Petroleum Geologists Bulletin* 57, 349-369.

Bjørlykke, K. (2010) *Petroleum Geoscience, from sedimentary environments to rock physics*, Springer, Berlin

Buik, N. (2001) *Ontwerpnormen voor bronnen voor koude-/warmte opslag*, IF-Technology, 9805NB, Arnhem

Carrier, W.D. (2003). Goodbye, Hazen; Hello, Kozeny-Carman. *Journal Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 129.

Chapuis, R.P. Aubertin, M.(2003) Predicting the coefficient of permeability of soils using the kozeny-carman equation. *École Polytechnique de Montréal*

Cumberland, D.J. and Crawford, R.J. (1987) *The packing of particles*. Amsterdam, Elsevier, 148pp.

Driscoll, F.G., (1989) *Groundwater and wells*, Johnson filtration systems inc., St Pauls, Minnesota, US

Fortuin, N., (1998) *Clogging of infiltration wells due to particle matter*, IF-technology, 9805/NF, Arnhem

Fraser, H.J. (1935) Experimental study of the porosity and permeability of clastic sediments. *Journal of Geology* 43, 910-1010.

Furnas, C.C. (1929) *Flow of gases through beds of broken solids*. U.S. Bureau of Mines Bulletin 130, 144pp.

Fredsøe, J and Deigaard, R., (1992) Mechanics of coastal sediment transport. World Scientific

Gill, A.E. (1982) Atmosphere-Ocean Dynamics Press, New York

Fitts, C.R. (2002) Groundwater Science, Academic Press, London

Holtz, R.D., Kovacs, D., (1981) An introduction to geotechnical engineering, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N.J., US

Houseknecht, D.W. (1987) Assessing the relative importance of compaction processes and cementation to reduction of porosity in sandstones. The American Association of Petroleum Geologists Bulletin 71, 633-642.

Kasenow, M. (2002) PhD. Determination of hydraulic conductivity from grain size analysis. Water research publications, LLC

Mercer, J.W. Pinder, G.F. Donalson, I.G. (1975). A Galerkinfinite element analysis of the hydrothermal system at Wairakei, New Zealand. Journal of Geophysical Research, 80, 2608-21

Oasen (2006) Voorkomen en verwijderen van deeltjes op de boorgatwand

Yang, W. (2003), Handbook of Fluidization and Fluid-Particle Systems, Flow through fixed beds. Siemens Westinghouse Power corporation, Pittsburgh, U.S.A.

Zwart, de, B. (2007). Investigation of clogging processes in unconsolidated aquifers near water supply wells. Proefschrift, TU Delft

Bijlage 1

Processen en theorieën die ten grondslag liggen aan zandtransport

De norm voor onttrekkingsputten is gebaseerd op het minimaliseren van zandlevering. Zandlevering is een complex fenomeen dat afhankelijk is van de stroomsnelheid, de druk rond de put en de eigenschappen van de aquifer. Processen zoals spanningen, erosie, zandtransport, en spanningsbogen spelen allemaal een rol. Ondanks veel onderzoek worden de meeste van deze processen nog niet volledig begrepen. Om meer inzicht te krijgen in de processen die ten grondslag liggen aan zandlevering, behandeld deze bijlage kort enkele theorieën. De theorieën zijn niet volledig uitgewerkt, maar het geeft een overzicht van de processen waaraan men moet denken.

Zandomstorting

Om het filter wordt een zandomstorting geplaatst, zodat er een gebied rondom de put ontstaat met relatief brede kanalen waar de weerstand tegen het water zo klein mogelijk wordt, terwijl de weerstand groot genoeg is om zandtransport te voorkomen. De dikte van dit filterpakket is normaal gesproken tussen de 15 en 30 cm. Als de gemiddelde korrelgrootte van de verschillende lagen sterk varieert, zal dit mee moeten worden genomen in het ontwerp. De zandomstorting kan worden aangepast door het variëren van de korrelgrootte over de lengte van de zandomstorting.

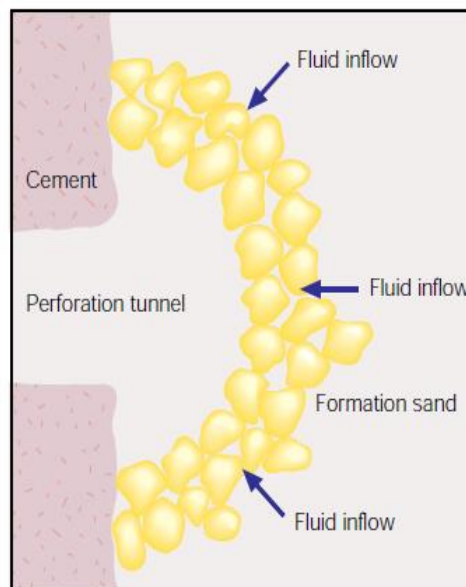
De zandomstorting moet van een gelijkvormige grootte zijn, die net iets groter is dan de grootte van de filterspleet van de put. Als de korrelgrootte verdeling in de zandomstorting te verspreid is kan de put verstopt raken. Behalve een verhouding tot de filterspleten, heeft deze korrelgrootte ook een verhouding tot de gemiddelde korrelgrootte van de aquifer. De ratio tussen de korrelgrootte van de omstorting en de korrelgrootte van de aquifer ($D_{50}zandomstorting/D_{50}aquifer$) moet in de orde van 4,5-5,5 zijn (Ives en Coad, 1987). Dit is een theoretisch afgeleide verhouding gebaseerd op het feit dat de poriën van de zandomstorting het omringende zand niet voorbij laat gaan tot een verhouding van 5,5 (Ives en Coad, 1987). De korrelgrootte voor een geschikte zandomstorting is ook experimenteel onderzocht; een verhouding ($D_{50}zandomstorting/D_{50}aquifer$) tussen de vier en vijf gaf de beste resultaten. Bij ratio's groter dan 10, leverde de put aanzienlijke hoeveelheden zand (Smith, 1954). Hoewel er richtlijnen zijn om de korrelgrootte voor een zandomstorting te kiezen, zijn er geen uniforme regels (Makkink, 2010). Een goede aanleg van het filterzand is belangrijk; er mag geen menging tussen het filterzand en omringende zand zijn.

Voor de aquifers waarin huidige KWO-systemen worden aangebracht, wordt een minimale korrelgrootte van 160 μm gehanteerd. De grens van 160 μm is vastgesteld om praktische redenen. De minimale filterspleet in pvc-filters is 0,4 mm. De zandomstorting wordt afgesteld op de filterspleet en het omringende zand. Een kleinere korrelgrootte dan 160 μm zal door de zandomstorting en de filterspleet heen gaan.

Nieuwe technieken, zoals wikkeldraadfilters, kunnen tot een filterspleet gaan van 0,1 mm. Met wikkeldraad filters is het mogelijk om KWO-systemen aan te leggen in zeer fijnzandige aquifers zonder dat er zandlevering plaats vindt.

Zandbruggen

Zandlevering is voornamelijk bestudeerd in de gas- en olie-industrie. Zandlevering kan worden verklaard door een kritische druk in de put. De druk in de put waarbij zandkorrels mee komen in de boorput wordt de kritische zandleveringdruk genoemd. Uit ervaring is gebleken dat er een kritische snelheid is waarbij zandlevering optreedt. Onderzoekers hebben ontdekt dat dit komt door de vorming van stabiele zandbogen rondom openingen (Abass, 1993). Een zandboog is een halfronde kap van in elkaar grijpende zandkorrels en voorkomt op deze manier verdere zandtransport. Als er een zandboog ontstaat, blijft het stabiel zolang de capaciteit van de bron onder een kritische snelheid blijft.



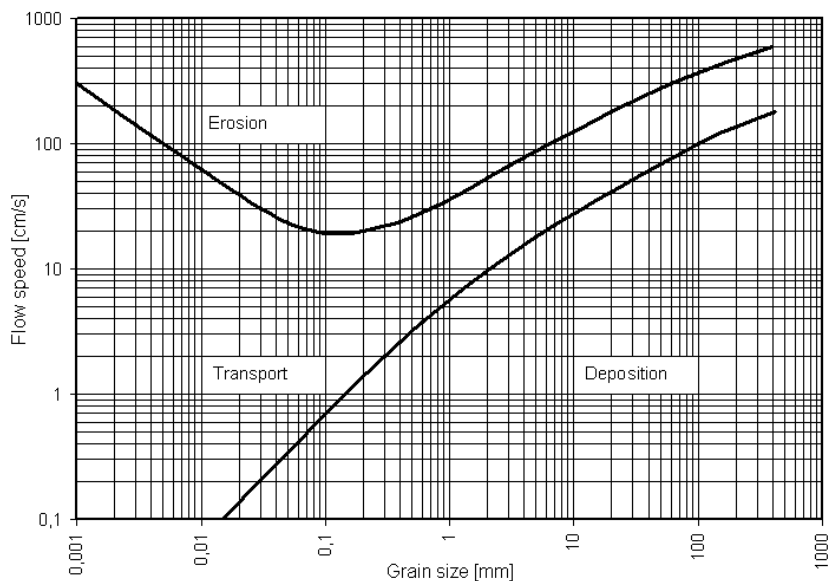
Figuur B1.1 Zandbrug (Abass, 1993)

Zandtransport in poreuze media

Deeltjes in het water zijn onderworpen aan interacties met de bodemmatrix (fysisch-chemische krachten) en aan een sleepkracht van het stromende water (hydrodynamische krachten). Deze krachten samen bepalen in hoge mate de concentratie van deeltjes in suspensie. Of het zand meegevoerd zal worden is sterk afhankelijk van de stroomsnelheid van het water en van de korrelgrootte. Zandlevering is het gevolg van de sleepkracht van het water op de korrels. Deze kracht trekt de korrel los en voert het mee door de poriën. Het effect groeit met een hogere viscositeit van de vloeistof, een hogere stroomsnelheid en met een groter drukverschil als gevolg van een grotere verlaging in de put (Morita, 1991).

Sleepkracht

Zandtransport is voornamelijk bestudeerd voor zandtransport in rivieren. Hieruit is de Hjulstrom curve afgeleid. De Hjulstrom curve (figuur B1.2) laat zien wanneer sediment erodeert, wanneer het wordt getransporteerd en wanneer het neerslaat. Dit is afhankelijk van de stroomsnelheid en de korrelgrootte. In de grafiek staat op de x-as de korrelgrootte [mm]; de y-as de snelheid [cm/s]. De bovenste curve geeft de snelheid weer waarbij erosie plaats vindt. De onderste curve geeft de kritische snelheid weer waarbij een deeltje wordt meegevoerd. Hoe kleiner een deeltje en hoe hoger de snelheid, hoe eerder het deeltje wordt getransporteerd.



Figuur B1.2 Hjulstrom diagram

De belangrijkste kracht die er voor zorgt of zand getransporteerd wordt is de sleepkracht. Sleepkracht is de netto kracht in de stroomrichting als gevolg van druk en wrijvingskracht op de oppervlakte van het deeltje. De sleepkracht wordt gegeven door:

$$F_d = \frac{1}{2} C_d \rho_w v^2 A$$

F_d = sleepkracht [N]

C_d = sleepkrachtcoëfficiënt [-]

v = snelheid [m/s]

g = valversnelling [m/s²]

ρ_w = dichtheid [kg/m³]

A = oppervlakte [m²]

De sleepkrachtcoëfficiënt, C_d , is afhankelijk van het getal van Reynolds.

In laminaire stroming is het getal van Reynolds < 1: $C_d = 24/Re$ (Stokes, 1851)

In turbulente stroming is het getal van Reynolds > 10³: $C_d = 0.44$

Het getal van Reynolds wordt beschreven door:

$$Re = \frac{v * L * \rho}{\mu}$$

Re = getal van Reynolds [-]

v = stroomsnelheid [m/s]

L = karakteristieke lengte [m]

ρ = dichtheid [kg/m³]

μ = dynamische viscositeit [Pa * s]

In geval van stroming door een buis, is de karakteristieke lengte de diameter van de buis. Om het getal van Reynolds in een poreus medium te bepalen wordt de volgende relatie (Zwart, 2007) gebruikt:

$$Re = \frac{v * D10 * \rho_w}{\mu}$$

D10 = korrelgrootte waarvoor geldt dat 10% van de zandfractie een kleinere korrelgrootte heeft [m]

Bij een D10 van 100 μm , een dichtheid van 1000 kg/m^3 , en een viscositeit van $1 * 10^{-3} \text{ Pa} * \text{s}$, is de stroming laminair tot een stroomsnelheid van 0,1 m/s. Grondwaterstroming en de stroming naar de put kunnen worden beschouwd als een laminaire stroming. De sleepkracht op een korrel in een laminaire stroming wordt gegeven door:

$$F_d = \frac{1}{2} C_d \rho_w v^2 A$$

$$F_d = \frac{1}{2} \frac{24\mu}{v * D30 * \rho_w} \rho_w v^2 \frac{\pi D^2}{4}$$

$$F_d = 3 \pi \mu v \frac{D^2}{D10}$$

Deze vergelijking geeft een duidelijke relatie: bij een laminaire stroming heeft de sleepkracht een lineair verband met de stroomsnelheid en de viscositeit. Wanneer de viscositeit en stroomsnelheid toenemen, zal de sleepkracht die werkt op de korrel ook toenemen.

Stokes en Van Ieperen sedimentatiesnelheid

In zandtransport in rivieren wordt de meevoersnelheid vergeleken met de sedimentatiesnelheid. Wanneer de meevoersnelheid groter is dan de sedimentatie snelheid, dan kan een deeltje meegevoerd worden. Deze sedimentatiesnelheid kan beschreven worden met Stokes wet (1851) of de Van Ieperen (1987) vergelijking. Hoewel Van Ieperen en Stokes hoofdzakelijk gebruikt worden voor rivieren, spelen dezelfde fysieke krachten spelen een rol in poreuze media.

Voor een deeltje in suspensie zijn de krachten die op het deeltje werken:

- De zwaartekracht.
- De opwaartse kracht.
- De sleepkracht.

De krachten kunnen samengevoegd worden in de formule:

$$F_t = F_z - F_b - F_d$$

$$F_t = \text{totale kracht [N]}$$

De zwaartekracht wordt gegeven door:

$$F_z = m * g \text{ [N]}$$

De opwaartse kracht, kan worden beschreven met de wet van Archimedes:

$$F_b = \rho_w g \frac{m}{\rho_p} [N]$$

De sleepkracht wordt gegeven door:

$$F_d = \frac{1}{2} C_d \rho_w v^2 A$$

$$F_d = \text{sleepkracht} [N]$$

$$C_d = \text{sleepkrachtcoefficient} [-]$$

$$v = \text{stroomsnelheid} [m/s]$$

$$g = \text{valversnelling} [m/s^2]$$

$$\rho = \text{dichtheid} [kg/m^3]$$

$$A = \text{oppervlakte} [m^2]$$

De krachten op een deeltje in het water kunnen beschreven worden door:

$$F = m \frac{dv}{dt} = mg - \rho_f g \frac{m}{\rho_p} - \frac{1}{2} C_d \rho_f v^2 A$$

Een zandkorrel is voortdurend onderworpen aan een snelheid ten opzichte van het water in de richting van de zwaartekracht. De maximale sedimentatiesnelheid in verticale richting wordt gegeven door:

$$v = \sqrt{\frac{2g(\rho_p - \rho_f)m}{A C_d \rho_p \rho_f}}$$

Een zandkorrel met een diameter D, geeft:

$$m = \rho_p \cdot \frac{1}{6} \pi D^3$$

$$A = \frac{1}{4} \pi D^2$$

$$C_d = \frac{24\mu}{v * D * \rho}$$

$$v_s = \frac{(\rho_p - \rho_f)g * D^2}{18 \mu}$$

$$v_s = \text{sedimentatiesnelheid} [m/s]$$

$$\rho_p = \text{dichtheid deeltje} [kg/m^3]$$

$$\rho_f = \text{dichtheid water} [kg/m^3]$$

$$g = \text{valversnelling} [9,81 m/s^2]$$

$$D = \text{korrelgrootte} [m]$$

$$\mu = \text{dynamische viscositeit} [Pa * s]$$

Dit is de wet van Stokes. Van Leperen (1987) heeft ook een vergelijking afgeleid voor de sedimentatiesnelheid onder laminaire condities:

$$v_s = \frac{(\rho_p - \rho_f)g * D^2}{21 u}$$

v_s = sedimentatiesnelheid [m/s]

ρ_p = dichtheid deeltje [kg/m³]

ρ_f = dichtheid water [kg/m³]

g = valversnelling [9,81 m/s²]

D = korrelgrootte [m]

u = dynamische viscositeit [Pa * s]

Het verschil tussen Stokes en Van Leperen, is dat Stokes een fysisch afgeleide vergelijking is, terwijl Van Leperen empirisch is afgeleid. Stokes vergelijking is gebaseerd op perfect ronde bollen, waar Van Leperen er rekening mee houdt dat zandkorrels niet perfect rond zijn. De berekende snelheid van Van Leperen geeft hierdoor een 15% kleinere sedimentatiesnelheid. Ook Fredsoe en Deigaard (1992) lieten zien dat onder eenzelfde stroomsnelheid, de sleepkracht coëfficiënt (Cd) van een zandkorrel tot wel 40% groter kan zijn dan voor een perfect ronde korrel.

Een deeltje kan getransporteerd worden wanneer de sleepkracht groot genoeg is om de zwaartekracht en de wrijvingskrachten te overwinnen die het deeltje anders op zijn plaats zouden houden. Een deeltje getransporteerd door een poreus medium zal nog veel meer wrijving ondervinden die overtroffen moet worden om uiteindelijk bij een put aan te komen. Wanneer de stroomsnelheid kleiner is dan de sedimentatiesnelheid zal een deeltje niet getransporteerd kunnen worden. De sedimentatiesnelheid geeft de minimale snelheid weer die nodig is om een deeltje te transporteren.

Fluïdisatie snelheid

Een andere snelheid die een rol kan spelen in zandtransport is de fluïdisatie snelheid. Fluïdisatie is een proces waarbij een korrelvormige vaste stof van een statische vaste toestand overgaat in een dynamische vloeistofachtige staat.

Om een theoretische verklaring te vinden voor de huidige onttrekkingsnorm, is het al eens eerder vergeleken met het punt van fluïdisatie. De kwelkracht op de boorgatwand wordt dan beschouwd als de bepalende factor voor het ontwerp van de onttrekkingsput. De kwelkracht wordt berekend door de gradiënt:

$$v = k * i$$

v = stroomsnelheid [m/d]

k = doorlatendheid [m/d]

i = gradiënt [-]

Er is gevaar voor drijfzand bij een opwaartse stroming wanneer de gradiënt de waarde één nadert Holtz en Kovacs (1982). De theorie met betrekking tot fluïdisatie is gebaseerd op een verticale stroming. Rondom de putten is met name sprake van horizontale stroming.

In hoeverre een vertaling van een verticale naar een horizontale stroming opgaat is niet nader onderzocht. Op basis van empirie is in de onttrekkingsnorm een gradiënt van twee aangenomen:

$$v = 2 * k$$

v = stroomsnelheid [m/d]

k = doorlatendheid [m/d]

Deze theorie zal pas gelden bij hele hoge snelheden. De opwaartse stroming van water vermindert de effectieve spanning. Pas als de effectieve spanning zodanig afneemt dat de zandkorrels niet meer op elkaar rusten, ontstaat er drijfzand. De krachten die hierbij een rol spelen worden beschreven door Terzaghi:

$$\sigma_{vt} = \sigma_{ve} + P$$

σ_{vt} = totale verticale spanning

σ_{ve} = effectieve spanning

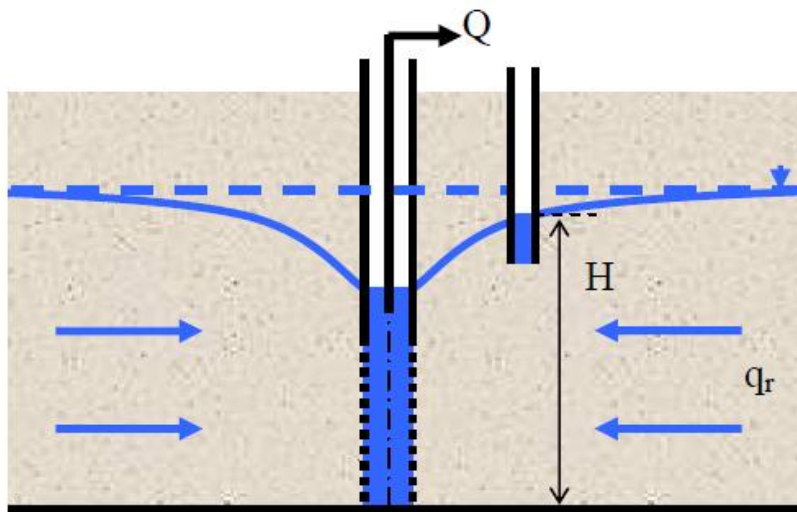
P = poriewater druk

De totale verticale spanning is de som van de poriewaterdruk en de effectieve spanning. De effectieve spanning wordt bepaald door het korrelskelet. Hoe dieper men in de bodem gaat hoe groter de effectieve spanning wordt (Fitts, 2002). Hoe dichter de korrelstapeling en hoe groter de druk die op een korrel rust, hoe lastiger het wordt om zandkorrels los te trekken uit het korrelskelet. Hierdoor zullen er op grotere diepte minder korrels los getrokken worden.

Voordat een zandmassa het punt van fluïdisatie bereikt, moet de effectieve spanning nul zijn (Fitts, 2002):

$$\sigma_{ve} = \sigma_{vt} - P$$

Dit betekent dat de poriewaterdruk groter of gelijk moet zijn aan de effectieve spanning. Door een daling van het grondwaterpeil rondom de put als gevolg van onttrekking, neemt de effectieve spanning toe en hierdoor de kans op fluïdisatie af. Welke verhouding er zit tussen de afname van de poriewaterdruk als gevolg van de stijghoogtedaling en de toename van de poriewaterdruk als gevolg van de onttrekking is niet nader onderzocht.



Figuur B1.3 Door verlaging in de put kan de effectieve spanning rondom een put toenemen

Hoewel de vergelijking tussen kwelkracht en de ontwerpnorm in eerste instantie erg voor de hand liggend lijkt, zal de snelheid waarbij fluïdisatie optreedt zo hoog moeten zijn dat snelheden voor zandtransport door sleepkrachten al veel eerder maatgevend zullen zijn.

Zandlevering: is het een probleem?

Het willen minimaliseren van zandtransport leidt tot een afname van de capaciteit van de bron. Er wordt immers een beperking op de maximale snelheid op de boorgatwand opgelegd. Het is daarom goed om er bewust van te zijn of zandlevering daadwerkelijk een probleem is. Drie belangrijke aspecten om rekening mee te houden zijn:

- bronverstopping van de infiltratieput;
- bronverstopping van de onttrekkingsput;
- kostenoverweging van filteren van fijne deeltjes.

Voor KWO-systemen is het van belang dat het geïnfiltreerde water zo min mogelijk deeltjes bevat. Daarom zal bij zandlevering het water gefilterd moeten worden en het onttrokken zand worden afgevoerd. Zandlevering zal hierdoor kosten met zich meebrengen. Daarnaast vergt het ook extra onderhoud. Echter de kosten van zandlevering door een te hoge capaciteit kunnen gepaard gaan met extra inkomsten door het verhoogde debiet. Een balans zou kunnen worden opgemaakt of de kosten van zandlevering kunnen worden teruggewonnen. Maar wanneer de snelheid groot genoeg is dat zanddeeltjes kunnen worden getransporteerd, kan dit ook leiden tot bronverstopping van de onttrekkingsput.

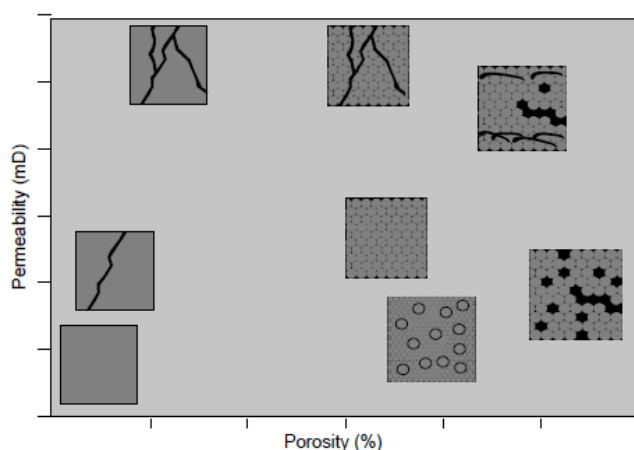
Wanneer er deeltjes worden getransporteerd zullen deze deeltjes richting de put stromen. Door de radiale geometrie van een put neemt de ruimte waardoor de deeltjes kunnen stromen kwadratisch af met de afstand; hoe dichterbij de put, hoe minder poriën er zijn waar het water en de deeltjes door heen kunnen stromen (Zwart, 2007). De concentratie aan deeltjes zal daarom toenemen rondom de put, wat resulteert in verstopping. Verstopping resulteert in een extra verlaging in de put en de capaciteit van de put zal afnemen. Omdat het altijd beter is om verstopping van de onttrekkingsput te voorkomen zal de voorkeur uit gaan naar het voorkomen van zandlevering boven de kosten en baten van zandlevering.

Fraccen

Het doel van deze studie was om meer kennis te verwerven over zandtransport en aanpassing voor de ontwerpnorm voor hoge in fijnzandige aquifers. Een andere veel belovende techniek die kan worden toegepast voor onttrekking uit aquifers met een lage permeabiliteit is fraccen, ook wel bekend als 'hydrofracturing'. Fraccen kan de permeabiliteit van de bodem verhogen.

Fraccen is een techniek die gebruikt wordt in de olie- en gasindustrie. Onder hoge druk (400 - 1000 bar) wordt water met enkele chemicaliën geïnjecteerd om zo de permeabiliteit van geconsolideerd of relatief slecht doorlaatbare ongeconsolideerde materialen te verhogen. Het succes van fraccen hangt af van het gesteente, de structurele geologie en de aquifer.

Fraccen verkleint de effectieve spanning door een verhoging van de waterdruk; het zorgt voor het ontstoppen en verplaatsen van de matrix zodat er kleine scheurtjes ontstaan. Door de hogere permeabiliteit ontstaat er een kleinere verlaging in de put, waardoor zandlevering kan worden voorkomen. De toepassing van fraccen is voornamelijk interessant in bodems met lage porositeit. Figuur B1.4 laat zien hoe een bodem met lage porositeit, hoog permeabel kan worden door het creëren van kleine scheurtjes.



Figuur B1.4 Porositeit en permeabiliteit (Beard en Weyl, 1973).

Literatuurlijst Bijlage

Abass, H.H. Wilson, J.M., Venditto, J.J., Stimulating weak formations using new hydraulic fracturing and sand control approaches, SPE 25494.

Beard, D.C. and Weyl, P.K. (1973) Influence of texture on porosity and permeability of unconsolidated sand. The American Association of Petroleum Geologists Bulletin 57, 349-369.

Buik, N. (2001) Ontwerpnormen voor bronnen voor koude-/warmte opslag, IF-Technology, 9805NB, Arnhem

Fitts, C.R. (2002) Groundwater Science, Academic Press, London

Ieperen, van H.J., (1987) The fall velocity of grain particles, Dept. of hydraulics and catchment hydrology Agricultural University of Wageningen

Ives, K and A. Coad (1987) "Selecting Filter Media", Developing World Water, Hong Kong: Grosvenor Press Int'l, pp. 202-203.

Makkink, H.J., Leunk, I., Balemans, M.L.M., Schrama, E.J. (2010) Kennisdocument Putten(velden) Ontwerp, aanleg en exploitatie van pompputten, KWR, Nieuwegein

Morita, N. Boyd, P.A. (1991) Typical sand production problems: case studies and strategies for sand control. Paper SPE 22739

Smith, H.F. (1954) Gravel Packing Water Wells, Department of Registration and Education, Urbana, Illinois

Wang, J. Wan, R.G., Settari, A., Walters, D. (2005) Prediction of Volumetric Sand Production and Wellbore Stability Analysis of a Well at Different Completion Schemes ARMA, American Rock Mechanics Association