Inhoudsopgave

1 Doorlatendheidsonderzoek ... 3
1.1 Doorlatendheid van de bodem ... 5
1.1.1 Bodemopbouw ... 6
1.1.2 Grondwaterstand en -stroming ... 10
1.1.3 Doorlatendheid in de verzadigde zone ... 11
1.1.4 Doorlatendheid in de onverzadigde zone ... 13
1.2 Opzet doorlatendheidsonderzoek ... 15
1.2.1 Onderzoeksopzet per projectfase ... 20
1.2.1.1 Vooronderzoek infiltratiemogelijkheden (initiatief-/definitiefase) ... 23
1.2.1.2 Doorlatendheidsonderzoek (ontwerpfase) ... 26
1.2.1.3 Raakvlakken met andere (bodem)onderzoeken ... 28
1.3 Valkuilen doorlatendheidsonderzoek ... 30
1.4 Methodekeuze directe doorlatenheidsmetingen (in het veld) ... 35
1.4.1 Algemene uitgangspunten doorlatendheidsmetingen in het veld ... 41
1.4.2 Theoretische afleiding infiltratiesnelheid ... 44
1.4.3 Dubbele-ringinfiltrometermethode ... 47
1.4.3.1 Uitleg formules ... 50
1.4.3.2 Rekenvoorbeeld ... 53
1.4.4 Aardvarkmethode ... 56
1.4.4.1 Uitleg formules ... 59
1.4.5 Falling-headtest in peilbuis ... 61
1.4.5.1 Uitleg formules ... 63
1.4.5.2 Rekenvoorbeeld ... 67
1.4.6 Rising-headtest in peilbuis ... 70
1.4.6.1 Uitleg formules ... 72
1.4.6.2 Rekenvoorbeeld ... 76
1.4.7 Constant-headtest (verhoging) in boorgat of peilbuis ... 81
1.4.7.1 Uitleg formules ... 84
1.4.7.2 Rekenvoorbeeld ... 88
1.4.8 Constant-headtest (verlaging) in peilbuis ... 90
1.4.8.1 Uitleg formule ... 93
1.4.8.2 Bepalen geometrische factor ... 94
1.4.8.3 Rekenvoorbeeld ... 96
1.4.9 Constant-flowtest (verhoging) ... 98
1.4.10 Constant-flowtest (verlaging) ... 103
1.5 Laboratoriumproeven verticale doorlatendheid ... 106
1.5.1 Falling-head/rising-head ... 107
1.5.2 Constant-head (verhoging/verlaging) ... 109
1.6 Indirecte bepaling doorlatendheid (methoden) ... 111
1.6.1 Korrelverdelingsanalyse ... 112
1.6.1.1 Uitvoering korrelverdelingsanalyse ... 115
1.6.1.2 Nut en noodzaak korrelverdelingsanalyse ... 117
1.6.1.3 Toepassingsgebied formules en uitwerking korrelverdelingsanalyse ... 118

Tervisiedocument Stichting RIONED

1.6.2 Boorbeschrijving 128
1.6.3 Sondering 129
1.7 Beoordelen uitkomsten doorlatendheidsonderzoek 131

Tervisiedocument Stichting RIONED

1 Doorlatendheidsonderzoek

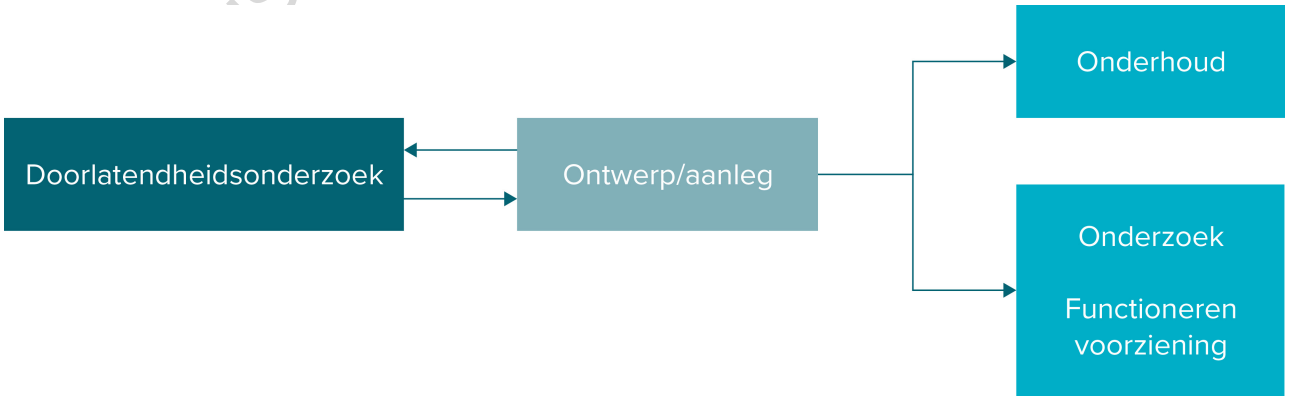
Dit onderdeel behandelt onderzoeksmethoden om de doorlatendheid van de bodem te bepalen. U krijgt handvatten om doorlatendheidsonderzoek te laten uitvoeren en de resultaten ervan beter te kunnen beoordelen.

Gemeenten hebben de opgave uit het Deltaplan Ruimtelijke Adaptatie om de buitenruimte klimaatbestendig in te richten. Hier wordt onder andere invulling aan gegeven door de aanleg en het beheer van systemen voor het verwerken van hemelwater (gericht op het inzamelen, tijdelijk bergen en infiltreren), aanvullen van de grondwatervoorraad om verdroging tegen te gaan en voor het af- en aanvoeren van grondwater (gericht op grondwaterpeil stabiel houden). Voor deze activiteiten zijn goede voorzieningen nodig. Voorzieningen die door goed ontwerp en beheer langdurig functioneren, hun capaciteit behouden en de omgeving niet hinderen.

De effecten van infiltratie- en drainagesystemen voor de omgeving worden regelmatig onderschat. Elke ingreep in het (grond)waterregime heeft vaak niet alleen een lokaal effect, maar ook invloed op de omgeving. Of een voorziening daadwerkelijk goed functioneert, hangt vooral af van de bodemeigenschappen op de plek waar de voorziening ligt en de omgeving.

De doorlatendheid van de bodem is een van de bepalende factoren voor het dimensioneren en het (blijven) functioneren van infiltratie- en drainagesystemen. Inzicht in doorlatendheid is dus van groot belang als u plannen maakt voor hemelwaterinfiltratie of grondwaterdrainage. De ontwerp-, onderzoeks- en beheeraspecten van deze systemen komen in verschillende delen van de Kennisbank aan de orde (zie figuur A).

isiedocument Stichting RIONED



Figuur A Doorlatendheidsonderzoek voorafgaand aan andere onderdelen uit de Kennisbank.

Doel van dit onderdeel

Dit onderdeel behandelt onderzoeksmethoden om de doorlatendheid van de bodem te bepalen. Het biedt inzicht in :

- het begrip doorlatendheid;
- hoe u voor verschillende situaties de juiste methode kiest om de doorlatendheid te bepalen;
- de werking van doorlatendheidsmetingen.

Hiermee geeft dit onderdeel u handvatten om doorlatendheidsonderzoek te laten uitvoeren en de resultaten ervan beter te kunnen beoordelen.

Tervisiedocument Stichting RIONED

1.1 Doorlatendheid van de bodem

Op deze pagina wordt de term doorlatendheid toegelicht.

Doorlatendheid is de capaciteit van de bodem om water door te laten. De doorlatendheid hangt af van verschillende bodemeigenschappen. Voor het bepalen van de doorlatendheid is kennis over de bodemopbouw (lokaal, maar ook de ontstaansgeschiedenis en heterogeniteit) en de grondwaterstandfluctuatie van belang.

In de onderliggende pagina's worden de invloeden van deze omgevingskenmerken beschreven evenals de verschillen tussen doorlatendheid in de verzadigde zone en onverzadigde zone:

Doorlatendheid in de verzadigde zone – onder de grondwaterstand:

- de snelheid waarmee het grondwater in horizontale richting stroomt, deze is gerelateerd aan de horizontale verzadigde doorlatendheid;
- de snelheid waarmee het grondwater in verticale richting stroomt, deze is gerelateerd aan de verticale verzadigde doorlatendheid.

Doorlatendheid in de onverzadigde zone – boven de grondwaterstand:

- de snelheid waarmee het water boven de grondwaterstand in de grond kan zakken: de infiltratiesnelheid (bijvoorbeeld in meter per dag);

Tervisiedocument Stichting RIONED

1.1.1 Bodemopbouw

De bodemsoort bepaald voor een groot deel de doorlatendheid van de bodem. De basiseigenschappen en bepalende factoren voor doorlatendheid worden op deze pagina beschreven.

Doorlatendheid bodemlagen

De natuurlijke bodemlagen in Nederland bestaan vooral uit zand, grind, klei, leem en veen. Behalve de natuurlijke afzettingen komen in Nederland ook kunstmatig met zand opgehoogde gebieden voor, met name in de bebouwde omgeving.

Klei, leem en veen zijn in het algemeen te beschouwen als slecht waterdoorlatende lagen. Grind is juist uiterst doorlatend en ook zand laat water goed door. De bodemlagen die uit zand en grind bestaan, heten een watervoerend pakket .

In het algemeen geldt dat de doorlatendheid groter wordt naarmate het bodemmateriaal grover wordt. Maar ook de gradatie of sortering speelt een belangrijke rol. Vooral het slibgehalte in een zand- of grindlaag is cruciaal voor de doorlatendheid.

Uitleg over de ontstaansgeschiedenis van de bodem is opgenomen onder stedelijke hydrologie . Uitleg over watervoerende pakketten en slecht doorlatende lagen vindt u op de pagina grondwatersysteem .

Heterogeniteit

De variatie van de grondeigenschappen in horizontale en verticale zin heet heterogeniteit. De mate van heterogeniteit van de bodem blijkt sterk samen te hangen met de omstandigheden waaronder de bodem is ontstaan. In een sterk heterogene bodem zijn meer doorlatendheidsmetingen benodigd dan in een relatief homogene bodem om een representatief beeld van de doorlatendheid te verkrijgen.

Bepalende factoren voor de doorlatendheid

Er zijn verschillende factoren die de doorlatendheid van een bodem beïnvloeden. De (gemiddelde) korrelgrootte is een van de belangrijkste. Hoe fijner het materiaal, hoe kleiner de doorlatendheid. Daarom is klei minder goed doorlatend dan

Tervisiedocument Stichting RIONED

grind. Daarnaast heeft een homogeen zandmengsel een betere doorlatendheid dan een mengsel dat bestaat uit silt, fijn zand en grof zand. Uit verschillende onderzoeken blijkt dat de doorlatendheid afhankelijk is van:

1. de hoeveelheid fijne deeltjes in het mengsel;
2. de sortering of homogeniteit van het mengsel;
3. de gemiddelde korrelgrootte van het materiaal;
4. de hoeveelheid grind;
5. de vorm (hoekig, rond/langwerpig, glad/ruw) van de gronddeeltjes;
6. de pakking van de bodem;
7. de hoeveelheid organische delen, schelpmateriaal of glauconiet in de bodem;
8. de gelaagdheid van de bodem;
9. de porositeit van het bodemmateriaal;
10. secundaire mineraalgroei (kalkaccumulatie, ijzeroxidatie, mangaanoxidatie, sideriet of – zeker in Nederlandse bodems – pyrietgroei).
11. en tot slot, als enige geen bodemeigenschap: de viscositeit (stroperigheid) van de vloeistof die door de grond stroomt;

Korrelgrootte

Elke grondsoort heeft een andere verzadigde doorlatendheid. In tabel A staan per grondsoort de richtwaarden.

Tabel A. Richtwaarden verzadigde horizontale doorlatendheid (NEN-EN-ISO 14688 en Physical and Chemical Hydrogeology, tabel 3.2 Domenico & Schwartz)

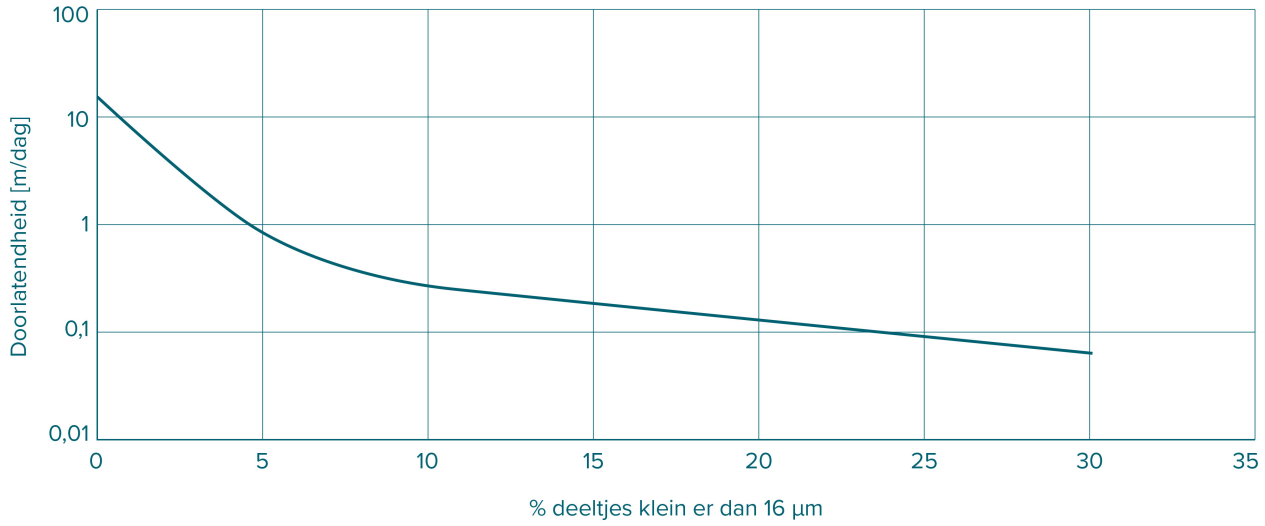
grondsoort	gemiddelde korreldiameter	K_{hor} [m/s]	k_{hor} [m/d]
grind	2 - 63 mm	0,0003 - 0,03	26 - 2592
grof zand	210 µm - 2 mm	9×10^{-7} - 0,006	0,08 - 518
fijn zand	63 µm - 210 µm	2×10^{-7} - 0,0002	0,02 - 17
silt	2 µm - 63 µm	1×10^{-9} - 2×10^{-5}	9×10^{-5} - 1,7
leem		1×10^{-12} - 2×10^{-6}	1×10^{-7} - 0,17
klei		1×10^{-11} - $4,7 \times 10^{-9}$	9×10^{-7} - 0,0004

Tervisiedocument Stichting RIONED

De doorlatendheid hangt kwadratisch af van de korreldiameter (Kozeny-Carman). Een afname van de minimale diameter met een factor 1.000 (bijvoorbeeld van grind naar silt) verkleint de minimale doorlatendheid ongeveer met een factor 10^6 . Dit is ook te zien in tabel A.

Fijne deeltjes

De waarden in tabel A zijn richtwaarden. Door menselijke ingrepen (zoals vergraven, dichtrijden en ophogen) en bodemprocessen (zoals inspoeling) kunnen fijne deeltjes in de bodem terechtkomen. De toename van fijne deeltjes heeft grote invloed op de doorlatendheid. In figuur A is de invloed hiervan te zien op de doorlatendheid van een zandmonster. De toename van fijne deeltjes beperkt de doorlatendheid van het matig grove zand (14 m/d) tot een doorlatendheid van zeer fijn zand (0,06 m/d).



Figuur A Invloed deeltjes op doorlatendheid (Kezdi, 1976).

Vooral bij grondsoorten met een hogere doorlatendheid (k-waarde > 1 m/d) heeft de toename van fijne deeltjes grote gevolgen. Hanteer daarom de richtwaarden in tabel A met grote zorgvuldigheid. Om erachter te komen hoeveel fijne deeltjes in een bepaald monster aanwezig zijn, moet u de korrelverdeling van het hele monster (laten) bepalen (zie Indirecte bepaling doorlatendheid).

Kinematische viscositeit

De doorlatendheid hangt af van de temperatuur als gevolg van de viscositeit van water. Viscositeit is de stroperigheid van een vloeistof. De kinematische viscositeit van water is afhankelijk van de temperatuur. Bij 10 graden is de kinematische viscositeit 1,300 * 10^{-6} m^2/s. Hoe kouder het grondwater, hoe groter de viscositeit en hoe lager de doorlatendheid. Het effect van de temperatuur op de doorlatendheid vindt u in tabel A. Aangezien de temperatuur van het grondwater niet veel varieert (circa 10 ºC), varieert de kinematische viscositeit (en dus de doorlatendheid onder het grondwaterniveau) ook niet veel.

Tabel A Richtwaarden kinematische viscositeit
(*Grondwaterzakboekje Bram Bot, 2011)*

Temperatuur [ºC]	Doorlatendheid in relatie tot temperatuur
0	73%
10	100%
20	118%
30	163%

Tervisiedocument Stichting RIONED

1.1.2 Grondwaterstand en -stroming

Bij het ontwerpen van drainage- of infiltratievoorzieningen is naast de bodemopbouw de grondwaterstand een belangrijk omgevingskenmerk.

Grondwaterstanden

Door de hydrologische cyclus op grote schaal; neerslag en verdamping, afvoer via beken en rivieren en watergebruik door vegetatie varieert het grondwaterniveau in de tijd. Een variatie van meer dan 1 meter binnen een jaar is niet ongewoon. De diepte van het grondwaterniveau verschilt per regio en locatie. In stedelijk gebied kan de grondwaterstand op korte afstand flink variëren door aanwezigheid van lekke riolering, ondergrondse constructies, tijdelijke grondwateronttrekkingen (bemalingen), drainage- of infiltratievoorzieningen en verdamping door bomen. Ook de keuze van bouwrijpmaken (integraal opgehoogd, of met een cunettenmethode) is van invloed op de variaties van de grondwaterstand tussen de openbare wegen en particulier terrein.

Meer uitleg over grondwaterstanden is opgenomen op de pagina geohydrologie .

Grondwaterstroming

De doorlatendheid wordt uitgedrukt met dezelfde dimensies als een snelheid. Toch zegt deze waarde niets over de snelheid waarmee het grondwater stroomt: het verhang, de doorlatendheid en de porositeit samen bepalen de stroomsnelheid. Globaal genomen is het verhang van het grondwater in Nederland 0,4 m tot 1 m per km. Bij benadering stroomt grondwater 1.000 tot 2.500 keer zo langzaam als de waarde van de doorlatendheid gedeeld door de effectieve porositeit.

Tervisiedocument Stichting RIONED

1.1.3 Doorlatendheid in de verzadigde zone

Om de werking en invloedssfeer van een toekomstige infiltratie- of drainagevoorziening te bepalen is inzicht gewenst in hoe gemakkelijk het grondwater door de bodem stroomt. Dit is gerelateerd aan de verzadigde doorlatendheid.

De verzadigde doorlatendheid is de capaciteit van de bodem onder de grondwaterstand om water door te laten. De theorie over verzadigde doorlatendheid staat op de pagina theoretische afleiding grondwaterstroming beschreven.

Horizontale versus verticale doorlatendheid

In Nederland geldt over het algemeen de vuistregel dat de verticale doorlatendheid van een formatie 5 tot 10 keer zo klein is als de horizontale doorlatendheid. In de praktijk zijn lokaal aanzienlijke afwijkingen mogelijk.

Natuurlijke processen zetten grondlagen vaak horizontaal af. Denk bijvoorbeeld aan het bezinken van slib en windafzettingen. Daardoor is de bovenste laag het laatst afgezet. Afhankelijk van het soort afzettingsmilieu ontstaat een fijnere of grovere laag.

De variatie in afzettingsmilieu is vooral zichtbaar op macroniveau. Dit is terug te vinden in het geologische afzettingstype, zoals wind, rivier, zee of ijsafzetting. Maar ook op microniveau zijn er verschillen in het afzettingsniveau, bijvoorbeeld door het weer, de stroomsnelheid van de rivier, de temperatuur, een overstroming of stormvloed. Door deze variatie op microniveau is er variatie in de horizontale en verticale doorlatendheid. Hierbij spelen kleine verschillen in de opbouw van de ondergrond een rol. Deze microvariaties zijn alleen te zien in een ongeroerd steekmonster. Bij een boring met een handboor vallen ze weg.

Hydraulische weerstand

De doorlatendheid van klei- en veenlagen is een factor 100 tot meer dan 10.000 lager dan die van zand of grind. Door het optredende drukverschil tussen twee watervoerende lagen stroomt het grondwater in klei- en veenlagen daarom voornamelijk in verticale richting. Meer informatie over kwel en wegzijging is te leven op de pagina grondwatersysteem .

Doorlaatvermogen

Het doorlaatvermogen van een zandlaag is te bepalen door de (gemiddelde) doorlatendheid van een zandpakket (k) te vermenigvuldigen met de dikte (D) van dit zandpakket: kD [m^2/d]. Binnen een (verzadigde) zandlaag wordt vaak uitgegaan van horizontale grondwaterstroming.

Tervisiedocument Stichting RIONED

Tervisiedocument Stichting RIONED

1.1.4 Doorlatendheid in de onverzadigde zone

Bij het aanleggen van infiltratievoorzieningen boven de grondwaterstand is inzicht gewenst in de snelheid waarmee regenwater infiltreert naar het grondwater. In de onverzadigde zone worden de infiltratiesnelheid en -capaciteit bepaald.

Infiltratiesnelheid en -capaciteit

De infiltratiecapaciteit is de maximaal mogelijke infiltratiesnelheid. Deze wordt vaak bepaald bij het ontwerp van voorzieningen die vanaf maaiveld infiltreren. Verschillende (tijdsafhankelijke) factoren bepalen hoe snel het water in en door de bodem kan infiltreren boven de grondwaterstand:

- de doorlatendheid van de grond;
- de grondwaterspiegel;
- het bodemvochtgehalte;
- de doorworteling;
- het bodemleven;
- het humusgehalte;
- de aanwezigheid van voorkeursstroombanen, zoals opengewoelde grond door doorworteling of bodemleven, of scheuren in de bodem door uitdroging.

De infiltratiecapaciteit is dus de maximale capaciteit van de bodem om water op te nemen. Dat is iets anders dan de doorlatendheid. De infiltratiecapaciteit is een bodemeigenschap en afhankelijk van de tijd. Zoals u hierboven ziet, is de infiltratiecapaciteit bijvoorbeeld afhankelijk van de grondwaterstand. De grondwaterstand fluctueert in de tijd. Door grondwaterfluctuatie, neerslag en waterverbruik door planten en bomen fluctueert ook het vochtgehalte in de bodem. Hierdoor varieert de infiltratiecapaciteit ook in de tijd. Dit heeft tot gevolg dat de leeglooptijd van infiltratievoorzieningen ook varieert in de tijd. Een gemeten infiltratiesnelheid/-capaciteit is te vertalen in een ontwerp. Het is belangrijk om in het ontwerp ook rekening te houden met infiltratie in een droge situatie.

Droge bodem (infiltratie vanaf maaiveld)

Algemeen geldt dat de infiltratiecapaciteit van een totaal uitgedroogde bodem nagenoeg nihil is. Denk hierbij aan het water dat in een heel droge zomer na een stortbui op het maaiveld blijft staan en pas na verloop van tijd in de bodem wegzakt. Dit geldt niet als er zogeheten voorkeursstroombanen in de bodem aanwezig zijn, bijvoorbeeld krimpscheuren of graafgangen van bodemdieren.

Tervisiedocument Stichting RIONED

Vochtige bodem

Als de bodem nog redelijk vochtig is maar niet is verzadigd, is de infiltratiesnelheid het hoogst, door de grote zuigspanning. Dan zakt het water snel de bodem in. Naarmate het vochtgehalte dichter bij het maximale vochtgehalte komt (waarbij de grond volledig verzadigd is), neemt de zuigspanning en daarmee de infiltratiecapaciteit af tot een constante infiltratiesnelheid die gelijk is aan de verzadigde verticale doorlatendheid. Op de pagina Theoretische afleiding infiltratiesnelheid vindt u een nadere theoretische toelichting op de infiltratiecapaciteit van de bodem.

Tervisiedocument Stichting RIONED

1.2 Opzet doorlatendheidsonderzoek

Dit onderdeel beschrijft welke onderzoeken nodig zijn om erachter te komen of uw plangebied geschikt is voor hemelwaterinfiltratie of dat drainage van overtollig grondwater nodig is.

Inleiding

Uit onderdeel Doorlatendheid van de bodem van deze module blijkt dat de ondergrond complex en heterogeen is. Hierdoor varieert de doorlatendheid globaal genomen tussen 10^{-6} m/d (klei) en 200 m/d (grind). Een infiltratievoorziening werkt bij een doorlatendheid kleiner dan 0,2 m/d niet (goed). Dus aanleg ervan zónder inzicht in de bodemopbouw en de doorlatendheid rond de infiltratievoorziening is een riskante onderneming. Daarom is onderzoek naar de gebied- en bodemeigenschappen absoluut noodzakelijk. Alleen dan kunt u vanaf het begin van het planproces gefundeerde beslissingen nemen.

Keuze hoofdprincipes

Er zijn drie hoofdprincipes om de doorlatendheid te bepalen. De hoofdprincipes vullen elkaar aan en versterken elkaar als ze een eenduidig beeld geven. Een combinatie van de verschillende methoden geeft dan ook het beste inzicht in de bodem. In onderstaande tabel is weergegeven welk principe voor welke situatie toegepast kan worden.

Tabel A Hoofdprincipes bepaling doorlatendheid

Hoofdprincipes bepaling doorlatendheid	Nauwkeurigheid	Overige voor-/nadelen	Wanneer geschikt?
In situ doorlatendheids-metingen	Meest nauwkeurige methoden (door uitvoering in werkelijke omgeving, met invloed van alle omgevingsfactoren)	Relatief arbeidsintensief, tenzij het gecombineerd kan worden met plaatsen meetpunten.	In de ontwerpfase. In alle gevallen nuttig, zeker als invloedssfeer en dimensionering van voorziening bepaald moeten worden.

Tervisiedocument Stichting RIONED

Laboratorium proeven	Gemiddeld nauwkeurige uitkomsten (niet alle omgevingsinvloeden aanwezig, wel specifieke bodemlagen)	Relatief arbeidsintensief, tenzij het gecombineerd kan worden met plaatsen meetpunten.	In de ontwerpfase. Als de invloedssfeer en dimensionering van de voorziening bepaald moeten worden en wateroverlast geen noemenswaardig risico is.
Indirecte bepaling doorlatendheid	Sondering en boorbeschrijving onnauwkeurig /indicatief. Sterk afhankelijk van betreffende veldwerker. Korrelverdelingsanalyse gemiddeld nauwkeurig.	Minder arbeidsintensief, kan vaak worden meegenomen bij ander onderzoek. In sommige gevallen geeft de indirecte bepaling voldoende informatie.	In de initiatief /definitiefase, als aanvulling op bureauonderzoek. Bepaling of infiltratie wel/niet kansrijk is. Korrelverdelingsanalyse kan ook in ontwerpfase worden toegepast.

Document Stichting RIONED

Maar wanneer volstaat een indirecte bepaling en wanneer is bepaling van de doorlatendheid in het veld of laboratorium noodzakelijk? Dit is afhankelijk van zowel de gebiedskenmerken (bodemopbouw, grondwaterstand, afstand tot bebouwing, gevoeligheid van de bebouwing voor wateroverlast) als van de benodigde effectiviteit van de voorziening.

Voorbeeld

Als uit beschikbare informatie binnen een projectgebied blijkt dat er sprake is van:

- een dik grof zand-/grindpakket vanaf maaiveld;
- een lage grondwaterstand (2 m onder maaiveld);
- een beperkte hoeveelheid water die geïnfiltreerd moet worden;
- geen kwetsbare panden nabij de voorziening,

dan kan de afweging worden gemaakt om geen doorlatendheidsonderzoek in het veld of laboratorium uit te voeren. De waterbalans binnen het project kan gemaakt worden met een analytische berekening waarin een ruime onzekerheid van de doorlatendheid wordt meegenomen. Er is genoeg zekerheid dat de voorziening het

regenwater snel genoeg infiltreert. Als twee of meer van de genoemde punten kritischer worden voor de effectiviteit en/of invloedssfeer van de voorziening dan is doorlatendheidsonderzoek in het veld en/of laboratorium aan te bevelen.

Valkuilen bij het niet bepalen van de doorlatendheid in het veld/laboratorium zijn:

- Er wordt een risico genomen m.b.t. de werking van de voorziening. Hierdoor kan overlast ontstaan na aanleg van de voorziening;
- Er vindt over- of onderdimensionering van de voorziening plaats.

Er dient per project afgewogen te worden wat de meest doelmatige en duurzame aanpak is.

Weging van het waterbelang (voorheen watertoets)

Gemeente en waterbeheerder inventariseren de mogelijkheden voor infiltratie en/of drainage vaak tijdens de weging van het waterbelang. Hierin stemmen zij – in overleg met de initiatiefnemer – de wensen en eisen rond de waterhuishouding af. Hiermee waarborgen ze dat in ruimtelijke plannen voldoende rekening wordt gehouden met water. De weging van het waterbelang beslaat het hele proces van vroegtijdig informeren, adviseren, afwegen en uiteindelijk beoordelen van waterhuishoudkundige aspecten in ruimtelijke plannen en besluiten. Naast de mogelijkheden voor infiltratie en/of drainage inventariseren de betrokken partijen eventuele risico's voor de (grond) waterhuishouding. De weging van het waterbelang is een continu proces over de verschillende planfasen.

Ondergrond en grondwaterniveau leidend

In de praktijk volgt het ontwerp van een voorziening aan het maaiveld (infiltratie) of ondergrondse voorzieningen (infiltratie of drainage) vaak op het ontwerp van de bovengrond. Eerst ontstaat een inrichtingsplan of stedenbouwkundig ontwerp, daarna bekijkt de gemeente welke onderzoeken nodig zijn om het plan te realiseren. Omdat de ondergrond zonder kostbare, technische ingrepen niet is aan te passen, moet het inrichtingsplan rekening houden met de kwaliteiten en beperkingen van de ondergrond. Naast de ondergrond zelf speelt grondwater een belangrijke rol. De grondwaterstand beïnvloedt de mogelijkheden om hemelwater te infiltreren. Daarnaast vult de infiltratie van het neerslagoverschot het grondwater aan. Bij het afkoppelen van bestaande verharde oppervlakken kan deze extra hemelwaterinfiltratie grote invloed hebben op het toekomstige grondwaterniveau.

Door deze kenmerken in een vroeg stadium in beeld te brengen, kunnen ze leidend zijn voor de bovengrondse inrichting. Hierdoor zijn veel onnodige kosten en problemen in de ontwerp en aanlegfase te voorkomen. Zo kunt u

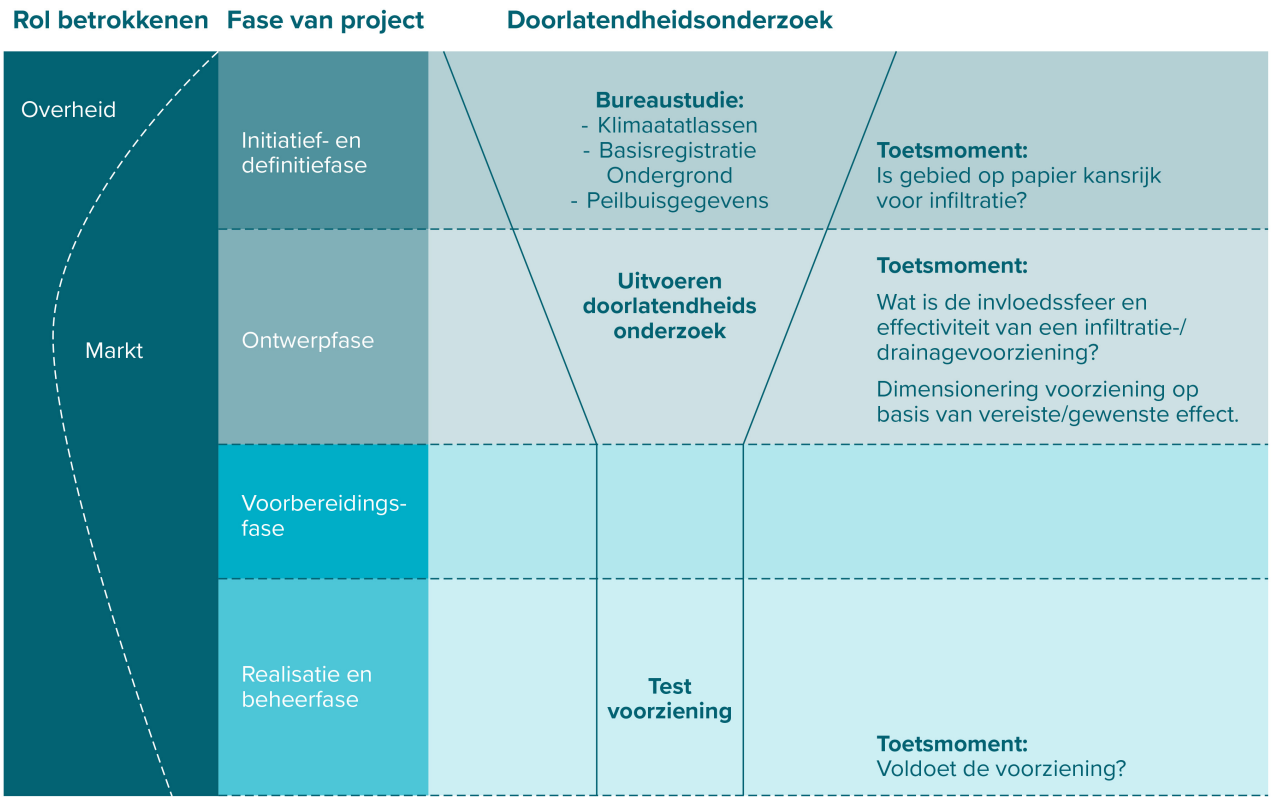
Tervisiedocument RIONED

infiltratievoorzieningen op geschikte plaatsen aanleggen en bij de (her)inrichting van een plangebied rekening houden met een minimale ontwateringsdiepte.

De onderzoeksopzet is dus afhankelijk van de lokale omstandigheden. Dit geldt voor zowel plangebieden van tientallen hectares als kleinschalige projecten.

Voorbeeld kleinschalig project

Bij kleinschalige projecten kunt u denken aan de aanleg van een infiltratieriool door het afkoppelen van een woonwijk bij de vervanging van een gemengd stelsel. De bodemopbouw, de doorlatendheid en het grondwaterniveau over het riooltracé kunnen wisselen. Uit onderzoek moet blijken of de bodem geschikt is voor de aanleg van een infiltratieriool op de gewenste diepte.



Figuur A Onderzoekstrechter doorlatendheid.

De onderzoekstrechter in figuur A beschrijft het proces tot aan de realisatie- en beheerfase van een infiltratievoorziening. Dezelfde stappen doorloopt u voor een drainagevoorziening. Dit deel van de Kennisbank beperkt zich tot de projectfasen tot aan de realisatie. In Infiltratievoorzieningen vindt u meer informatie over het beheer en testen van infiltratievoorzieningen, in Drainagevoorzieningen over het beheer van drainagevoorzieningen.

Tervisiedocument Stichting RIONED

1.2.1 Onderzoeksopzet per projectfase

Deze pagina beschrijft welke stappen er globaal in de verschillende projectfasen doorlopen worden met betrekking tot doorlatendheidsonderzoek.

Om erachter te komen of uw plangebied geschikt is voor bijvoorbeeld infiltratie, zijn verschillende onderzoeken nodig (zie figuur A). De bijbehorende onderzoeksopzet loopt parallel met de fasen in het ontwikkelproces:

- De initiatief- en definitiefase:
  - initiatieffase: de periode waarin u op basis van literatuur en gesprekken nagaat welke aandachtspunten er zijn voor (grond)water en bodem;
  - definitiefase (inclusief weging van het waterbelang/omgevingsplan): de fase waarin u de volgende vragen beantwoordt en uitwerkt:
    - Zijn binnen het plangebied delen meer of minder geschikt voor bebouwing en/of infiltratie.
    - Wat is de huidige ontwatering? Bij te kleine ontwatering: wordt het gebied opgehoogd? Indien dit niet mogelijk is: wordt drainage aangelegd?
    - Hoe wordt omgegaan met de afvoer van hemelwater?

  In deze fase vinden beperkt doorlatendheidsmetingen in het veld plaats.
- De ontwerpfase: de periode waarin de initiatiefnemer (gemeente / provincie / Rijkswaterstaat / projectontwikkelaars / woningcorporatie) een stedenbouwkundig ontwerp en eventueel het bestemmingsplan opstelt. Waar nodig vindt aanvullend doorlatendheidsonderzoek plaats.

Stroomschema

Het stroomschema in figuur A laat zien welk onderzoek op welk moment wenselijk is. Ook uw rol als initiatiefnemer staat hierin. In het stroomschema staan vier uitgangssituaties:

- Afkoppelen van bestaand gebied. Hier gaat het om het afkoppelen van de hemelwaterafvoer van het gemengde riool.
- De aanleg van drainage in een (bestaand) gebied.
- Een te ontwikkelen gebied (> 1 ha). Hier gaat het om grootschalige inbreidingen, sloop en herbouw van panden.
- Een te ontwikkelen perceel (< 1 ha). Hier gaat het om kleinschalige inbreidingen, sloop en herbouw van panden.

Tijdens de fasen van planvorming tot uitvoering komen de volgende onderzoeken aan bod:

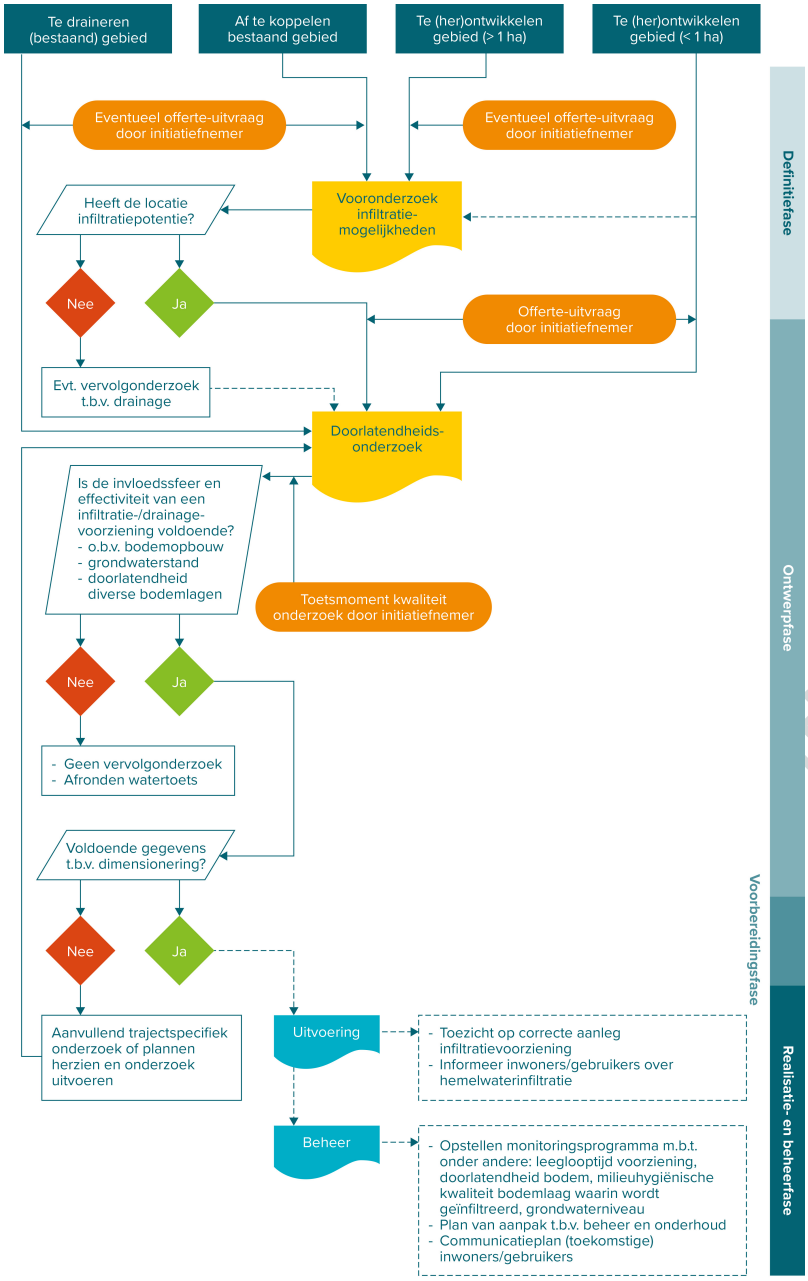
- Vooronderzoek infiltratiemogelijkheden (initiatief- en definitiefase) (zie Vooronderzoek infiltratiemogelijkheden (initiatief-/definitiefase)).
- Doorlatendheidsonderzoek (ontwerpfase) (zie Doorlatendheidsonderzoek (ontwerpfase)).

Tervisiedocument Stichting RIONED

Met name bij kleine inbreidingsplannen (< 1 ha) kunt u een beknopt vooronderzoek combineren met het doorlatendheidsonderzoek.

De onderliggende pagina's lichten de opzet van de twee onderzoeken toe. Elke situatie is anders en verdient maatwerk. In het algemeen geldt dat meer onderzoek beter inzicht biedt en de risico's vermindert.
De onderzoeksresultaten vormen de input voor de ontwerpberekeningen. De ontwerper vertaalt de bepaalde verzadigde doorlatendheid (een bandbreedte) naar een ontwerpdoorlatendheidsfactor door een veiligheidsfactor toe te passen.
Deze module geeft geen relatie aan tussen de op basis van de gepresenteerde onderzoeksopzetten verkregen k-waarden en veiligheidsfactoren. Wel geldt: hoe representatiever of hoger de k-waarden, hoe lager de toe te passen veiligheidsfactor op de bepaalde k-waarden.

Tervisiedocument Stichting RIONED



Figuur A Stroomschema aanpak doorlatendheidsonderzoek.

Tenvis ting RIONED

1.2.1.1 Vooronderzoek infiltratiemogelijkheden (initiatief-/definitiefase)

Tijdens de initiatief/definitiefase start een vooronderzoek naar de infiltratiemogelijkheden. Doel hiervan is in een vroeg stadium na te gaan of een gebied geschikt is voor hemelwaterinfiltratie. Dit onderzoek kan de initiatiefnemer zelf uitvoeren, eventueel met hulp van een adviesbureau.

Het vooronderzoek bestaat uit drie onderdelen:

1. Onderzoek naar de infiltratiepotentie van het plangebied.
2. Onderzoek naar de grondwaterstand.
3. Onderzoek naar de bodemopbouw tot op grotere diepte.

Onderzoek infiltratiepotentie plangebied

Om te bepalen of een gebied infiltratiepotentie heeft, is antwoord op de volgende vragen nodig:

- Bestaat het bovenste deel van de bodem uit materiaal anders dan klei of veen?
- Is de grondwaterstand te hoog?
- Komen in dit gebied leem- of andere stoorlagen voor?
- Ligt het gebied in de invloedszone van een grondwateronttrekking of permanente bemaling (zoals een tunnel, verdiepte weg of parkeergarage) die in de toekomst kan worden aangepast? Bij het stopzetten van grondwateronttrekkingen stijgt de grondwaterstand.
- Bevinden zich (toekomstige) ondergrondse objecten nabij de infiltratielocatie?
- Ligt het gebied in de invloedzone van een grote rivier? Bij hoogwater in de rivier kan het rivierwater via de infiltratievoorziening in de vorm van kwel naar boven komen.
- Ligt het gebied in een grondwaterbeschermingsgebied? De ontwikkeling van infiltratie-/drainagesystemen kent daar een beperking.

Is het antwoord op de vragen ‘nee’, dan is het gebied mogelijk geschikt voor hemelwaterinfiltratie. Bij een of meer bevestigende antwoorden zijn aanvullende maatregelen nodig om hydrologisch neutraal te kunnen bouwen zonder grondwateroverlast te veroorzaken. Hierbij kan vervolgonderzoek voor het drainageplan nodig zijn.

Voor de antwoorden zijn verschillende informatiebronnen beschikbaar, zoals:

- de Basisregistratie Ondergrond (BRO) / DINOloket van TNO [www.dinoloket.nl]: hier zijn boringen, sonderingen en grondwaterstandmetingen te vinden;
- provinciale of gemeentelijke informatiesystemen (vaak als internetapplicaties).

Tervisiedocument Stichting RIONED

- Basisregistratie Grootschalige Topografie (BGT);
- informatiesystemen van de waterschappen (geohydrologie, gebiedskennis, stuwpeilen en grondwaterstandgegevens);
- waterkansenkaarten;
- klimaatatlassen;
- al uitgevoerde verkennende bodem-, explosieven- en archeologische onderzoeken;
- grootschalige grondwatermodellen;
- afgegeven bouwvergunningen;
- bodemkaart van Stiboka.

Onderzoek grondwaterstand

Voor het bepalen van de GHG in het plangebied zijn grondwaterstandmetingen nodig. Daarnaast moet u tijdens de definitiefase verder kijken dan alleen naar het gebied zelf. Een ontwikkeling mag immers niet leiden tot grondwateroverlast in de omgeving. Daarom moet u de GHG voor het plangebied en voor de omgeving bepalen. Hiervoor hebt u meetgegevens van grondwaterstanden nodig. Als deze niet beschikbaar zijn, kunt u gegevens van andere peilbuizen in de omgeving gebruiken om een betrouwbare inschatting van de GHG te maken. Zijn deze niet (voldoende) aanwezig, dan hebt u een of meerdere peilbuizen met een datalogger nodig.

Vroeg meten

Omdat de planvorming meestal meerdere jaren in beslag neemt, is het grondwaterniveau ook over meerdere jaren te monitoren. Door zo vroeg mogelijk grondwaterstanden te verzamelen, hebt u al in de beginfase van de planontwikkeling inzicht in de reactie van het grondwaterniveau op hevige buien en de lokale fluctuatie over meerdere jaren. In combinatie met beschikbare lange reeksen meetgegevens kan een kortere hoogfrequente meetperiode (van minimaal een jaar) ook een bruikbaar inzicht in de te verwachten GHG opleveren.

Plaats bij gebieden met voornamelijk infiltratie de peilbuizen aan de rand (stroomopwaarts en -afwaarts) van het plangebied. Zo kunt u het verhang van het grondwater binnen het plangebied bepalen. Bij poldergebieden (waarbij polderpeilen de belangrijkste regulerende factor zijn) moet u de peilbuizen zo ver mogelijk van de watergangen (laten) plaatsen. Voor het plaatsen van een peilbuis wordt eerst een gat geboord. Laat van deze boring ook een boorbeschrijving maken. Zo krijgt u relatief eenvoudig informatie over de bodemopbouw en de grondwaterfluctuatie. Als uw gemeente of het waterschap een grondwatermeetnet heeft, kunt u de peilbuis(zen) hierin opnemen.

De bovenkant van de peilbuis moet u (laten) inmeten ten opzichte van NAP. Meet het grondwaterniveau ten opzichte van de bovenkant van de peilbuis, omdat de maaiveldhoogte tijdens het bouwrijp maken meestal wijzigt door afgraven en/of ophogen. Daarnaast zijn hiermee de grondwaterstanden om te rekenen naar hoogten ten opzichte van NAP, waardoor ze te vergelijken zijn met andere grondwatermeetgegevens in de omgeving.

Tervisiedocument Stichting RIONED

Onderzoek diepe bodemopbouw

Sonderingen dragen bij aan het inzicht in de bodemopbouw tot op grotere diepte. Uit sondeergegevens kan bijvoorbeeld blijken dat op 3 m beneden maaiveld een kleipakket zit. Dan kan dit aanleiding zijn om de omvang van het kleipakket nader te bepalen tijdens het oriënterend doorlatendheidsonderzoek in de ontwerpfase. Het kan namelijk een plaatselijke lens of een aaneengesloten laag betreffen. Via een doorkijk naar de diepere ondergrond (> 4 m -mv) en meer onderzoek nabij de randen van het plangebied is te voorkomen dat de aanleg van infiltratievoorzieningen in het plangebied of elders (in een lagergelegen gebied) grondwateroverlast veroorzaakt.

Tervisiedocument Stichting RIONED

1.2.1.2 Doorlatendheidsonderzoek (ontwerpfase)

Uit het vooronderzoek volgt of het plangebied geschikt is voor hemelwaterinfiltratie (potentie). Vervolgens vindt in de ontwerpfase een doorlatendheidsonderzoek plaats. Doel hiervan is nader te bepalen in welke mate de bodem in het plangebied echt geschikt is voor hemelwaterinfiltratie en waar infiltratiemogelijkheden zijn.

Infiltratie of drainage

Uit het grondwateronderzoek voor een nieuwbouwontwikkeling kan blijken dat een gebied in huidige vorm niet geschikt is voor bebouwing. Ophoging van het gebied behoort dan tot de mogelijkheden, drainage is in nieuwbouwontwikkelingen niet het uitgangspunt.

Blijkt uit het vooronderzoek dat de locatie niet (het hele jaar) geschikt is voor hemelwaterinfiltratie? Dan betekent dit niet dat de geplande ontwikkeling niet kan doorgaan. Uit het vooronderzoek kan blijken dat er bodemverbetering nodig is en waterafvoer geen probleem is. Doorlatendheidsonderzoek is dan niet altijd nodig. Als de grondwaterstand een deel van het jaar te hoog staat voor infiltratie moet u wel bekijken welke technieken u kunt inpassen om het regenwater in het plangebied te verwerken. Bijvoorbeeld met een combinatie van hemelwaterberging en -infiltratie in droge tijden en afvoer van overtollig hemel- en grondwater (drainage) in natte tijden. Hierdoor kan schade als gevolg van te lage grondwaterstanden (zettingen, funderingschade en droogteschade aan groen) worden tegengegaan.

Voor het opstellen van een drainageplan is ook informatie nodig over de bodemopbouw, grondwaterstanden en bodemdoorlatendheid. Bij voorzieningen die zowel infiltrerend als drainerend werken en soms boven en soms onder het grondwaterpeil liggen, kan er veel contact zijn tussen grondwater en zuurstof. Als in het grondwater ijzer of mangaan aanwezig is en dit komt in aanraking met zuurstof, treedt oxidatie op. Hierdoor neemt de doorlatendheid van de bodem af en kan de infiltratie- en/of drainagevoorziening verstopt raken.

Richtpunten onderzoek

- Een doorlatendheidsonderzoek moet (minimaal) inzicht geven in: bodemopbouw en geohydrologie;
  - grondwaterstandfluctuatie;
  - doorlatendheid van diverse (boven elkaar liggende) bodemlagen.

Naast een bureaustudie bestaat dit onderzoek uit veldwerkzaamheden in de vorm van handboringen en doorlatendheidsmetingen (zie Doorlatendheidsmetingen in het veld (in-situ) en Indirecte bepaling doorlatendheid).

Tenvisledocument Stichting RIONED

Andere methoden kunnen de bodemclassificatie en de resultaten van de veldmetingen verifiëren, zoals een korrelverdelingsanalyse (zie Indirecte bepaling doorlatendheid).

Uit het vooronderzoek zal blijken hoe ver de GHG beneden maaiveld ligt. Bij gebieden groter dan 1 ha hebt u (indien nodig) al tijdens het vooronderzoek extra peilbuizen geplaatst en sonderingen gedaan. Ook bij gebieden kleiner dan 1 ha (waarbij het vooronderzoek deel uitmaakt van dit doorlatendheidsonderzoek) zijn minimaal één à twee peilbuizen nodig. Dit hoeft niet als in de nabije omgeving van het plangebied voldoende gegevens beschikbaar zijn.

De onderzoeksintensiteit is maatwerk en mede afhankelijk van de diepte van het grondwater (bij een GHG), de heterogeniteit van de bodem in het gebied en de omvang van de infiltratievoorziening. De keuze voor een methode is sterk afhankelijk van de bodemeigenschappen in uw plangebied. Doorlatendheid van de bodem beschrijft welke methode geschikt is in een bepaalde situatie.

Bij relatief hoge grondwaterstanden (< 1,5 m -mv) heeft het bijvoorbeeld weinig zin om alle boringen tot 4 m -mv door te zetten. Een infiltratievoorziening legt u aan in de onverzadigde zone, boven of nabij de GHG. Bij hoge grondwaterstanden moeten ook enkele doorlatendheidsmetingen in de verzadigde zone plaatsvinden, aangezien het hemelwater betrekkelijk snel bij de grondwatervoorraad komt.

De bodemlagen voor de doorlatendheidsmetingen omvatten minimaal het gebied waarin de voorziening komt te liggen tot 0,5 meter onder de onderkant van de voorziening. De boordiepte is minimaal 1,0 meter onder de onderkant van de voorziening. Om een storende laag te kunnen detecteren, worden een of meerdere boringen doorgezet tot minimaal 2,0 meter onder de onderkant van de toekomstige voorziening.

Onderzoek bij drainage

Het grote verschil in onderzoeksopzet voor de aanleg van drainage is dat alle doorlatendheidsmetingen in de verzadigde zone plaatsvinden. Met het oog op mogelijke roestvorming zijn enkele grondwateranalyses op de parameters ijzer en mangaan aan te raden. Meer informatie hierover vindt u in onderdeel Drainagevoorzieningen .

Tervisiedocument Stichting RIONED

1.2.1.3 Raakvlakken met andere (bodem) onderzoeken

Om een bepaalde nieuwbouwontwikkeling of herinrichting mogelijk te maken, zijn vaak diverse (bodem)onderzoeken nodig. Elk type onderzoek richt zich meestal op een bepaald aspect van de bodem, met als doel na te gaan of er kwaliteiten of knelpunten rond dit aspect zijn te verwachten. Voor doorlatendheidsonderzoek kan de bodemkennis uit andere onderzoeken nuttig zijn en in sommige gevallen kunnen onderzoeken gecombineerd worden.

Mogelijke onderzoeken met betrekking tot de bodem zijn:

1. Een (milieuhygiënisch) verkennend bodemonderzoek. Dit richt zich op de vraag of er voor de voorgenomen ontwikkeling milieuhygi.nische belemmeringen zijn.
2. Een archeologisch onderzoek. Hieruit blijkt of er relevante archeologische vindplaatsen te verwachten zijn.
3. Een geotechnisch onderzoek. Dit is onder meer om de draagkracht van de bodem te onderzoeken voor fundering en stabiliteit.
4. Een munitieonderzoek. Dit richt zich op de niet-gesprongen explosieven uit WO II.

Zo zijn wellicht meerdere onderzoeken te benoemen die eigenlijk allemaal informatie over de bodem verzamelen en relevant kunnen zijn voor het doorlatendheidsonderzoek. Met name om de haalbaarheid van hemelwaterinfiltratie tijdens een vooronderzoek te bepalen. Het gros van deze onderzoeken bevat namelijk boorbeschrijvingen van de bodem.

Onderzoeken gebruiken of combineren

Een doorlatendheidsonderzoek is feitelijk ook een bodemonderzoek. Hiervoor kan informatie uit andere (bodem) onderzoeken zeer bruikbaar zijn. Ook kan combinatie van diverse onderzoeken handig zijn. Zo is voor een omgevingsvergunning vaak een verkennend bodemonderzoek nodig volgens het protocol voor milieuhygiënisch bodemonderzoek (NEN 5740). Tijdens dit onderzoek vinden boringen plaats tot 0,5 en 2,0 m -mv. Door deze diepe boringen tot 4,0 m -mv door te zetten, is wellicht combinatie met doorlatendheidsonderzoek mogelijk.

De peilbuizen die u tijdens een verkennend bodemonderzoek laat plaatsen, zijn niet altijd geschikt om het grondwaterniveau te monitoren. Dat komt omdat deze conform het protocol bij voorkeur in het midden van een

Tervisiedocument Stichting RIONED

onderzoekslocatie moeten worden geplaatst. De juiste locatie van peilbuizen voor een doorlatendheidsonderzoek is afhankelijk van de geohydrologische situatie. Als er toch peilbuizen in het midden van het plangebied nodig zijn, zijn deze ook te gebruiken voor grondwaterstandmetingen.

Tervisiedocument Stichting RIONED

1.3 Valkuilen doorlatendheidsonderzoek

Op deze pagina worden de meest voorkomende valkuilen met betrekking tot doorlatendheidsonderzoek beschreven.

Tabel A geeft verschillende voorbeelden van valkuilen met mogelijke (negatieve) gevolgen en oorzaken.

Tabel A Valkuilen en gevolgen

Mogelijke oorzaak	Valkuilen / voorbeeld	Mogelijk (negatieve) gevolgen
Er is onvoldoende onderzoek gedaan.	Het bureau heeft geen aandacht geschonken aan de lokale geomorfologie en geohydrologie. Hierdoor zijn bijvoorbeeld boringen in een zandige stroomrug geplaatst en niet in de omliggende kleiige komgronden. Het doorlatendheidsonderzoek schetst daardoor het beeld dat de locatie geschikt is voor hemelwaterinfiltratie.	Op den duur kan sprake zijn van (grond) wateroverlast
	Het bureau heeft geen aandacht geschonken aan de diepere ondergrond (> 4,0 m -mv). Vanaf die diepte blijken ondoorlatende lagen te liggen.	In het plangebied of in lagergelegen gebieden kan grondwateroverlast optreden.
	Voor de aanleg van een wadi is één boring met één	

Tervisiedocument Stichting RIONED

	doorlatendheidsproef uitgevoerd. Bij de dimensionering is gerekend met de verkregen K-waarde.	De wadi wordt te ruim of te krap gedimensioneerd.
	Omwille van tijd heeft de gemeente voor aanleg van een wadi geen doorlatendheidsonderzoek laten doen. Uit boringen daarna blijkt dat op 80 cm diepte een leemlaag voorkomt.	De voorziening is niet goed geconstrueerd, waardoor de wadi slecht leegloopt en wateroverlast optreedt.
	Uit het vooronderzoek blijkt dat de bodem mogelijk geschikt is voor hemelwaterinfiltratie. Er zijn geen in-situ doorlatendheidsmetingen gedaan. Er is gerekend met geschatte K-waarden en grondwaterstanden.	De voorziening wordt op basis van verkeerde uitgangspunten gedimensioneerd, waardoor deze mogelijk niet goed werkt en voor wateroverlast zorgt.
	Het bureau heeft gerekend met een K-waarde die het heeft berekend uit een zeefkromme. In de praktijk blijkt de betreffende bodem zeer compact te zijn en is deze minder doorlatend dan op basis van de textuur wordt verwacht.	De voorziening wordt te krap gedimensioneerd, waardoor deze mogelijk niet goed werkt en voor wateroverlast zorgt.
	In het plangebied van 10 ha heeft het bureau slechts één	Er is geen reëel beeld van de doorlatendheid

Tervisiedocument Stichting RIONED

	doorlatendheidsproef gedaan.	van de bodem. De voorzieningen worden op basis van verkeerde uitgangspunten gedimensioneerd, waardoor deze mogelijk niet goed werken en voor wateroverlast zorgen.
De opdrachtgever of uitvoerder van de proeven was niet op de hoogte van het toekomstige maaiveldniveau / ophoogmateriaal / inrichting.	Na het onderzoek hoogt de gemeente de locatie op met zand. Hierdoor hebben de proeven niet in de juiste bodemlaag plaatsgevonden. Door het ophogen worden de bodemlagen ook samengedrukt, waardoor de doorlatendheid veranderd.	De verkregen K-waarden zijn niet bruikbaar voor de dimensionering.
	Er blijkt grondverbetering, drainage en een overloop toegepast te gaan worden. Toch is een opdracht voor het uitvoeren van doorlatendheidsmetingen verstrekt.	De verkregen K-waarden zijn niet bruikbaar.
Er is onvoldoende aandacht besteed aan (de fluctuatie van) het grondwaterniveau.De doorlatendheidsmetingen zijn wellicht op de juiste diepte gedaan, maar in een periode met een lage	De infiltratievoorziening blijkt deels onder water te staan.	Er is onvoldoende berging en het water infiltreert beperkt in de bodem. De voorziening werkt niet goed en kan voor

Tervisiedocument Stichting RIONED

grondwaterstand, waarbij geen rekening is gehouden met een representatief hoge grondwaterstand.		wateroverlast zorgen.
De verkeerde bodemlaag isonderzocht.	De gemeente wil een wadi aanleggen. Het adviesbureau meet de doorlatendheid van de grond net onder de huidige grasmat. Maar de wadibodem komt nog 30 cm dieper te liggen.	De verkregen K-waarden zijn niet bruikbaar voor dimensionering.
	De gemeente wil een IT-riool aanleggen op een diepte van 2,0 m -mv (b.o.b.). het bureau heeft een doorlatendheidsproef uitgevoerd in de laag van 1,0-1,5 m -mv. Voor de dimensionering is gerekend met een K-waarde die niet representatief is voor de bodemlaag waarin infiltratie plaatsvindt.	De voorziening wordt op basis van verkeerde uitgangspunten gedimensioneerd, waardoor deze mogelijk niet goed werkt en voor wateroverlast zorgt.
De doorlatendheidsproef is niet juist uitgevoerd. Het kennisniveau van de uitvoerder van de proef is onvoldoende.	Het bureau heeft doorlatendheidsproeven uitgevoerd, zonder dat de bodem is voorverzadigd . De gepresenteerde K-waardeis daarom niet representatief voor dedoorlatendheid in de bodem.	De infiltratievoorziening wordt te krap gedimensioneerd en zorgt voor wateroverlast.
De uitvoering	De gemeente krijgt van het	Er wordt uitgegaan

Tenvisiedocument Stichting RIONED

(geen herhaling) en/of uitwerking van de resultaten van het doorlatendheidsonderzoek is/zijn onvolledig.	bureau één K-waarde aangeleverd in plaats van een bandbreedte. Dit zorgt voor een schijnnauwkeurigheid. Er moet altijd een bandbreedte van de doorlatendheid worden gerapporteerd.	van een te grote K-waarde waardoor een voorziening te klein gedimensioneerd wordt en wateroverlast kan ontstaan.

RIONED

Praktijkvoorbeeld: infiltratievijver

Een infiltratievijver moet na een hevige regenbui een hoeveelheid neerslag verzamelen die vervolgens via de bodem infiltreert. De doorlatendheid van de bodem speelt daarbij een rol. Hoe lang duurt het voor de vijver weer leeg is of op het oorspronkelijke peil terugkeert? Soms gaan ontwerpers uit van een situatie zoals die tijdens het onderzoek was. Maar de vijver moet ook functioneren na een extreem hevige regenbui. Als de bodem voldoende doorlatend is, heeft het grondwater ook gereageerd op de regenbui. Hoe functioneert een en ander dan? De volgende situaties zijn mogelijk:

- De grondwaterstand na de regenbui is hoger dan het vijverpeil: de vijver infiltreert niet, maar draineert. Pas nadat het grondwaterpeil is gezakt, kan sprake zijn van infiltratie.
- De grondwaterstand bevindt zich tussen vijverpeil en -bodem. Rekening houdend met enige bodemweerstand (bijvoorbeeld door slibvorming) volgt (meestal) infiltratie in neer- en zijwaartse richting.
- De grondwaterstand is (veel) lager dan de vijverbodem, waarbij de vijver v..r de infiltratieperiode mogelijk zelfs droogstaat. Dan is de (verzadigde) doorlatendheid wellicht nauwelijks van belang. Is de bodem niet helemaal uitgedroogd, dan zal de infiltratiecapaciteit (veel) hoger zijn dan de verzadigde doorlatendheid.

Deze voorbeelden gaan uit van de veronderstelling dat de vijver zich in een redelijk tot goed doorlatend materiaal (zand en/of grind) bevindt. Als de bodem en de wanden in een klei- of veenlaag liggen, wordt de situatie weer anders. Want de klei- of veenlaag fungeert als een slecht doorlatende kom. Dan is hooguit te overwegen om die te perforeren. Ook dan is de grondwaterstand/ stijghoogte onder de klei- of veenlaag weer van belang: stroomt het water omhoog of omlaag? Moet u dan de doorlatendheid van de kleilaag (laten) bepalen? Of moet u zand- of grindpalen met een bepaalde capaciteit (laten) ontwerpen?

Kortom, de grootste valkuil lijkt te zijn dat de ontwerper een systeem maakt met onvoldoende begrip van de geohydrologische situatie.

1.4 Methodekeuze directe doorlatenheidsmetingen (in het veld)

Er bestaan diverse methoden om in het veld de doorlatendheid van bodemmateriaal te bepalen. Deze pagina begeleidt u naar de juiste methodekeuze bij directe methoden om de doorlatendheid van de bodem te bepalen.

Directe doorlatendheidsmetingen werken volgens de Continuïteitswet, zie de pagina grondwaterstroming . Ze zijn onder andere handig in de ontwerpfase van een voorziening. Welke directe meetmethode u het best kunt kiezen, is afhankelijk van:

- de diepte van de meting ten opzichte van grondwater (verzadigde of onverzadigde zone);
- het bodemmateriaal.

Onverzadigde zone

Voor metingen van doorlatendheid in de onverzadigde zone zijn twee meetinstrumenten toepasbaar:

- Dubbele ring infiltrometer.

  Voor metingen op of vlak onder maaiveld. Hierin kan zowel een 'falling head' als 'constant head' methode worden toegepast
- De Aardvark

  Voor metingen op enige diepte onder maaiveld, maar nog in de onverzadigde zone. Met de Aardvark wordt de 'constant head' methode toegepast.

Verzadigde zone

Voor metingen van doorlatendheid in de verzadigde zone wordt de volumebalans in peilbuizen of boorgaten op verschillende manieren bepaald.

Volumebalans: zes puntmethoden

Dit onderdeel hanteert de namen zoals de Europese normen prEn ISO/DIS 22282-1 tot en met prEn ISO/DIS 22282-6 aangeven:

- Falling-head
- Rising-head
- Constant-head (verhoging)
- Constant-head (verlaging)
- Constant-flow (verhoging)
- Constant-flow (verlaging)

Tervisiedocument Stichting RIONED

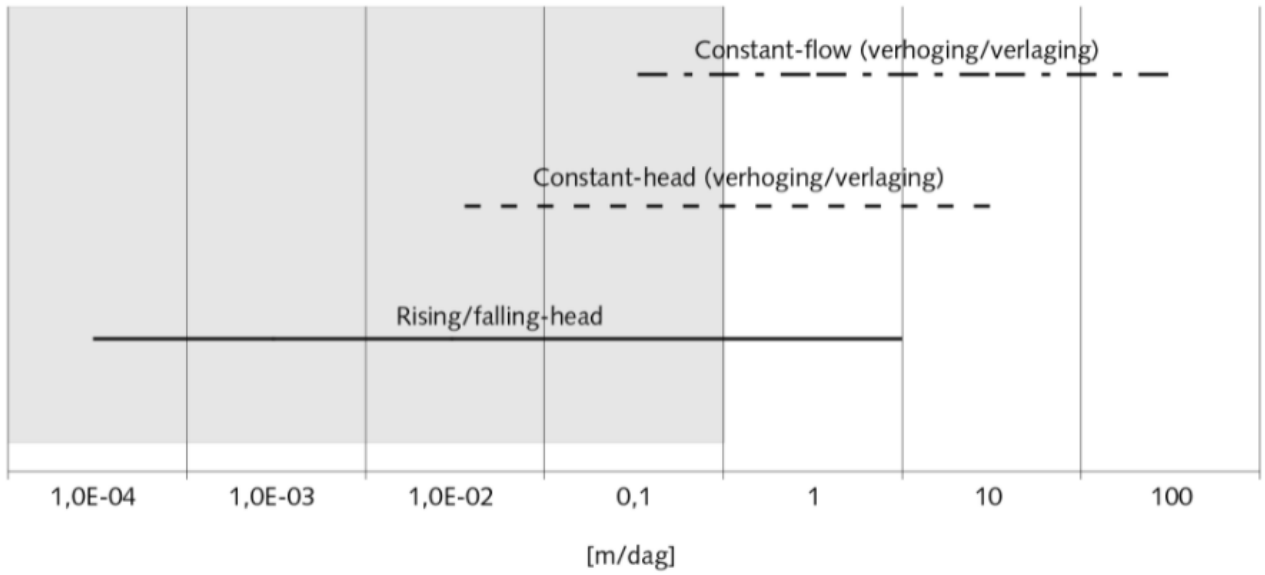
Voor deze zes methoden zijn veel verschillende namen in gebruik (zie tabel A).

Tabel A Verschillende namen voor puntmethoden

Officiële naam volgens Europese norm	**Ook bekend onder de namen**
Falling-head	Falling-headproef, slugtest, omgekeerde Hooghoudtproef, omgekeerde boorgatproef, porchetproef, omgekeerde pompproef, omgekeerde putproef en inversed Auger-Hole.
Rising-head	Hooghoudtproef, rising head-proef, boorgatproef, putproef en Auger-Hole.
Constant-head	Constant-headproef, compact constant-head permeameter (CCHP) en lefrancproef.
Constant-flow	Constant-flowproef, steady-stateproef, constant-debietproef, putproef en stopproef.

De methoden zijn zowel in het veld (in-situ) als in het laboratorium (ex-situ) uit te voeren.

Figuur A geeft de toepassingsgebieden van de zes methoden weer. Het betreft indicatieve grenzen, die zijn gebaseerd op de praktische uitvoerbaarheid van de verschillende methoden. Mits goed uitgevoerd, zijn de toepassingsgebieden uit te breiden.

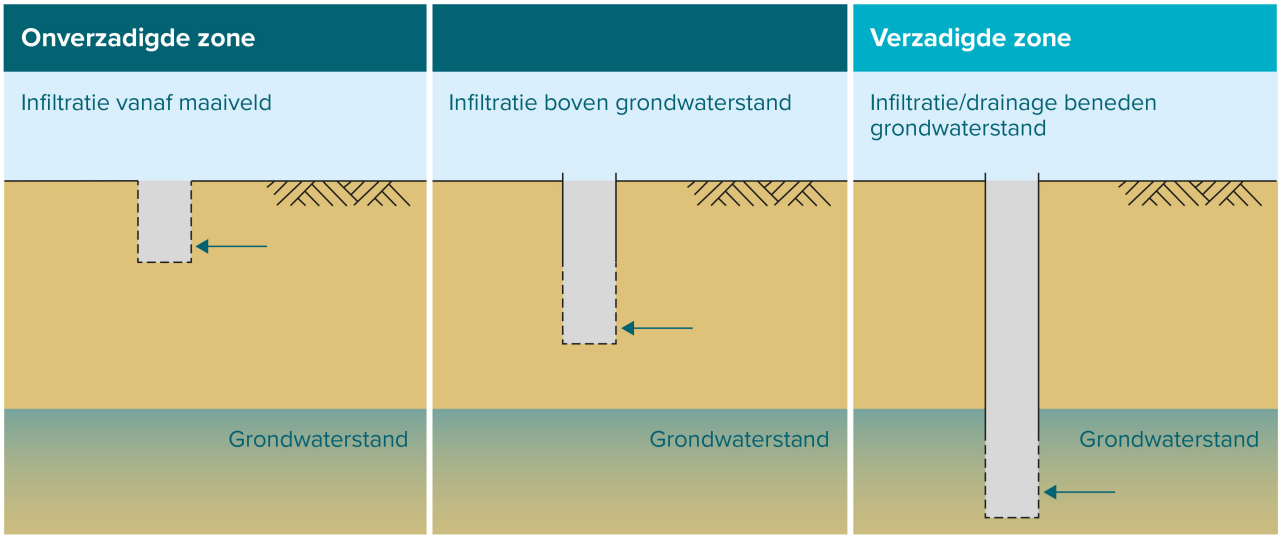


Figuur A Indicatieve range doorlatendheden verschillende methoden (Bron: prEN ISO-DIS 22282-2)

ment Stichting RIONED

Verzadigde/onverzadigde zone

Wanneer u de doorlatendheid wilt bepalen voor een situatie waarbij u vanaf het maaiveld water infiltreert, is een andere methode nodig dan wanneer u water ter hoogte van de grondwaterstand infiltreert. Figuur B geeft de drie te onderscheiden situaties weer. De infiltratie vanaf maaiveld is bijvoorbeeld van toepassing bij de aanleg van een wadi (een bufferings- en infiltratievoorziening). De middelste methode – infiltratie iets dieper onder het maaiveld maar boven de grondwaterstand – is bijvoorbeeld van toepassing bij de aanleg van een IT-riool. De situatie rechts is van toepassing bij de aanleg van drainage of het infiltreren van (hemel)water onder de grondwaterstand.



Figuur B Locatie infiltratie of drainage ten opzichte van grondwaterstand en maaiveld.

Bodemmateriaal

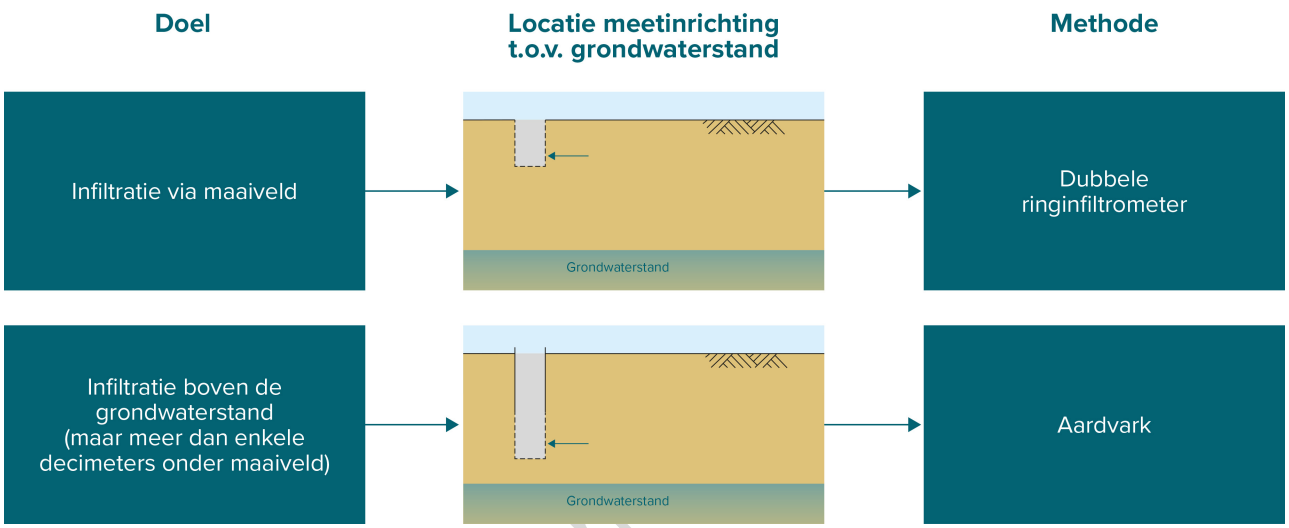
De keuze voor de meetmethode is naast de grondwatersituatie afhankelijk van het bodemmateriaal. Maak van tevoren een inschatting van de doorlatendheid. Dit is nodig om tot een keuze voor de meetmethode te komen (zie ook tabel 2.1 en figuur 3.2). De inschatting kunt u maken met behulp van uitgevoerde boringen of bijvoorbeeld data van het DINOloket /BRO of PDOK.

In dit onderdeel is gekozen om drie classificaties van het bodemmateriaal te maken:

- Goed doorlatend: matig grof zand tot grind (indicatief > 5 m/d).
- Matig doorlatend: zandige leem en matig fijn zand (indicatief 1-5 m/d).

- Slecht doorlatend: klei, zandige klei en leem zonder bijmenging (indicatief < 1 m/d).

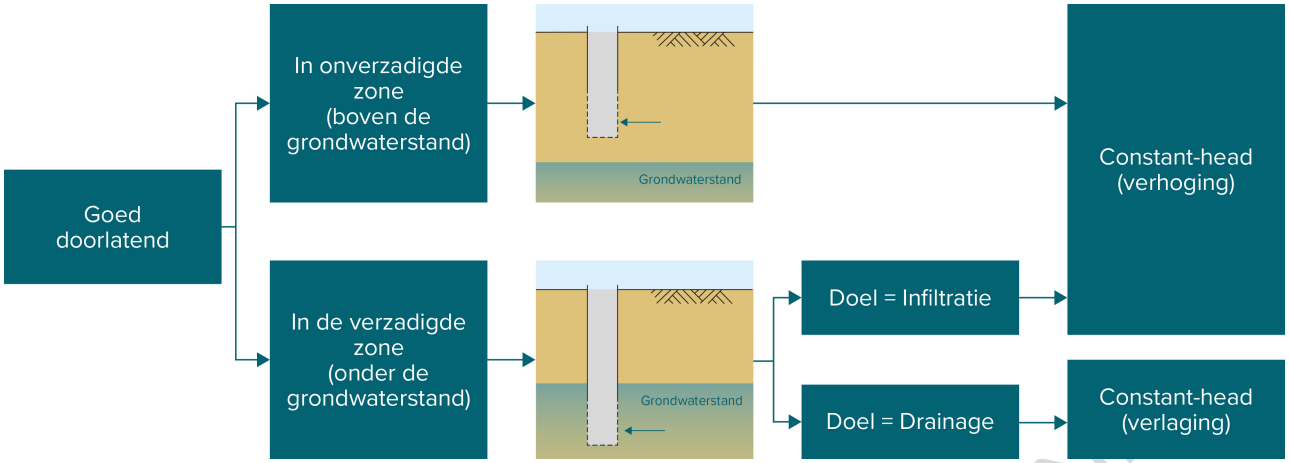
Om de doorlatendheid vlak onder het maaiveld te bepalen, is de dubbele-ringinfiltrometer de beste methode. Dit is onafhankelijk van het bodemmateriaal. Alleen als de bodem extreem goed of slecht doorlatend is, is de test mogelijk niet uitvoerbaar. Een alternatief is dan om (ongeroerde) monsters te nemen en labproeven of een korrelverdelingsanalyse te laten uitvoeren (zie Laboratoriumproeven verticale doorlatendheid en Indirecte bepaling doorlatendheid)



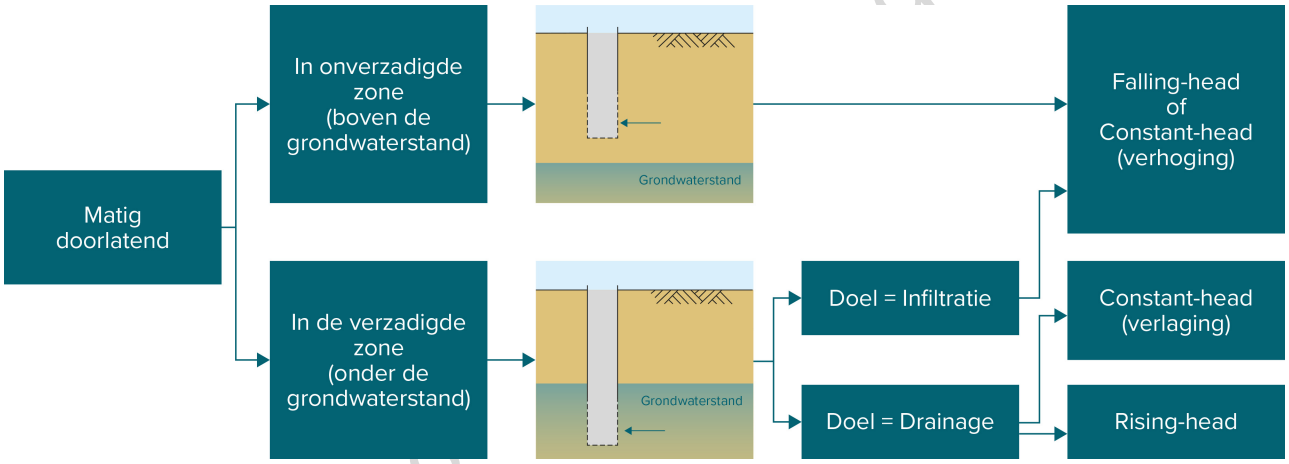
Figuur C Meetmethoden bij infiltratie boven de grondwaterstand..

Door de schema's in de figuren D, E en F te volgen – met als startpunt een grove inschatting van de bodemdoorlatendheid – kunt u bepalen welke methode het best aansluit bij uw situatie. Maak de grove inschatting liefst vóór het veldwerk of uiterlijk na de boring.

Tervisiedocument

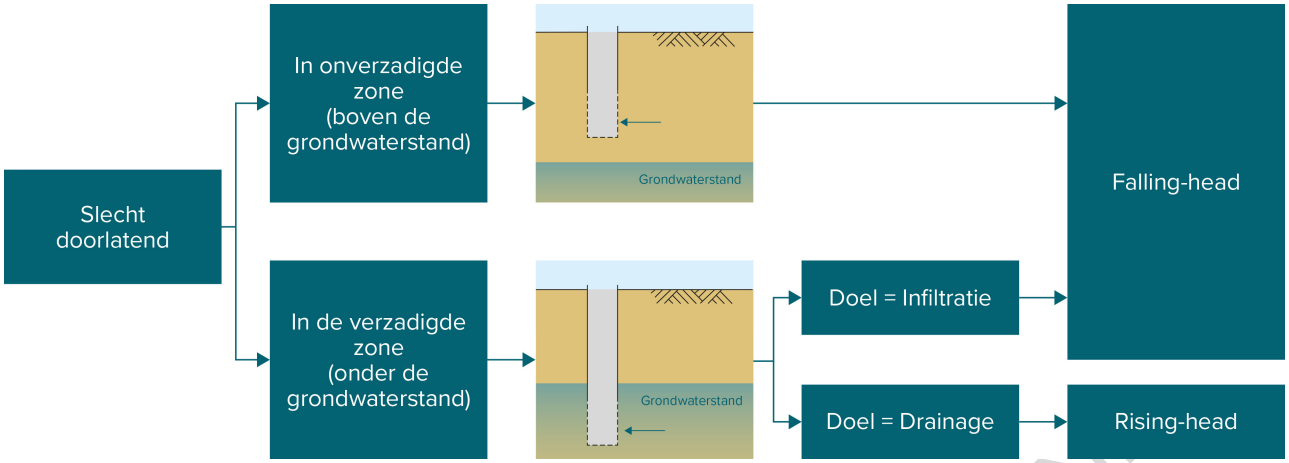


Figuur D Keuze meetmethode bij goed doorlatend bodemmateriaal..



Figuur E Keuze meetmethode bij matig doorlatend bodemmateriaal (zandige leem en matig fijn zand)..

Tervisiedoor RIONED



Figuur F Keuze meetmethode bij slecht doorlatend bodemmateriaal.

Tervisiedocument Stichting RIONED

1.4.1 Algemene uitgangspunten doorlatendheidsmetingen in het veld

Dit onderdeel beschrijft de algemene uitgangspunten voor metingen in het veld om de verzadigde doorlatendheid te bepalen, zowel boven als onder het grondwater.

Hieronder komen de algemene uitgangspunten voor de uitvoering van in situ doorlatendheidsmetingen aan de orde.

Algemene uitgangspunten

In de concept-ISO-normering prEN ISO-DIS 22282-2 vindt u een uitgebreide beschrijving van de meetopstelling en de uitvoering van de metingen.

Meetopstelling

In de concept-ISO-normering prEN ISO-DIS 22282-2 vindt u een uitgebreide beschrijving van de meetopstelling en de uitvoering van de metingen. Hieronder vindt u een korte toelichting op beide.

Vooraf vindt een boring plaats om de bodemopbouw, de diepte van het meettracé en de daaronder mogelijk voorkomende stoorlagen te bepalen. Handboorgaten hebben normaal gesproken een diameter tussen de 0,05 en 0,10 m. Vervolgens boort de veldmedewerker een nieuw gat tot in de laag waarvan u de doorlatendheid wilt laten bepalen. De diepte van het boorgat is afhankelijk van het traject waarover de doorlatendheid moet worden bepaald. Maar ook de aard, de dikte en de opeenvolging van de bodemlagen zijn van belang.

Plaatsen peilbuis

In het boorgat plaatst de veldmedewerker meestal een peilbuis, waarin de meting kan plaatsvinden. Dit voorkomt onder andere dat het boorgat instort. Het is belangrijk dat de veldmedewerker de peilbuis op de juiste manier plaatst. Aandachtspunten hierbij zijn bijvoorbeeld de filterstelling en de filteromstorting (zie het Handboek meten van grondwaterstanden in peilbuizen). De feitelijke diameter van het boorgat is groter dan die van de peilbuis. Houd hiermee rekening bij het bepalen van de doorlatendheid. Doorlatendheidsmetingen in bestaande peilbuizen kan alleen nauwkeurig gedaan worden als de filterstelling, aanwezigheid van filtergrind en locatie van zwelklei bekend zijn. Bovendien moet de diameter van het boorgat bekend zijn en de peilbuis onvervuild zijn.

Versmering

Tervisiedocument Stichting RIONED

Als een ervaren veldmedewerker op de juiste manier met het juiste materiaal boort, is versmering (vrijwel) altijd te voorkomen. Versmering heeft een negatieve invloed op de uitkomsten van de meetmethode. Bij (vermoeden van) versmering dient het boorgat geborsteld te worden.

Wachten

Na het boren en het plaatsen van een peilbuis/filter moet de veldmedewerker wachten tot de grondwaterstand weer terug is op het oorspronkelijke niveau, anders klopt het beginpunt van de test niet.

Meten in verticale infiltratiebuizen

In verticale infiltratiebuizen zijn ook metingen mogelijk. Dit kan zelfs zeer wenselijk zijn om na de aanleg en in de gebruiksfase de infiltratiecapaciteit te bepalen. De meetopstelling is hierbij dezelfde als bij een peilbuis, alleen is de diameter van een verticale infiltratie groter (0,3 - 0,8 m).

Uitvoering

Bij alle methoden moet de veldmedewerker na de proef de bodemopbouw onder de locatie van de meting in beeld brengen (circa 0,5 m dieper boren). Hiermee wordt duidelijk of vlak onder de meetlocatie een ondoorlatende laag zit. Dit is van belang om de juiste formule te kunnen kiezen. De diepte van de eerstvolgende ondoorlatende of slecht doorlatende laag beïnvloedt het meetresultaat. Voor de betrouwbaarheid vindt een meting per locatie minimaal twee keer plaats. Hierdoor is ook de kans groter dat dichtgesmeerde poriën zich weer openen.

Barometrische compensatie

De grondwaterstand is met een datalogger te meten. Hierbij wordt de druk (water- en luchtdruk) gemeten. Bij metingen korter dan twee uur is barometrische compensatie niet nodig. Veelal is een langere meting overbodig, omdat bij een twee uur durende meting duidelijk is dat de bodem slecht doorlatend is en kan de meting gestaakt worden. Als het toch wenselijk is de meting met een datalogger langer door te zetten, is het nodig de gemeten waterdruk barometrisch te compenseren. Hierbij wordt de variatie in de luchtdruk gedurende de duur van de meting verrekend met de gemeten druk onder het grondwater. Alleen de verandering van de waterdruk moet immers worden gemeten. Deze verrekening is nodig, omdat de luchtdruk binnen de duur van de meting (meerdere uren) en afhankelijk van het weer aanzienlijk kan wijzigen.

Verzadigingstijd

Tervisiedocument Stichting RIONED

Bij metingen boven de grondwaterstand is een bepaalde tijd nodig om de bodem te verzadigen. Pas dan is de verzadigde doorlatendheid te meten. Dit gebeurt door de peilbuis regelmatig (bij) te vullen met water, bijvoorbeeld met een dompelpomp. Als bij constante watertoevoeging het water niet meer daalt ('steady state'), heeft voldoende verzadiging plaatsgevonden. Algemeen geldt: hoe groter de doorlatendheid, hoe korter de verzadigingstijd.

De verzadigingstijd is vooraf met een inschatting van de doorlatendheid te bepalen. Voor geschatte doorlatendheden van zeer hoog tot circa 1,0 m/d is minimaal 12 minuten voorverzadiging nodig. Bij doorlatendheden tussen circa 1,0 en 0,1 m/d minimaal 36 minuten. Voor lagere doorlatendheden is theoretisch gezien nóg langere voorverzadiging nodig. Bij onvoldoende voorverzadiging geldt een deel van de meting als voorverzadiging (dit blijkt uit de meetgrafiek).

Uitwerking meetresultaat

De uitwerking van de meetresultaten is per methode verschillend. Per methode is een toelichting op de bijbehorende formules, een rekenvoorbeeld en specifieke aandachtspunten opgenomen.

Algemene aandachtspunten

De algemene aandachtspunten zijn:

- Geef de veldwerker een verwachting mee hoe lang een meting ongeveer moet duren op basis van de bodemopbouw. Vraag de veldwerker contact op te nemen als dit in de praktijk aanzienlijk anders is, zodat eventueel een extra locatie, andere diepte van de meting of nieuw boorgat/peilbuis besproken kan worden.
- Bij slecht doorlatende bodems kan het enkele uren duren voordat de grondwaterstand na het boren weer op het beginniveau is. Als de grondwaterstand bij de start van de meting niet ge-heel terug is op het beginniveau, klopt het beginpunt van de test niet.
- Dichtvloeien of instorten van het boorgat beïnvloedt het volume van het boorgat en levert een foutief berekende k-waarde op. Dit komt vaak voor in goed doorlatende zandige bodems. In dat geval moet de veldmedewerker een filter gebruiken.
- Bij metingen boven de grondwaterstand is voorverzadiging nodig, anders levert de meting een foutieve (hogere) waarde op dan de werkelijke verzadigde doorlatendheid. Dat komt doordat dan deels berging in de bodem wordt gevuld. Daarom moet de veldmedewerker altijd controleren of een zogenaamde 'steady state' is bereikt.
- Het goed isoleren van een bepaald tracé met een precisiefilter en zwelklei is niet eenvoudig. Zwelklei heeft tijd nodig om uit te harden. Als de afdichting niet goed is gelukt, wordt ook buiten het gewenste tracé gemeten (lekkage langs het filter en filtergrind).
- De formules gaan uit van de diameter van het boorgat, niet van de peilbuis of het filter.

Tervisiedocument Stichting RIONED

1.4.2 Theoretische afleiding infiltratiesnelheid

Deze pagina beschrijft de theorie van de infiltratiesnelheid en -capaciteit in de onverzadigde zone.

De doorlatendheid is een eigenschap van de grondsoort. De verzadigde doorlatendheid is niet gelijk aan de infiltratiecapaciteit. De infiltratiecapaciteit of infiltratiesnelheid is van toepassing in de onverzadigde zone en is volgens een andere formulering van de wet van Darcy weer te geven:

$$v = k_T \frac{\phi + z + h}{z} \qquad \text{(B4.1)}$$

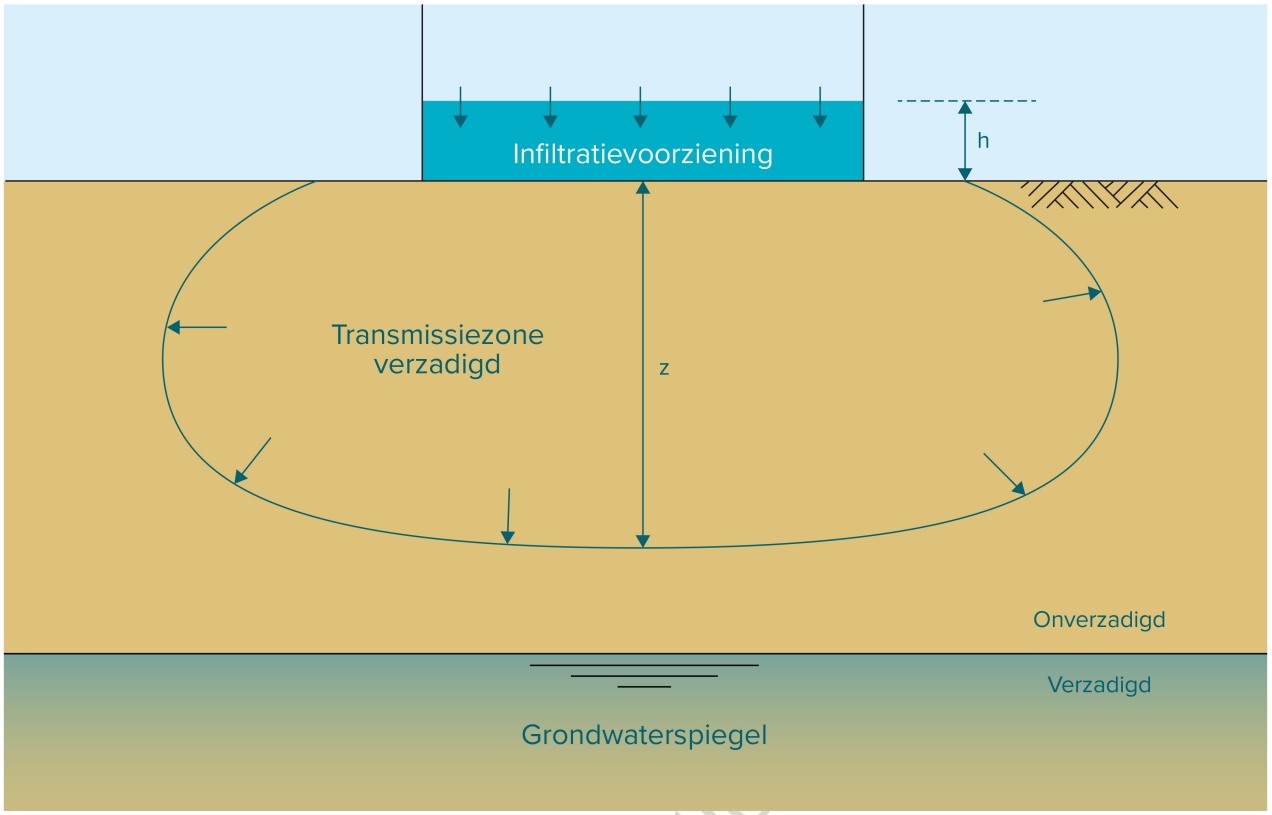
waarbij:

v = infiltratiesnelheid [m/d]
k_T = verzadigde doorlatendheid van de transmissiezone [m/d]
ϕ = zuigspanning aan de onderkant van de transmissiezone [m]
z = diepte van de transmissiezone onder de infiltratievoorziening [m]
h = hoogte van het water in de infiltratievoorziening [m]

.

De transmissiezone is het verzadigde gebied van de bodem waar water vanuit de infiltratievoorziening naartoe is gestroomd. De transmissiezone en de onderdelen van deze formule staan in figuur A.

Tervisiedocument Stichting RIONED



Figuur A Transmissiezone onder infiltratievoorziening, boven grondwaterspiegel..

Hoe meer water in de bodem infiltreert, hoe groter de transmissiezone wordt. Daarmee wordt de z uit formule A ook steeds groter. De zuigspanning is een bodemvariabele die onder meer afhangt van de verzadigingsgraad. Naarmate het front van de transmissiezone dichter bij de grondwaterspiegel komt, wordt de zuigspanning kleiner. Naarmate de tijd verstrijkt, wordt de waterhoogte h in deze formule alleen maar kleiner. Alleen kijkend naar de hydraulische gradiënt:

Tervisiedocument Stic

$$\frac{\phi + z + h}{z}$$

.

uit formule B4.1 blijkt dat met het verstrijken van de tijd de invloed van en h afneemt naarmate het infiltratiefront z onder de infiltratievoorziening vordert en de verzadiging van de bodem toeneemt. Hierdoor worden en h steeds kleiner ten opzichte van z, waardoor deze factor steeds dichter bij 1 komt. Gevolg hiervan is dat de infiltratiesnelheid v nagenoeg gelijk wordt aan de verzadigde doorlatendheid K_T . Uitgangspunten hierbij zijn een homogene bodem en een (vrijwel) constante infiltratiesnelheid.

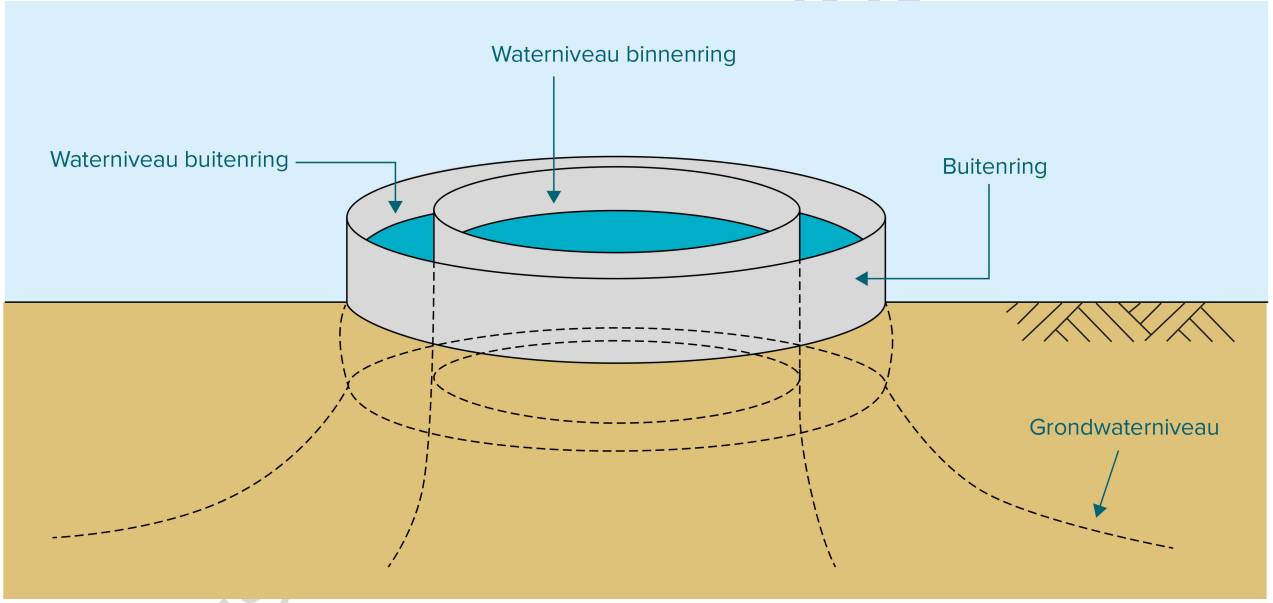
Tervisiedocument Stichting RIONED

1.4.3 Dubbele-ringinfiltrometermethode

De dubbele-ringinfiltrometermethode wordt toegepast om de infiltratiesnelheid en capaciteit vanaf maaiveld te bepalen.

Toepassingsgebied

De meting vindt plaats boven de grondwaterstand in de onverzadigde zone. Om de verzadigde verticale doorlatendheid te kunnen meten, is voorverzadiging nodig. De meetopstelling staat op een vlak horizontaal oppervlak. Omdat een relatief groot oppervlak nodig is, vindt de meting meestal plaats vanaf maaiveld (tot enkele decimeters diepte).



Figuur A Opstelling dubbele-ringinfiltrometertest..

Toepassingsgebied: 0,001 m/d < k < 1,0 m/d

Kenmerk: meting van daling waterspiegel of van debiet

Meting van de verticale verzadigde doorlatendheid

Normen: ISO-DIS 22282-5

Boven grondwater

Tervisie ng RIONED

De meting is uit te voeren met zowel een constant-head- als een falling-headtest.

Meetopstelling

In de concept-ISO-norm prEN ISO-DIS 22282-5 (Infiltrometertests) vindt u een uitgebreide beschrijving van de meetopstelling en de dubbele-ringinfiltrometertest. Hier volgt een korte toelichting. De dubbele-ringinfiltrometer bestaat uit twee cilinders van verschillende diameters en van circa 25 cm hoog. Deze liggen in elkaar op de laag waarvan u de doorlatendheid wilt bepalen. De binnenste ring heeft een diameter van minimaal 200 mm, de buitenste een diameter die bijna twee keer zo groot is. De kleinere ring ligt precies in het midden van de grote ring. Een stelplaat houdt de afstand tussen de ringen gelijk. De veldmedewerker drukt of slaat beide ringen 5 à 10 cm de grond in. Uiteindelijk steken de ringen ongeveer 15 à 20 cm boven het grondoppervlak uit. Met een waterpas controleert de veldmedewerker of de ringen waterpas staan. Daarna verwijdert hij de stelplaat en plaatst hij een meetbrug over de binnenring. Hierin komen later de meetband en vlotter. Met bentoniet vermengd met water dicht hij de binnenste en buitenste ring aan de buitenkant lekvrij af.

Uitvoering

Na installatie vult de veldmedewerker beide ringen met water om de grond te verzadigen. Dit moet voorzichtig gebeuren, want wervelingen kunnen bodemdeeltjes meenemen die bij het neerslaan een slecht doorlatend laagje kunnen vormen. Als het water in de ringen op het juiste peil is, plaatst hij de vlotter met meetband in de binnenste ring.

Falling-head

Na voldoende voorverzadiging giet de veldmedewerker een hoeveelheid water in de infiltrometer, zodat het waterpeil in beide ringen hetzelfde is. Vervolgens meet hij met een meetband met vlotter periodiek het waterniveau in de binnenring. Als de meting start (t = 0), noteert hij de eerste aflezing. De infiltratiesnelheid bepaalt het meetinterval. Aan het begin van de meting meet de veldmedewerker in het algemeen (op basis van praktijkervaring) om de 5 à 30 seconden. Als de infiltratiesnelheid tegenvalt, is een groter tijdsinterval mogelijk. De veldmedewerker noteert minimaal elke centimeter waterpeildaling. Hij kan de test stoppen als de waterdaling per tijdseenheid constant is. Het voortschrijdend waterfront in de bodem is dan zodanig groot geworden dat factoren zoals de zuigspanning in de bodem en het waterniveau in de binnenring relatief steeds minder invloed hebben en voornamelijk de zwaartekracht de infiltratiesnelheid bepaalt. De infiltratiesnelheid is dan ongeveer gelijk aan de doorlatendheid.

Afhankelijk van de doorlatendheid kan het bereiken van een constante snelheid enkele minuten tot enige uren duren. Als de ringen bijna leeg zijn, kan de veldmedewerker beide weer vullen en de meting voortzetten of herhalen.

Tervisiedocument Stichting RIONED

Constant-head

De meting is ook uit te voeren met een constant-headtest. De kenmerken hiervan vindt u in figuur A in Constant-headtest (verhoging) in boorgat of peilbuis . Bij deze methode zorgt de veldmedewerker voor een constant waterpeil in de binnen- en buitenring. Hij noteert het watervolume dat hij per meetinterval aan de binnenring toevoegt. Hij kan de test stoppen als het toegevoegde watervolume per tijdseenheid constant is.

Algemeen

Het water in de buitenste ring treedt op als buffer, zodat het water in de binnenring zo veel mogelijk verticaal de bodem in zakt. Tijdens de meting moet het water in de buitenste ring op hetzelfde niveau blijven als in de binnenste ring. Als het water in de buitenste ring sneller zakt, vult de veldmedewerker het water hierin aan tot het juiste niveau. Na de meting (of ervoor) moet hij met de hand tot 1 m onder de beproefde diepte boren om de onderliggende bodem op slecht doorlatende lagen te controleren. Over het algemeen is de toplaag het slechtst doorlatend en zal een onderliggende stoorlaag de meting dus niet negatief beïnvloeden.

De uitwerking, een rekenvoorbeeld en een veldformulier van deze methode vindt u in Uitleg formules en Rekenvoorbeeld .

Aandachtspunten

- De methode is voornamelijk geschikt voor ondiepe bodemlagen. Voor diepere lagen zijn relatief grote gaten nodig, omdat het oppervlak vlak en horizontaal moet zijn, met voldoende ruimte om te kunnen werken.
- Scheuren en gaten in de bodem (zoals wortelgangen) zorgen voor voorkeursstroombanen. Hierdoor meet de veldmedewerker een te hoge infiltratiesnelheid.
- Verschillen in de hoogte van de waterkolom in de ring kunnen (door potentiaalverschil) invloed hebben op de infiltratiesnelheid
- Een slechte afdichting van ringen aan het oppervlak kan lekkage (laterale of zijwaartse en zelfs opwaartse stroming) tot gevolg hebben. Dan meet de veldmedewerker een te hoge infiltratiesnelheid.
- Als tijdens het vullen van de ringen een stoorlaagje op het oppervlak ontstaat (of al aanwezig is), neemt de infiltratiesnelheid af.
- De aanwezigheid van een ondiepe stoorlaag kan laterale stroming bevorderen. Hierdoor meet de veldmedewerker een te hoge infiltratiesnelheid. Na de meting moet hij met de hand tot 1 m beneden de beproefde diepte boren om de onderliggende bodem te beschrijven.
- Bij onvoldoende verzadiging meet de veldmedewerker een te hoge infiltratiesnelheid. Daarom is het essentieel om door te meten totdat de infiltratiesnelheid constant is.

Tenvisiedocument Stichting RIONED

1.4.3.1 Uitleg formules

Met behulp van de meetresultaten van de dubbele-ringinfiltrometertest en onderstaande formules is de doorlatendheid te berekenen.

Falling-head

De wet van Darcy geeft de infiltratiesnelheid van water in een onverzadigde bodem met de volgende formule weer:

$$v = k_{verz} \frac{\phi + z + h}{z} \qquad \text{(B7.1)}$$

waarbij:

v = infiltratiesnelheid [m/d]

k_{verz} = verzadigde doorlatendheid (in de transmissiezone) [m/d]

ϕ = zuigspanning aan de onderkant van de transmissiezone [m]

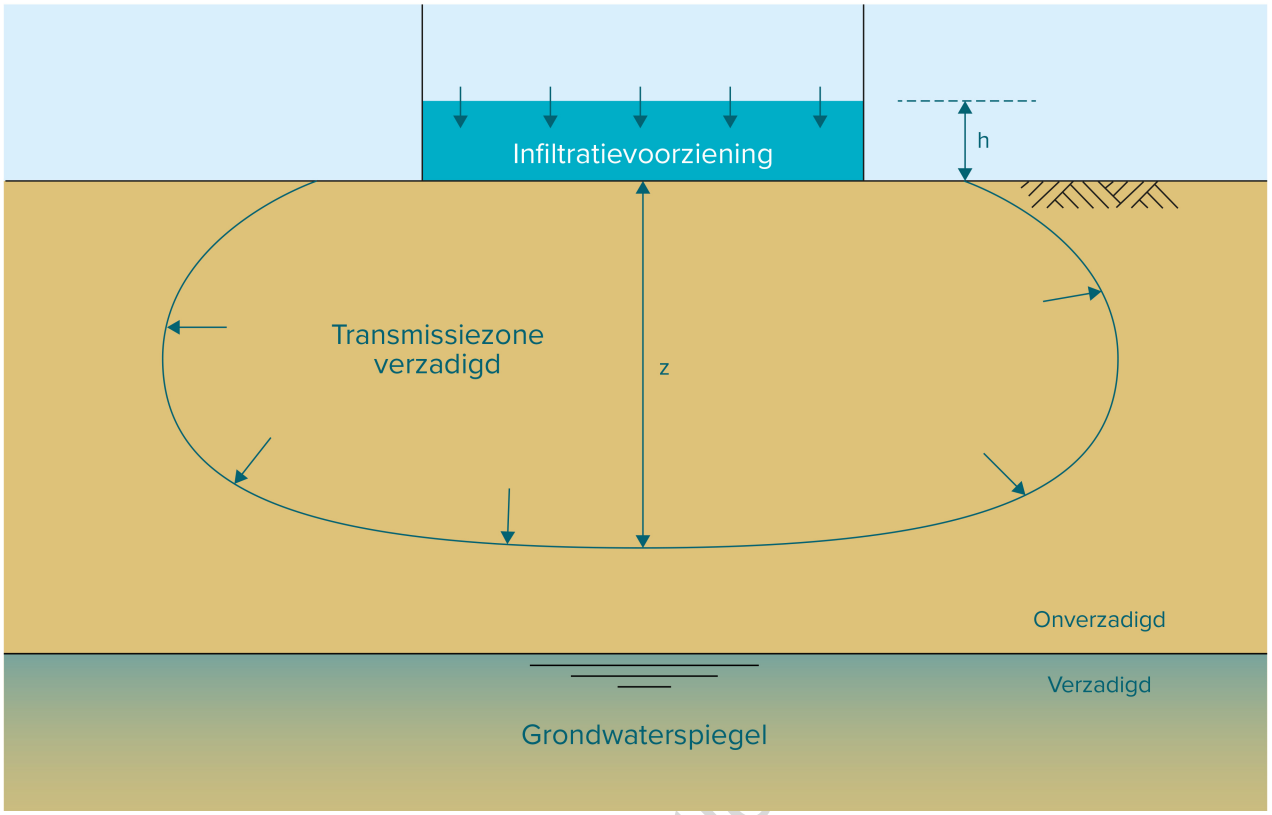
z = diepte van de transmissiezone onder de infiltrometer [m]

h = hoogte van het water in de infiltrometer [m]

.

De transmissiezone is het verzadigde gebied van de bodem onder de infiltrometer (zie figuur A).

Tervisiedocument Stichting RIONED



Figuur A Ligging transmissiezone bij verzadigen vóór dubbele-ringinfiltrometerproef.

Tervisiedocument Stic

De invloed van en h neemt af naarmate het infiltratiefront onder de infiltrometer vordert en de verzadiging van de bodem toeneemt. De hydraulische gradiënt:

$$\frac{\phi + z + h}{z} \qquad \text{(B.7.2)}$$

.

komt dan steeds dichter bij 1. Uitgangspunten hierbij zijn een homogene bodem en een (vrijwel) constante infiltratiesnelheid. Hieruit volgt dat $v = k_{verz}$, dus de dalingssnelheid van het waterpeil is gelijk aan de verticale doorlatendheid van de bodem.

Constant-head

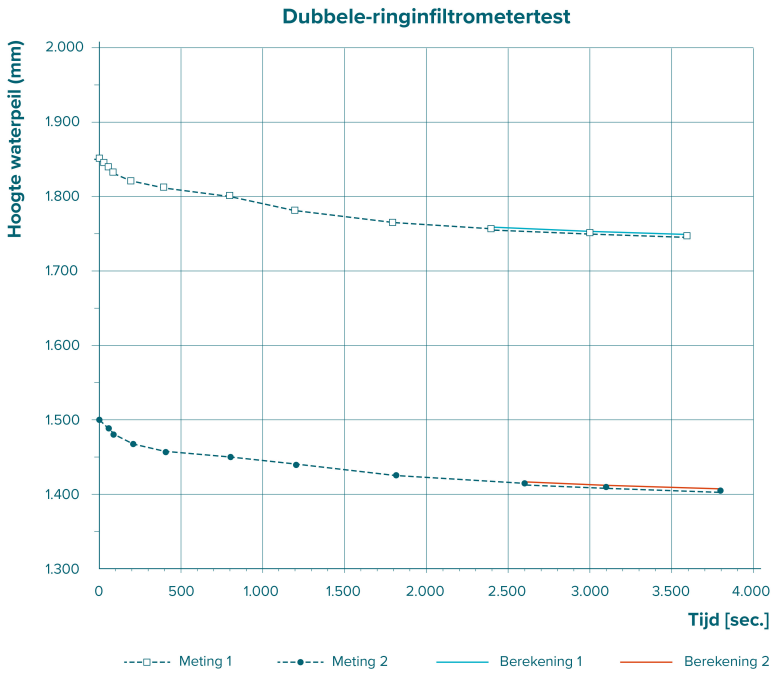
Zodra het toegevoegde watervolume per tijdseenheid constant is, is dit watervolume te delen door het oppervlak van de binnenring om de verticale verzadigde doorlatendheid te krijgen.

Tervisiedocument Stichting RIONED

1.4.3.2 Rekenvoorbeeld

Het rekenvoorbeeld geeft weer hoe u de meetresultaten kunt verwerken van een Falling headtest met de dubbele-ringinfiltrometer.

Dubbele-ringinfiltrometer: methode om de verticale doorlatendheid te meten.



Berekening = traject waarover de k-waarde bepaald wordt

Datum van uitvoering: 25 augustus 2010

Diameter binnenring: 0,32 m
Diameter buitenring: 0,57 m
Niveau van geplaatste ringen: 0,05 m - maaiveld

Berekende doorlaatfactor (k)
Voor traject reeks 1: 0,6 m/dag
Voor traject reeks 2: 0,7 m/dag

Meting 1		Meting 2	
Tijd [sec.]	Aflezing waterhoogte [mm]	Tijd [sec.]	Aflezing waterhoogte [mm]
0	1.850	0	1.500
30	1.845	25	1.494
60	1.840	65	1.488
90	1.830	84	1.479
200	1.820	210	1.467
400	1.810	405	1.457
800	1.800	800	1.449
1.200	1.780	1.200	1.440
1.800	1.764	1.810	1.425
2.400	1.754	2.600	1.414
3.000	1.750	3.100	1.409
3.600	1.746	3.800	1.404

Figuur A Rekenvoorbeeld verwerking resultaten.

Uitleg rekenvoorbeeld

v = infiltratiesnelheid

v k_{verz}

Na voorverzadiging ontstaat een constante infiltratiesnelheid. Dit is zichtbaar aan de constante daling van het waterpeil over de tijd in de grafiek. De doorlatendheid wordt berekend over een traject (meerdere metingen) met een constante helling.

Meting 1:

Uitgaande van de laatste 3 metingen (van 2400 tot 3600 seconden en 1754 tot 1746 mm)

v = 8 mm in 1.200 seconden = 0,576 m/dag

k_{verz} 0,6 m/dag

Meting 2:

Uitgaande van de laatste 3 metingen (van 2600 tot 3800 seconden en 1414 tot 1404 mm)

v = 10 mm in 1.200 seconden = 0,72 m/dag

k_{verz} 0,7 m/dag

De resultaten betreffen de infiltratiecapaciteit. Direct na het begin van de neerslag kan de infiltratiesnelheid groter of kleiner zijn. Dit is ook afhankelijk van de periode voorafgaand aan de bui. Hier dient rekening mee gehouden te worden bij de interpretatie van de resultaten.

Tervisiedocument Stichting RIONED

Veld lijst

Datum:
Locatie:
Opmerkingen:

A	B		C	D	E	F	G	H
Tijd	Waterniveau		Cumulatieve tijd	Tijdverschil	Infiltratie	Infiltratie-capaciteit	Infiltratie-capaciteit	Cumulatieve infiltratie
aflezing uur min sec	Vóór bijvullen *aflezing* mm	Na bijvullen *aflezing* mm	*Bepaal uit A* min	*Bepaal uit A* min	*Bepaal uit B* min	*Bereken uit D en E* mm/min	*Bereken uit F* ../..	*Bepaal uit E* mm
			start=0					start=0

Figuur B Voorbeeld veldformulier.

Tervisiedocument

1.4.4 Aardvarkmethode

Deze pagina beschrijft de werking van het meetinstrument de Aardvark, waarmee de doorlatendheid in de onverzadigde zone bepaald kan worden.

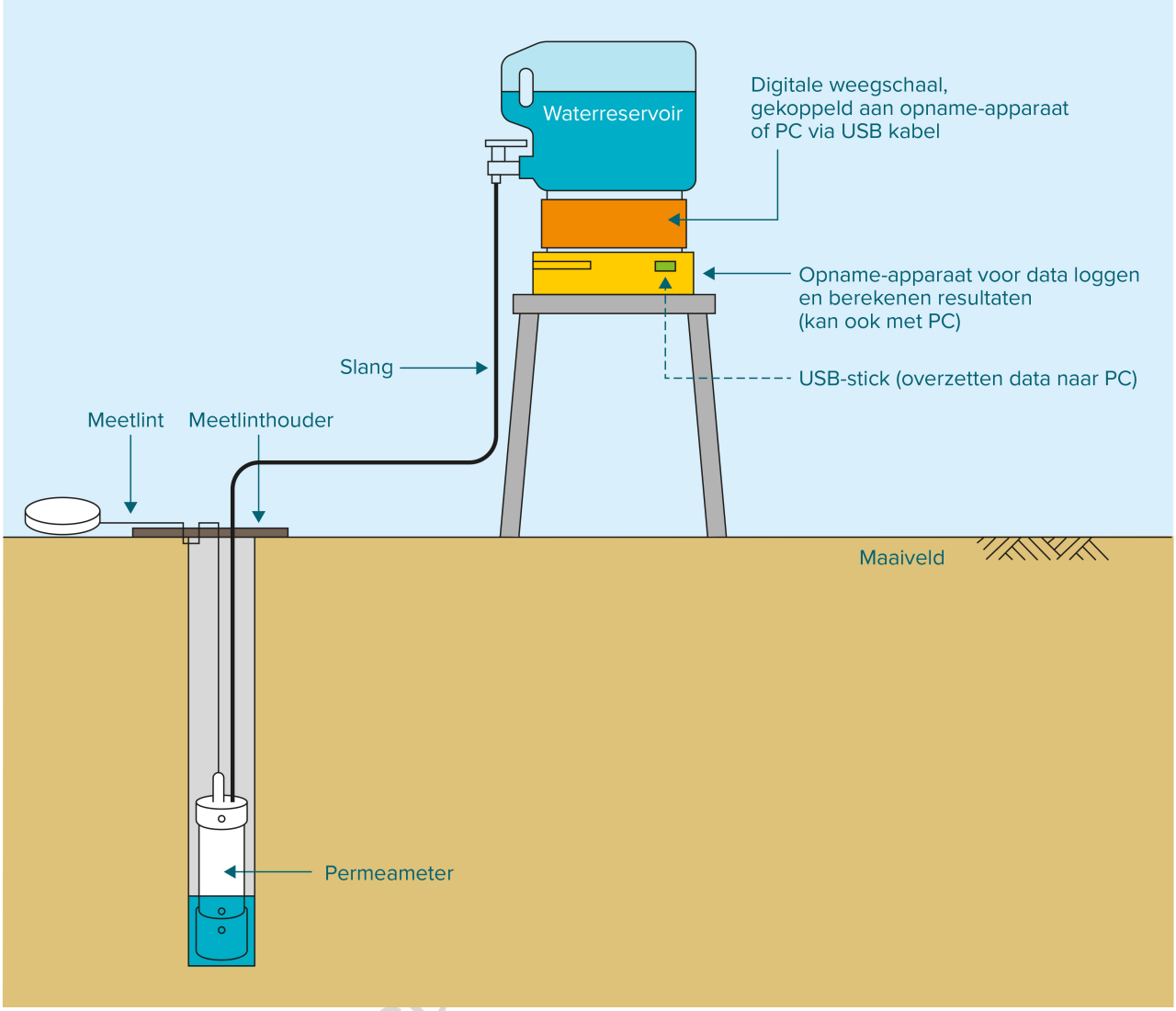
Toepassingsgebied

De Aardvark is een meetinstrument waarmee geautomatiseerd de verzadigde doorlatendheid bepaald kan worden in de onverzadigde zone. Deze methode wordt toegepast op enige diepte onder maaiveld, maar boven de grondwaterstand.

Meetopstelling

De Aardvark metingen worden uitgevoerd in een boorgat, boven de grondwaterstand. Vanuit een waterreservoir wordt water aan het boorgat toegevoegd. De ‘Aardvark Permeameter Unit’ (APU) stuurt het waterreservoir aan. De weegschaal meet het waterdebiet dat aan het boorgat wordt toegevoegd.

Tervisiedocument Stichting RIONED



Figuur A Schematische weergave werking Aardvark. Bron; Eijkelkamp.

Tenvisiedoc

Constant-head

De Aardvark werkt volgens de Constant-head methode met een verhoging van de grondwaterstand. De APU stuurt het waterreservoir aan en zorgt dat er een constante waterhoogte ontstaat in het boorgat. De weegschaal en een timer meten het benodigde debiet om deze waterhoogte in stand te houden. Door de koppeling van deze metingen aan een laptop met benodigde software (SimplyDATA) wordt geautomatiseerd een ‘constant head’ situatie bereikt en de doorlatendheid berekend met de juiste formule. Hiertoe hoeven alleen de basis parameters van het boorgat, grondwaterstand en diepte van de slecht doorlatende laag handmatig ingevoerd te worden.

De Aardvark past de USBR formules toe. Nadere informatie over de 'constant head' methode met verhoging en de formules is terug te vinden op de pagina constant headtest .

Een voordeel van de Aardvark methode is dat berekening van de doorlatendheid automatisch gebeurd. Naast dat dit efficiënt is, is de kans op menselijke fouten in de uitwerking van de berekening hierdoor kleiner.

Aandachtspunten

Om nauwkeurige metingen te krijgen is het belangrijk dat de veldwerker bekend is met de apparatuur, werkwijze en berekeningen.

Het systeem moet goed schoongemaakt en onderhouden worden. Beschadiging van de verbindingen in het systeem kunnen tot zeer onnauwkeurige metingen leiden.

Er wordt geen gebruikgemaakt van een peilbuis. Aandachtspunt is dat het boorgat niet instort tijdens de metingen.

De doorlatenheid wordt bepaald in het traject tussen de waterhoogte in het boorgat en de onderkant van het boorgat. In dit traject moet de bodemopbouw wel uniform zijn. Deze methode is minder geschikt bij een gelaagde onverzadigde zone.

Tervisiedocument Stichting RIONED

1.4.4.1 Uitleg formules

Het Aardvark meetinstrument rekent de doorlatendheid uit op basis van onderstaande formules.

USBR

Afhankelijk van de relatie tussen de waterhoogte in het boorgat en de grondwaterstand of ondoorlatende laag wordt één van de formules van USBR7300-89 toegepast (Earth Manual, part 2, Third Edition, pagina 1234, Denver, Colorado 1990). Het Aardvark meetinstrument past deze formules toe. Uitgangspunt hierbij is dat de meting in de onverzadigde zone wordt uitgevoerd.

Indien de grondwaterstand zich ver onder de bodem van het boorgat bevindt (verschil waterniveau in boorgat en grondwaterstand is meer dan 3x de waterhoogte in het boorgat):

$$k = \frac{Q}{2\pi h^2}\left\{ln\left[\frac{h}{r} + \sqrt{(h/r)^2 + 1}\right] - \frac{\sqrt{1 + (h/r)^2}}{h/r} + \frac{1}{h/r}\right\} \qquad \text{(B10.5)}$$

.

Indien de grondwaterstand zich vlak onder de bodem van het boorgat bevindt (verschil waterniveau in boorgat en grondwaterstand is kleiner dan 3x de waterhoogte in het boorgat):

Tervisiedocument Stichting RIONED

$$k = \frac{Q}{2\pi h^2}\left[\frac{\ln {}^{h}/_{r}}{\frac{1}{6}+\frac{1}{3}\left(\frac{l}{h}\right)}\right] \qquad \text{(B10.6)}$$

Waarbij:

K= verzadigde doorlatendheid (cm/sec)

Q= constant debiet (ml/sec)

h= waterhoogte in het boorgat (cm)

r= straal van het boorgat (cm)

L= afstand tussen waterhoogte in het boorgat en de grondwaterstand of slecht doorlatende laag (cm).

Tervisiedocument Stichting

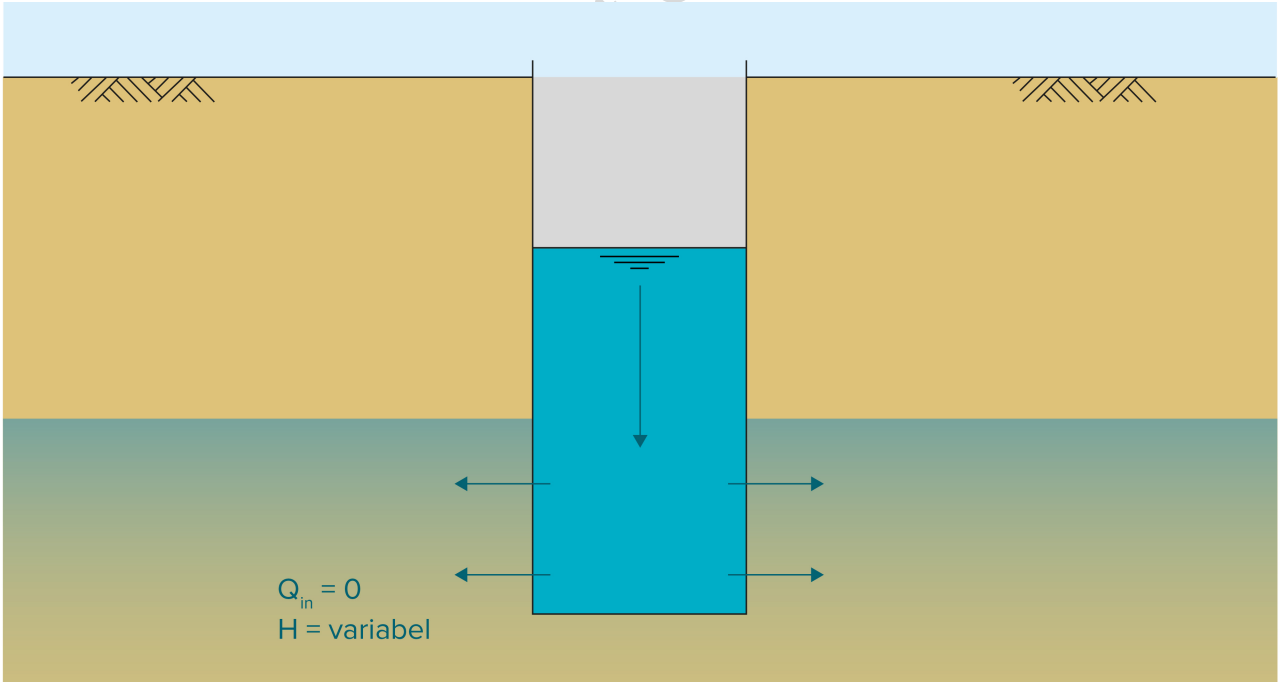
1.4.5 Falling-headtest in peilbuis

Bij deze methode wordt de grondwaterstand eenmalig verhoogd, waarna de daling wordt gemeten.

Toepassingsgebied

Het toepassingsgebied van elke methode hangt onder andere samen met de meetnauwkeurigheid. De vul- of leegpomptijd van boorgat of peilbuis moet veel kleiner zijn dan de tijd die nodig is voor de meting zelf. In grove gronden kan het water snel wegzakken of toestromen. In fijne gronden duurt dat veel langer. Deze methode is daarom vooral geschikt in matig tot slecht doorlatende gronden. Het toepassingsgebied ligt bij een k-waarde tussen 0,0001 en 5 m/d. De meting vindt plaats met of zonder een peilbuis in een (hand)boorgat. De meting is zowel boven als onder de grondwaterstand uit te voeren. Zelfs tot 4 m beneden het maaiveld, ook diep onder het grondwater. Voorwaarde is dan wel dat de veldmedewerker de te meten zone met filterstelling en zwelklei voldoende isoleert. De falling-headtest houdt in: het eenmalig verhogen van de grondwaterspiegel, waarna de daling van de grondwaterspiegel wordt gemeten.

Stichting RIONED



Figuur A Kenmerken falling-headtest.

Meetopstelling

Bij metingen onder de grondwaterstand moet de veldmedewerker een filterbuis gebruiken. Bij metingen boven de grondwaterstand is een filter aan te raden.

Uitvoering

Na voldoende voorverzadiging verhoogt een reservoir of pomp eenmalig de grondwaterspiegel in de peilbuis. De exacte verhoging is afhankelijk van het traject waarover u de doorlatendheid wilt bepalen en de grondsoort. Maar de verhoging moet zo'n 3 à 6 x de diameter van het boorgat bedragen.

Vervolgens meet de veldmedewerker met een datalogger of vlotter (semi)continu de daling van de waterspiegel ten opzichte van een referentieniveau. Voor of na de meting brengt hij de bodemopbouw in beeld van minimaal de diepte van de peilbuis plus de helft van de toegevoegde waterkolom in de peilbuis. Dit is nodig om de juiste formule te bepalen. De diepte van de eerstvolgende ondoorlatende of slecht doorlatende laag beïnvloedt namelijk het meetresultaat.

De uitwerking en een rekenvoorbeeld van deze methode vindt u in Uitleg formules .

Aandachtspunten

- De veldmedewerker moet zorgen voor voldoende voorverzadiging;
- Bij werking met een datalogger; eerst de logger plaatsen en dan water toevoeren;
- Veldwerker moet het laatste deel van de meting gebruiken om de doorlatendheid te bepalen (zodat voldoende verzadiging heeft plaatsgevonden).

Tervisiedocument Stichting RIONED

1.4.5.1 Uitleg formules

Op deze pagina worden de toe te passen formules voor het uitwerken van de falling-headtest toegelicht.

Er worden twee te gebruiken formules toegelicht, waarbij de Hvorslev specifiek voor testen in peilbuizen is ontwikkeld:

Stichting RIONED: foutieve formule verwijderd. Nieuwe formule volgt.

.

Hoe de formule toegepast wordt is uitgelegd in dit filmpje .

Let op dat r de straal van het boorgat betreft, dus niet van de peilbuis.

De tweede mogelijke formule, die uitgaat van een meting in een boorgat (zonder peilbuis) waarbij ook wordt uitgegaan van een min of meer constante infiltratiesnelheid en daarnaast een hydraulische gradiënt (verschil in waterhoogte gedeeld door de afstand tussen twee punten) van circa 1:

In dat geval is v k_{verz} en Q (totale infiltratie) = v * A, dus:

Tervisiedocument Stichting RIONED

$$Q = k_{verz} * A \qquad \text{(B8.1)}$$

waarbij:

k_{verz}= (verzadigde) doorlatendheid [m/d] ≅ infiltratiesnelheid

A = oppervlak [m²]

.

De bodem en wanden van het boorgat infiltreren het water, dus:

$$A = \pi r^2 + 2\pi rh \qquad \text{(B8.2)}$$

waarbij:

r = straal van het boorgat [m]

h = hoogte van de waterkolom in het boorgat [m]

.

Let op: r is de straal van het boorgat en dus niet van de peilbuis.

Hieruit volgt:

$$Q = 2\pi k_{verz}\, r(\mathrm{h} + \tfrac{1}{2} r) \qquad \text{(B8.3)}$$

.

Tervisiedocument Stichting RIONED

De snelheid waarmee het waterniveau in het boorgat afneemt, geeft een afname van Q volgens:

$$Q = -\pi r^2 \frac{\Delta h}{\Delta t} \qquad \text{(B8.4)}$$

.

Stel beide vergelijkingen aan elkaar gelijk, integreer en dan volgt hieruit:

$$k_{verz} = 1{,}15 r \frac{log(h_0 + \frac{1}{2}r) - log(h_t + \frac{1}{2}r)}{t - t_0} \qquad \text{(B8.5)}$$

waarbij:

t-t_0 = tijd sinds het begin van de meting [dag]

h_t = hoogte van de waterkolom in het boorgat op tijdstip t [m]

h_0 = h_t op tijdstip t = 0

.

De waarden voor h_t zijn eenvoudig te vinden door de gemeten waterdiepten ten opzichte van het referentieniveau af te trekken van de diepte van het boorgat ten opzichte van het referentieniveau. In formulevorm: $h_t = D' - H_t$.

Bij de gevonden waarden van ht moet u nu 1/2r optellen, waarna u deze waarden op een semi-logaritmische ondergrond uitzet. Het uitzetten van h_t + 1/2r op log-as tegen de tijd op de lineaire as resulteert in een rechte lijn met de volgende helling:

Tervisiedocument Stichting RIONED

$$\tan\alpha = 1{,}15\, r \frac{log(h_0 + \frac{1}{2} r) - log(h_t + \frac{1}{2} r)}{t - t_0} \qquad \text{(B8.6)}$$

.

Substitutie van tan a in formule B8.6 geeft sterk versimpelde formule voor het bepalen van de k-waarde.

$$k_{verz} = 1{,}15\, r \tan\alpha \qquad \text{(B8.7)}$$

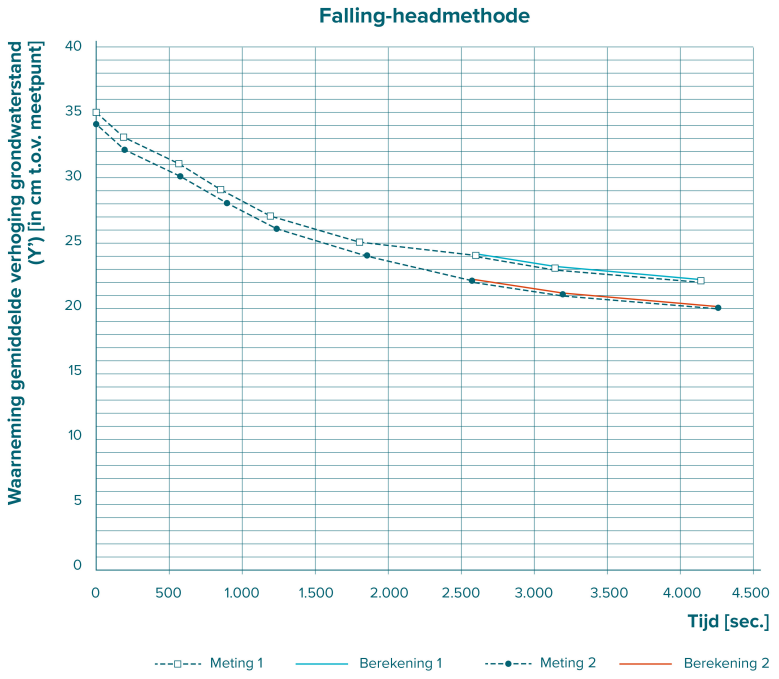
.

Tervisiedocument Stichting RIONED

1.4.5.2 Rekenvoorbeeld

Op deze pagina is de uitwerking van een berekening na een falling-headtest beschreven.

Falling-headtest in een boorgat (zonder peilbuis): het eenmalig verhogen van de grondwaterspiegel waarna de daling van de grondwaterspiegel wordt gemeten. Het rekenvoorbeeld geeft weer hoe u de meetresultaten kunt verwerken.



Berekening = traject waarover de k-waarde bepaald wordt

Datum van uitvoering:	25 augustus 2010
Diepte boorgat:	4,83 m - maaiveld
Grondwaterstand:	geen m - maaiveld
Meetpunt:	1,30 m + maaiveld
Boorgatdiameter:	0,07 m
Berekende doorlaatfactor (k)	
Voor traject reeks 1:	0,079 m/dag
Voor traject reeks 2:	0,079 m/dag

Meting 1		Meting 2	
Tijd [sec.]	Meting Y' [cm - mp]	Tijd [sec.]	Meting Y' [cm - mp]
1	574	1	576
190	576	205	578
570	578	585	580
855	580	900	582
1.200	582	1.245	584
1.810	584	1.860	586
2.605	585	2.580	588
3.150	586	3.200	589
4.150	587	4.265	590

Figuur A Rekenvoorbeeld Falling head test..

Uitleg rekenvoorbeeld:

De laatste metingen geven een vrijwel constante infiltratie weer. De doorlatendheid wordt bepaald op basis van de laatste 3 metingen. Er kan gekozen worden om h_t + 1/2 r op een logaritmische schaal uit te zetten tegen de tijd op lineaire schaal, waarna de helling afgelezen wordt, zoals beschreven bij de formules.

De andere optie is om de volgende formule in te vullen:

$$k_{verz} = 1{,}15r * \frac{log(h_0 + \frac{1}{2}r) - log(h_t + \frac{1}{2}r)}{t - t_0} \qquad \text{(B8.8)}$$

.

Uitleg	Rekenvoorbeeld
k_{verz} = (verzadigde) doorlatendheid (m/dag)	?
r = straal van het boorgat (m)	0,07/2 = 0,035m
h_t = hoogte van de waterkolom in het boorgat op tijdstip t (m)	0,22 m
h_0 = ht op tijdstip t = 0 (m)	0,24 m
t = tijdstip eind traject (d)	4.150 s = 0,048 d
t_0 = tijdstip begin traject (d)	2.605 s = 0,030 uur

Tabel A Berekening kverz.

Invullen formule:

$$k_{verz} = 1{,}15 * 0{,}035 * \frac{\log(0{,}24 + 0{,}035/2) - \log(0{,}22 + 0{,}035/2)}{0{,}018} = 0{,}08 \text{ m/dag} \qquad \text{(B8.9)}$$

Ingevulde formule

rvisiedocu ng RIONED

Tervisiedocument Stichting RIONED

1.4.6 Rising-headtest in peilbuis

De rising-headtest houdt in: het eenmalig verlagen van de grondwaterstand, waarna de stijging van de grondwaterstand wordt gemeten.

Toepassingsgebied

0,0001 m/d < k < 5 m/d

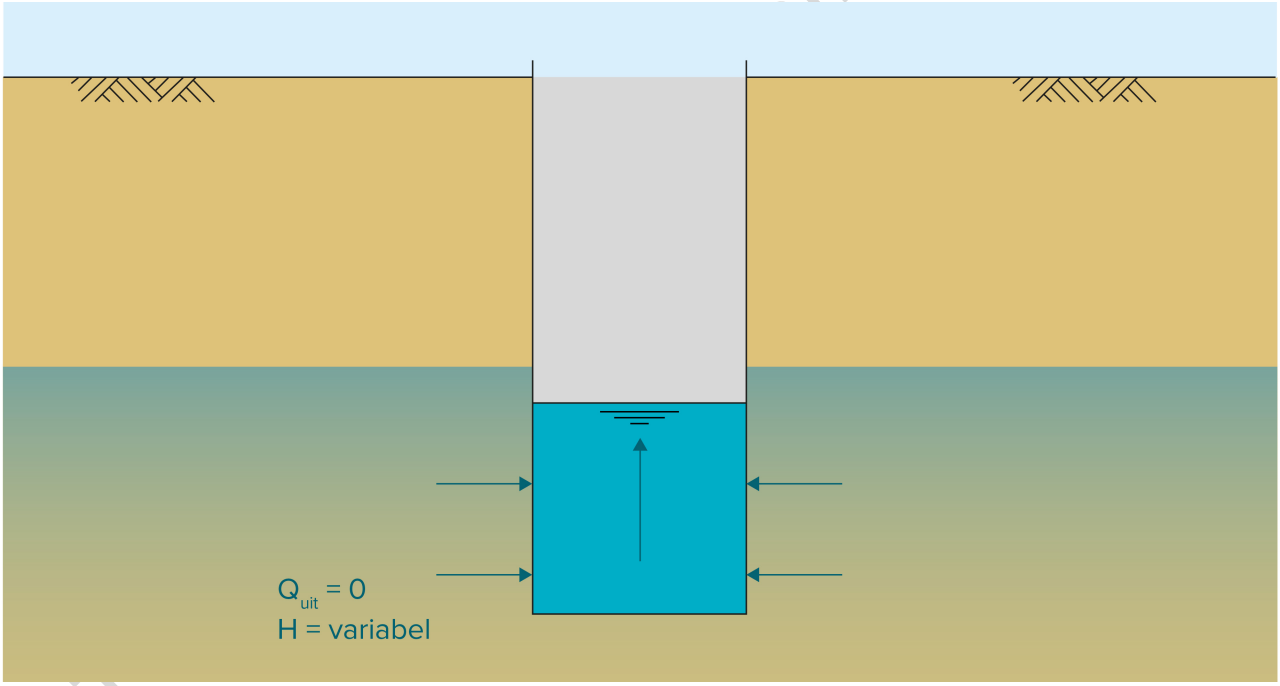
Kenmerk: eenmalige verlaging, meting van stijging waterspiegel

Meting van horizontale doorlatendheid

Onder grondwater

Peilbuis: ja

ting RIONED



Figuur A Kenmerken rising-headtest.

Meetopstelling

Bij de meting moet de veldmedewerker een filterbuis gebruiken. Ook heeft hij een puls of pomp nodig. Het gewenste meettracé onder het grondwater bepaalt de lengte- en eventuele diepteafstelling van het filter.

Uitvoering

Een puls of pomp verlaagt eenmalig de grondwaterspiegel in de peilbuis. De exacte verlaging is afhankelijk van het traject waarover u de doorlatendheid wilt bepalen en de grondsoort. Maar de verlaging zal waarschijnlijk zo'n 20 tot 40 cm bedragen.

Vervolgens meet de veldmedewerker met een datalogger of vlotter (semi)continu de stijging van de grondwaterspiegel ten opzichte van een referentieniveau. Aan het begin van de meting registreert de meter vaak een te snelle stijging. Dit komt doordat er nog water langs de wanden van het boorgat kan stromen. De veldmedewerker zal het eerste meetinterval dan ook meestal buiten beschouwing laten. Hij kan de test stoppen nadat minimaal 25% van de waterverlaging weer is teruggestroomd in de peilbuis. Hierna ontstaat namelijk een trechtervormige grondwaterspiegel rond de peilbuis, waardoor een weerstand tegen grondwaterstroming naar de peilbuis optreedt. Met deze weerstand houden de formules om de doorlatendheid te berekenen geen rekening.

Voor of na de meting moet de veldmedewerker de bodemopbouw in beeld brengen tot de diepte van de peilbuis plus de helft van de oorspronkelijke waterhoogte in de peilbuis. Dit is nodig om de juiste formule voor de berekening te kunnen bepalen.

De uitwerking, een rekenvoorbeeld en een veldformulier van deze methode vindt u in Uitleg formules .

Aandachtspunten

- Het is van belang dat de veldmedewerker een peilbuis plaatst en niet in het open boorgat meet. Door het pulsen kan het open boorgat namelijk ongewild dieper worden, waardoor hij een verkeerd traject meet.
- Bij uitvoering met een datalogger; eerst de logger plaatsen en dan het water onttrekken;
- Als de veldmedewerker na de verlaging te laat start met meten, is het grondwater mogelijk al te ver gestegen. Terwijl juist de eerste 25% van de waterstijging het belangrijkst is.

Tervisiedocument Stichting RIONED

1.4.6.1 Uitleg formules

Op deze pagina worden de toe te passen formules voor de rising-headtest toegelicht.

De rising-headtest is te gebruiken om de doorlatendheid te bepalen van een homogeen pakket of van een tweelaags bodemprofiel. In beide gevallen wordt in het algemeen de formule van Hvorslev of Ernst (1950) gebruikt. Deze module gaat alleen in op de uitwerking van een homogeen bodemprofiel. De diepte van de meting is zó te kiezen dat eventuele stoorlagen voldoende diep liggen ten opzichte van het meettracé.

Uitleg formules

Er worden twee te gebruiken formules toegelicht, waarbij de Hvorslev specifiek voor testen in peilbuizen is ontwikkeld:

Stichting RIONED: foutieve formule verwijderd. Nieuwe formule volgt.

.

Hoe de formule toegepast wordt is uitgelegd in dit filmpje .

Let op dat r de straal van het boorgat betreft, dus niet van de peilbuis.

Voor een homogene laag hebben Ernst en Hooghoudt de volgende formules afgeleid.

Let op: de waarden in onderstaande formules dienen ingevuld te worden in cm en seconden, de uitkomst (k_{verz}) is in m /dag.

Tervisiedocument Stichting RIONED

$$k_{verz} = C\frac{\Delta h}{\Delta t} \qquad \text{(B9.1)}$$

Waarbij:

k_{verz} = verzadigde doorlatendheid [m/dag]

C = geometrische factor [−]

Δh = stijging van het water in het boorgat [cm]

Δt = tijdsduur [sec]

De geometrische factor C staat in de volgende relatie:

$$C = \frac{4000\frac{r}{h'}}{(20+\frac{H}{r})(2-\frac{h'}{H})} \quad \text{waarvoor geldt } S > 6r \qquad \text{(B9.2)}$$

En waarbij:

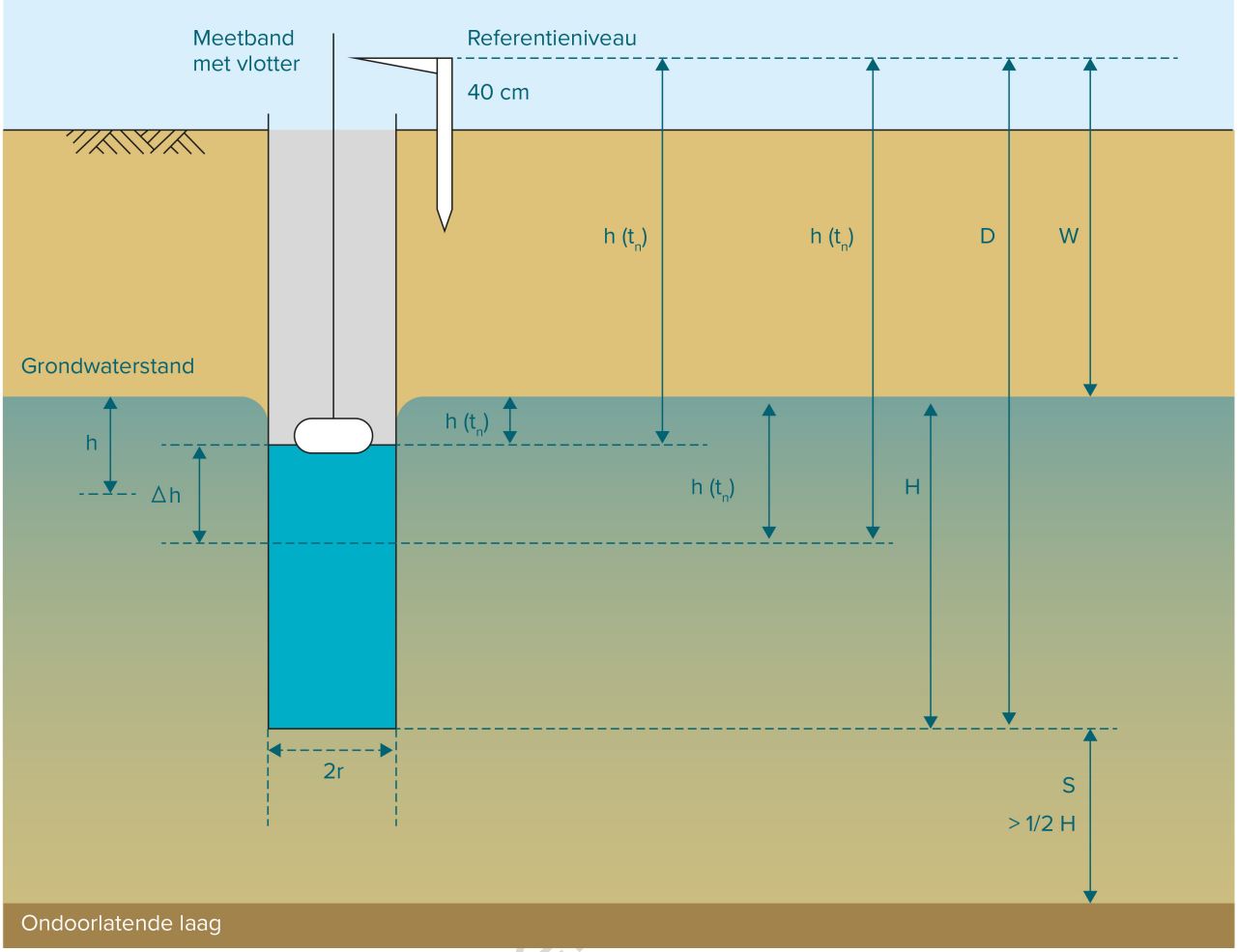
H = natte lengte van het boorgat [cm]

r = straal van het boorgat [cm]

h' = verticale afstand tussen grondwaterniveau en gemiddeld niveau tussen twee opeenvolgende metingen [cm]

S = afstand tussen onderkant boorgat en diepere ondoorlatende laag [cm]

Deze componenten staan in figuur A.



Figuur A Opstelling en parameters rising-headtest.

Tervisiedocume

Als C is bepaald, moet u het juiste traject van de metingen kiezen. Dit is het makkelijkst als u h tegen t uitzet in een lineaire grafiek. Voor de berekening van de k-waarde kiest u het deel van de meting waar de h min of meer constant is (mag geleidelijk wat afnemen). In de grafiek is dat te zien als een rechte lijn. (De h is ook tegen t uit te zetten. Dan is het te kiezen traject een horizontale rechte lijn.)

Het eerste deel van de meting valt meestal af vanwege lekkage langs de wanden van het boorgat (zie Falling-headtest in boorgat of peilbuis). Het gekozen traject moet wel zo veel mogelijk in het begin van de meting liggen. De proef is namelijk niet meer betrouwbaar als er meer water is teruggestroomd dan een kwart van de verlaagde waterkolom (h < 14h(t1)) (zie Falling-headtest in boorgat of peilbuis).

Als u een bepaald traject hebt gekozen, kunt u de h en t bepalen door de waarden aan het begin- en eindpunt van het

traject van elkaar af te trekken. De k-waarde kunt u nu direct berekenen met formule B9.1.

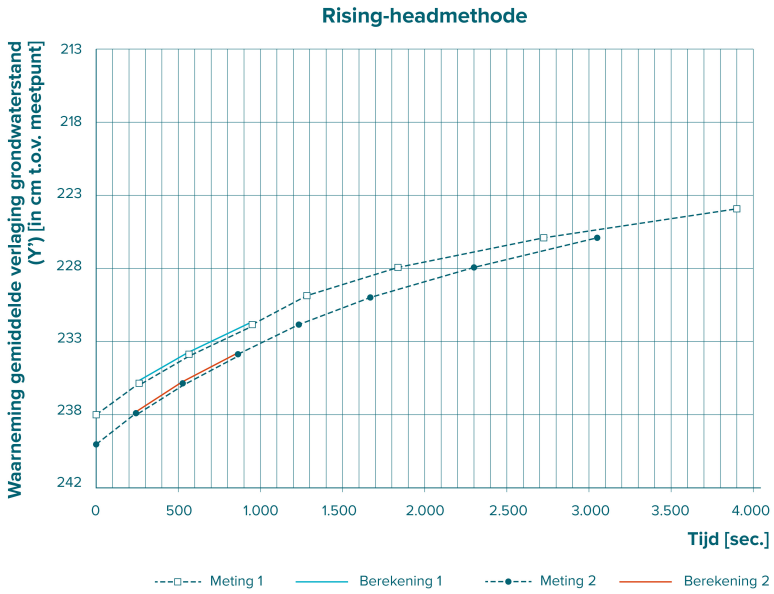
De (overige) formules vindt u in *Determining the Saturated Hydraulic Conductivity* (Oosterbaan, R.J. en Nijland, H.J. 1994) en *Drainage principles and applications* (Ritzema, H.P. (ed). ILRI publ.16 (2nd ed., Wageningen, pp. 435-476).

Tervisiedocument Stichting RIONED

1.4.6.2 Rekenvoorbeeld

Op deze pagina is de uitwerking van een berekening na een rising-headtest beschreven.

Rising-headtest: het eenmalig verlagen van de grondwaterspiegel waarna de stijging van de grond- waterspiegel wordt gemeten. Het rekenvoorbeeld geeft weer hoe u de meetresultaten kunt verwerken.



Berekening = traject waarover de k-waarde bepaald wordt

Datum van uitvoering:	25 augustus 2010
Diepte boorgat:	2,43 m - maaiveld
Grondwaterstand:	1,48 m - maaiveld
Meetpunt:	0,65 m + maaiveld
Boorgatdiameter:	0,10 m
Berekende doorlaatfactor (k)	
Voor traject reeks 1:	0,08 m/dag
Voor traject reeks 2:	0,08 m/dag

Meting 1		Meting 2	
Tijd [sec.]	Meting Y' [cm - mp]	Tijd [sec.]	Meting Y' [cm - mp]
1	238	1	240
270	236	240	238
570	234	525	236
945	232	870	234
1.290	230	1.230	232
1.845	228	1.680	230
2.730	226	2.310	228
3.900	224	3.060	226

Figuur A Rekenvoorbeeld rising-head test..

Het gekozen traject waarover de doorlatendheid is berekend laat een min of meer constante stijging zien en ligt in de eerste 25% van de stijging tussen beginwaterstand en de oorspronkelijke waterstand (tussen 238 en 215 cm onder maaiveld voor meting 1). In dit voorbeeld zijn de metingen niet doorgezet tot 25% waterstijging.

Tekst RIONED

$$k_{verz} = C\frac{\Delta h}{\Delta t} \qquad (B9.1)$$

Waarbij:

k_{verz} = verzadigde doorlatendheid [m/dag]

C = geometrische factor [−]

Δh = stijging van het water in het boorgat [cm]

Δt = tijdsduur [sec]

Tabel A Berekening k_{verz}

	Uitleg	Rekenvoorbeeld 1
k_{verz}	doorlatendheid [m/dag]	?
C	geometrische factor	zie formule 9.2
h	stijging van het water in het boorgat [cm]	4 cm
t	tijdsduur [sec]	675 sec

Tervisiedocument Stichting RIO

$$C = \frac{4000\frac{r}{h'}}{(20+\frac{H}{r})(2-\frac{h'}{H})} \quad \text{waarvoor geldt } S > 6r \qquad (B9.2)$$

En waarbij:

H = natte lengte van het boorgat [cm]

r = straal van het boorgat [cm]

h' = verticale afstand tussen grondwaterniveau en gemiddeld niveau tussen twee opeenvolgende metingen [cm]

S = afstand tussen onderkant boorgat en diepere ondoorlatende laag [cm]

.

Tabel B Berekening geometrische factor C

	Uitleg	Rekenvoorbeeld 1
H	natte lengte van het boorgat [cm]	243 - 148 = 95 cm
r	straal van het boorgat [cm]	5 cm
h'	verticale afstand tussen grondwaterniveau en gemiddeld niveau tussen twee opeenvolgende metingen [cm]	235 - 213 (t.o.v. meetpunt) = 22 cm
S	afstand tussen onderkant boorgat en diepere ondoorlatende laag [cm]	uitgangspunt S > 30 cm

Tervisiedoorment Stichting RIO

$$C = \frac{4000\frac{5}{22}}{(20+\frac{95}{5})(2-\frac{22}{95})} = \frac{909}{39 * 1{,}77} = 13{,}18$$

$$k_{verz} = 13{,}18 * \frac{4}{675} = 0{,}08 \text{ m/dag}$$

.

Voorbeeld veldformulieren rising-headmethode

Measuring method (a)	The time necessary for each rise of 2 cm						Y (cm)	ΔY (cm)	Z (cm)	H (cm)	S (cm)	Above ground level (cm)
	1	2	3	4	5	6						
I												
II												
III												
IV												
V												

Tabel C Elke 2 cm stijging een tijdmeting

Measuring method (b)	The number of cm risen per ... seconds (cm)						Y (cm)	ΔY (cm)	Z (cm)	H (cm)	S (cm)	Above ground level (cm)
	1	2	3	4	5	6						
I												
II												
III												
IV												
V												

Tabel D Per tijdsinterval de stijging in cm

Tervisiedocument Stichting RIONED

1.4.7 Constant-headtest (verhoging) in boorgat of peilbuis

De constant-headtest houdt in: het constant verhogen van de grondwaterspiegel, waarbij het benodigde debiet wordt gemeten.

Variatie in de wateraanvulling (Qin = variabel) zorgt voor een constante waterpeilverhoging (H = constant), totdat een evenwicht is bereikt. Bij het evenwicht geldt: Qin – Quit = 0 en de waterhoogte (H) is constant. Bij deze methode blijft de waterhoogte H constant door variatie in het debiet Q. Met de huidige apparatuur is dit debiet zeer fijn te regelen.

Toepassingsgebied

0,01 m/d < k < 10 m/d

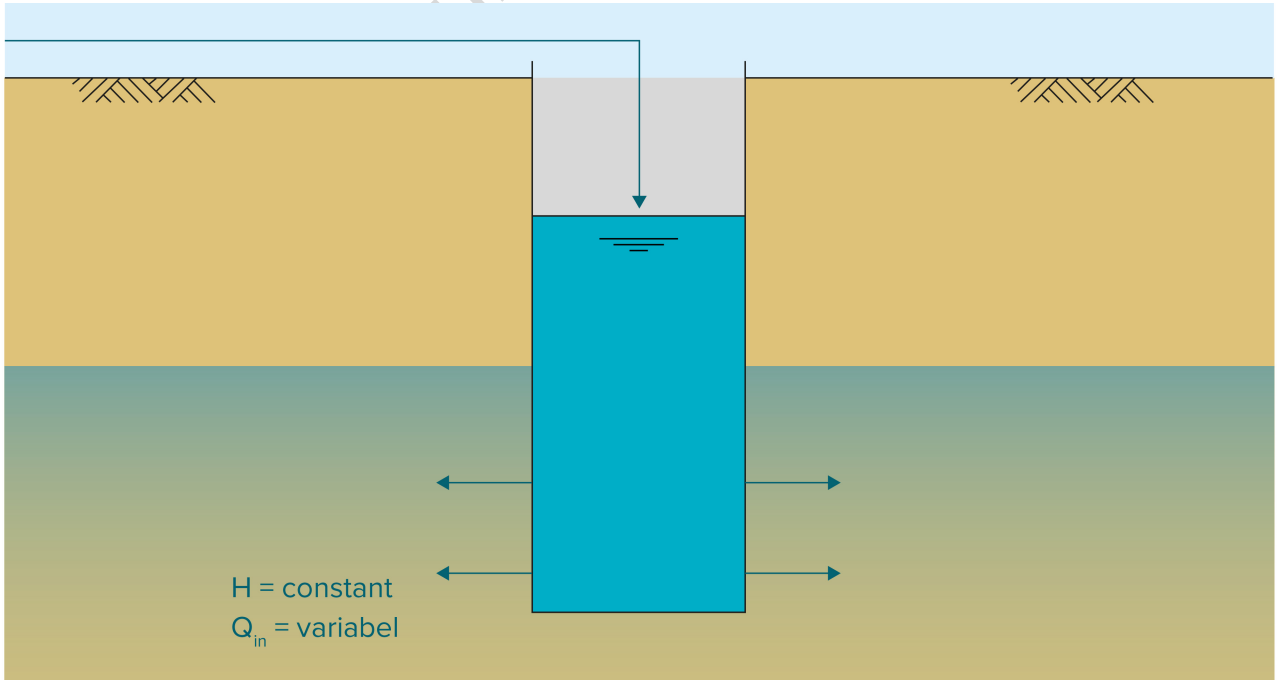
Kenmerk: constante verhoging variabele watertoevoeging

Meting van horizontale doorlatendheid

Boven of onder grondwater

Peilbuis: onder grondwaterstand ja, boven grondwaterstand ja/nee

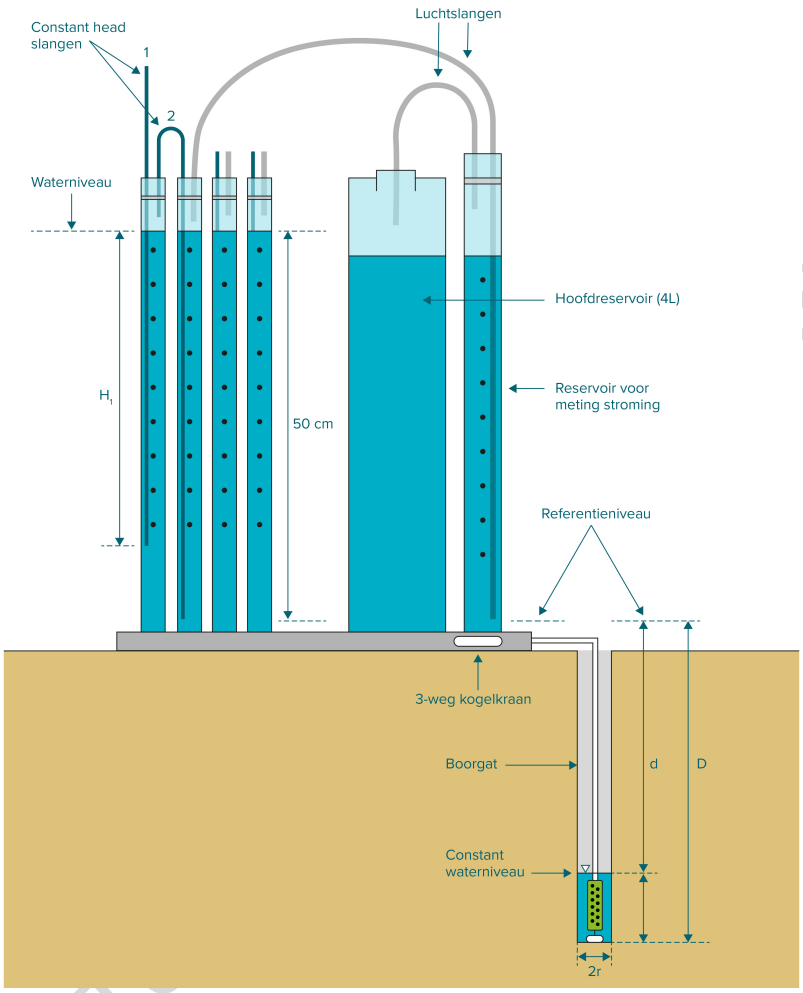
ument Stichting RIONED



Figuur A Kenmerken constant-headtest.

Meetopstelling

Bij metingen onder de grondwaterstand moet de veldmedewerker een filterbuis gebruiken. Bij subtiele watertoevoeging heeft hij bij metingen boven de grondwaterstand geen filter nodig.



Figuur B Voorbeeld opstelling constant-headtest: de compacte constant-headpermeameter.

Uitvoering

Een reservoir of pomp verhoogt de grondwaterspiegel in de peilbuis met een constante waarde. Tijdens het instellen van het evenwicht kan het debiet variëren. De exacte verhoging is afhankelijk van het traject waarover u de

doorlatendheid wilt bepalen en de grondsoort. Maar de verhoging moet minimaal 2,5 x de diameter van het boorgat bedragen.

Vervolgens meet de veldmedewerker de toegevoegde hoeveelheid water (aflezen reservoir of pompdebiet) per tijdseenheid. Hij kan de proef stoppen als de stroming constant is. Dit is het geval als minimaal drie meetwaarden (met een meetinterval van 1 tot 5 minuten) van de toegevoegde hoeveelheid water gelijk zijn. Na de meting brengt hij de bodemopbouw in beeld tot een diepte van minimaal de diepte van de peilbuis plus 2 x de gecreëerde waterhoogte (H). Hiermee wordt duidelijk of vlak onder de meetlocatie een slecht doorlatende laag voorkomt. Zo is te controleren welke formule nodig is om het meetresultaat uit te werken.

De uitwerking, een rekenvoorbeeld en een veldformulier van deze methode vindt u in Uitleg formules .

Aandachtspunten

- Voor en na de proef moet de veld medewerker het constante waterniveau in de peilbuis controleren. Als het niveau tijdens de test niet constant is, moet hij de proef herhalen.
- Is de ratio waterhoogte/straal boorgat kleiner dan 5, dan is de meting niet betrouwbaar. De veldmedewerker moet het waterniveau in de peilbuis aanpassen of het boorgat opnieuw (kleiner of groter) boren en de peilbuis opnieuw plaatsen. Daarom is goede controle van het waterpeil in de peilbuis (H) belangrijk.
- Bij de compacte constant- headpermeameter moet de veldmedewerker de aansluitingen goed controleren. Bij hoge doorlatendheden is het benodigde vacuüm in het apparaat (dat de constante verhoging in de peilbuis reguleert) niet meer in stand te houden. Hierdoor zijn de metingen niet meer betrouwbaar.

Tervisiedocument Stichting RIONED

1.4.7.1 Uitleg formules

Op deze pagina worden de toe te passen formules voor de constant-headtest (verhoging) toegelicht.

Om de k-waarde uit de veldgegevens te berekenen, zijn meerdere modellen beschikbaar. De modelkeuze hangt af van de randvoorwaarden van de modellen en de aangetroffen situatie in het veld.

Glover

Als de afstand van de bodem van het boorgat tot de eerste ondoorlatende laag groter is dan 2 x de waterverhoging (H), is de Glover-formule aan te bevelen:

$$k_{verz} = A * Q \qquad \text{(B10.1)}$$

waarbij:

k_{verz} = verzadigde doorlatendheid [m/dag]

Q = stromingsdebiet van het water in evenwichtssituatie [m^3/dag]

A = geometrische coëfficiënt [m^{-2}]

.

De waarde van A is te berekenen door:

$$A = \{\sinh^{-1}(H/r) - [(r/H)^2 + 1]^{1/2} + r/H\}/2\pi H^2) \qquad \text{(B10.2)}$$

waarbij:

H = hoogte van de waterkolom [m]

r = straal van het boorgat [m]

$\sinh^{-1}$ = inverse hyperbolische sinusfunctie

Tervisiedocument Stichting RIONED

.

Is de afstand van de bodem van het boorgat naar de eerste ondoorlatende laag kleiner dan 2 x de waterverhoging (H), dan is K_{verz} te berekenen door:

$$k_{verz} = B * Q \qquad \text{(B10.3)}$$

waarbij:

B = geometrische coëfficiënt [m^{-2}]

.

B is te berekenen door:

$$B = [3\ln(H/r)]/\pi H(3H + 2s)] \qquad \text{(B10.4)}$$

waarbij:

H = hoogte van de waterkolom [m]

r = straal van het boorgat [m]

s = afstand van onderkant boorgat tot eerste ondoorlatende laag [m]

.

De Glover-formule (formule B10.1) is geschikt voor H/r-waarden hoger dan 5. Bij een H/r-ratio lager dan 5 wordt de foutmarge te groot.

Tervisiedocument Stichting RIONED

USBR

Afhankelijk van de relatie tussen de waterhoogte in het boorgat en de grondwaterstand of ondoorlatende laag kan ook één van de formules van USBR7300-89 worden toegepast (Earth Manual, part 2, Third Edition, pagina 1234, Denver, Colorado 1990). Het Aardvark meetinstrument past deze formules toe. Uitgangspunt hierbij is dat de meting in de onverzadigde zone wordt uitgevoerd.

Indien grondwaterstand zich ver onder de bodem van het boorgat bevindt. Verschil waterniveau in boorgat en grondwaterstand is meer dan 3x de waterhoogte in het boorgat:

$$k = \frac{Q}{2\pi h^2}\left\{ ln\left[\frac{h}{r} + \sqrt{(h/r)^2 + 1}\right] - \frac{\sqrt{1 + (h/r)^2}}{h/r} + \frac{1}{h/r}\right\} \qquad \text{(B10.5)}$$

.

Indien de grondwaterstand zich vlak onder de bodem van het boorgat bevindt. Verschil waterniveau in boorgat en grondwaterstand is kleiner dan 3x de waterhoogte in het boorgat:

$$k = \frac{Q}{2\pi h^2}\left[\frac{\ln h/r}{\frac{1}{6} + \frac{1}{3}\left(\frac{l}{h}\right)}\right] \qquad \text{(B10.6)}$$

Waarbij:

K= verzadigde doorlatendheid (cm/sec)

Q= constant debiet (ml/sec)

h= waterhoogte in het boorgat (cm)

r= straal van het boorgat (cm)

L= afstand tussen waterhoogte in het boorgat en de grondwaterstand of slecht doorlatende laag (cm).

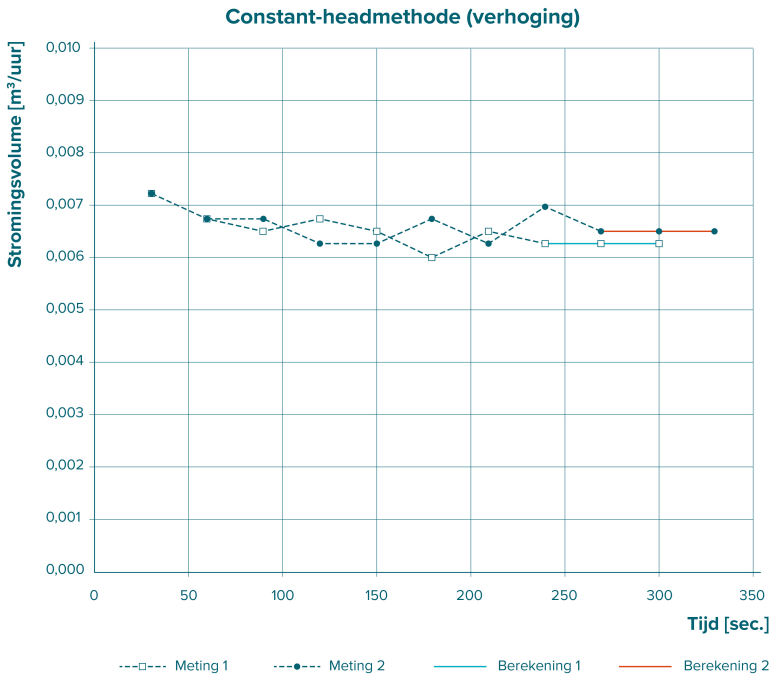
.

Tervisiedocument Stichting RIONED

1.4.7.2 Rekenvoorbeeld

Op deze pagina is de uitwerking van een berekening na een constant-headtest (verhoging) beschreven.

Constant-headtest: het constant verhogen van de grondwaterspiegel waarbij het benodigde debiet wordt gemeten. Het rekenvoorbeeld geeft weer hoe u de meetresultaten kunt verwerken.



Berekening = traject waarover de k-waarde bepaald wordt

Datum van uitvoering:	25 augustus 2010
Diepte boorgat:	0,55 m - maaiveld
Grondwaterstand:	geen
Boorgatdiameter:	0,07 m
Waterhoogte in boorgat:	
reeks 1	0,19 m
reeks 2	0,18 m
Berekende doorlaatfactor (k)	
Voor traject reeks 1:	1,03 m/dag
Voor traject reeks 2:	1,16 m/dag

Meting 1		Meting 2	
Tijd [sec.]	Aflezing debiet	Tijd	Aflezing debiet
0	0	0	0
30	0,0072	30	0,0072
60	0,00672	60	0,00672
90	0,00648	90	0,00672
120	0,00672	120	0,00624
150	0,00648	150	0,00624
180	0,006	180	0,00672
210	0,00648	210	0,00624
240	0,00624	240	0,00696
270	0,00624	270	0,00648
300	0,00624	300	0,00648
		330	0,00648

Figuur A Rekenvoorbeeld constant-headtest (verhoging).

ting RIONED

Uitleg rekenvoorbeeld

$$k_{verz} = A * Q \qquad \text{(B10.1)}$$

waarbij:

k_{verz}= verzadigde doorlatendheid [m/dag]

Q = stromingsdebiet van het water in evenwichtssituatie [m^3/dag]

A = geometrische coëfficiënt [m^{-2}]

.

	Uitleg	Rekenvoorbeeld 1
k_{verz}	verzadigde doorlatendheid [m/dag]	?
Q	stromingsdebiet van het water in evenwichtssituatie [m^3/dag]	0,00624 m^3/uur = 0,15 m^3/dag
A	geometrische coëfficiënt	zie tabel B

$A = \{\sinh^{-1}(H/r) - [($

waarbij:

H = hoogte van

r = straal van h

$\sinh^{-1}$ = inverse hyp

.

Tabel B Berekening geometrische coëfficiënt

	Uitleg	Rekenvoorbeeld 1
H	hoogte van de (totale) waterkolom [m]	0,19 m
r	straal van het boorgat [m]	0,035 m

Invullen geeft: A= 6,85

k_{verz} = 6,85 * 0,15 = 1,03 m/dag

Tervisiedocument Stichting RIONED

1.4.8 Constant-headtest (verlaging) in peilbuis

De constant-headtest houdt in: het constant verlagen van de grondwaterspiegel, waarbij het benodigde debiet wordt gemeten.

Variatie in de wateronttrekking (Quit = variabel) zorgt voor een constante waterpeilverlaging (H = constant), totdat een evenwicht is bereikt. Bij het evenwicht geldt: Qin – Quit = 0 en de waterhoogte (H) is constant. Bij deze methode blijft de waterhoogte H constant door variatie in het debiet Q. Met de huidige apparatuur is dit debiet zeer fijn te regelen.

Toepassingsgebied

$1{,}0*10^{-2}$ m/d < k < 10,0 m/d

Kenmerk: constante verlaging variabele wateronttrekking

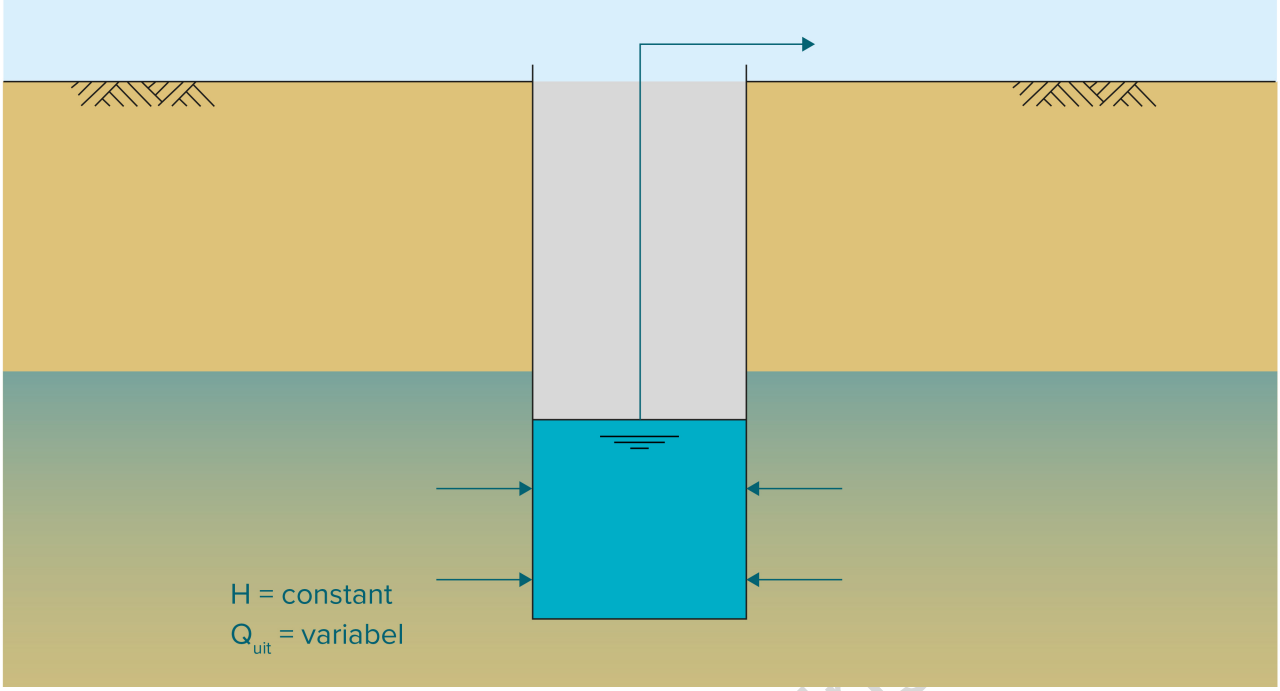
Meting van horizontale doorlatendheid

Onder grondwater

Peilbuis: ja

De meting vindt plaats in een peilbuis in een (hand)boorgat, onder de grondwaterstand. De methode is geschikt voor metingen tot ver beneden het maaiveld, ook diep onder het grondwater. Voorwaarde is wel dat de veldmedewerker de te meten zone met filterstelling en zwelklei voldoende isoleert.

Tervisiedocument Stichting RIONED



Figuur A Kenmerken constant-headtest (verlaging).

Tervisiedocument Stichting

Meetopstelling

Bij de meting moet de veldmedewerker een filterbuis met grotere diameter gebruiken. Ook heeft hij een pomp nodig die een zeer nauwkeurig en constant af te stellen debiet levert. Het onttrokken water moet hij op voldoende afstand van de peilbuis lozen, zodat dit water de meting niet beïnvloedt.

Uitvoering

Een pomp verlaagt met een constante waarde de grondwaterspiegel in de peilbuis. Tijdens het instellen van het evenwicht kan het debiet variëren. De exacte verlaging is afhankelijk van het pompdebiet, het traject waarover u de doorlatendheid wilt bepalen en de grondsoort. De verlaging moet minimaal 2,5 x de diameter van het boorgat bedragen.

Vervolgens meet de veldmedewerker de onttrokken hoeveelheid water per tijdseenheid (a ezen pompdebiet) en de constante verlaging. Hij kan de test stoppen als de stroming constant is. Dit is het geval als de meetwaarden van de onttrokken hoeveelheid water en de waterhoogte minimaal een half uur gelijk zijn. Na de meting brengt de veldmedewerker de bodemopbouw in beeld tot een diepte van minimaal de peilbuis plus 2 x de gecreëerde waterverlaging (DH). Dit is van belang om de juiste formule te bepalen. De diepte van de eerstvolgende ondoorlatende of slecht doorlatende laag beïnvloedt namelijk het meetresultaat.

De uitwerking en een rekenvoorbeeld van deze methode vindt u in Uitleg formules .

Aandachtspunten

- De nauwkeurigheid van de pomp en het afgestelde debiet bepalen de betrouwbaarheid van de meting.
- Het pompdebiet moet exact constant zijn.
- Als het na verloop van tijd ontstane waterniveau in de peilbuis tijdens de test niet echt constant is of blijft, is de meting niet goed uitgevoerd. Dan moet de veldmedewerker deze opnieuw doen.
- Is de ratio H/r (waterkolom/straal boorgat) kleiner dan 5, dan is de meting niet betrouwbaar. De veldmedewerker moet het pompdebiet aanpassen of het boorgat opnieuw (kleiner of groter) boren en de peilbuis herplaatsen. Daarom is goede controle van het waterpeil in het boorgat (H) belangrijk.
- Het onttrokken water moet de veldmedewerker op voldoende afstand van de peilbuis lozen, zodat dit water de meting niet beïnvloedt.

Tervisiedocument Stichting RIONED

1.4.8.1 Uitleg formule

Op deze pagina wordt de toe te passen formule voor de constant-headtest (verlaging) toegelicht.

Zodra het evenwicht is bereikt, is de k-waarde met de volgende formule te bepalen:

$$k_{verz} = \frac{Q}{F * H} \qquad \text{(B11.1)}$$

waarbij:

k_{verz}= (verzadigde) doorlatendheid [m/dag]

Q = debiet constant-flow in de evenwichtssituatie [m³/dag]

F = geometrische factor [m]

H = waterverlaging bij evenwicht [m]

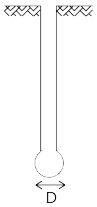
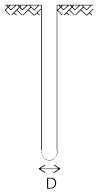
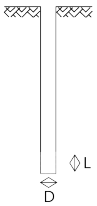
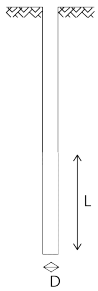
.

F is afhankelijk van de hoogte van het meettrace en staat in Bepalen geometrische factor .

Tervisiedocument Stichting RIONED

1.4.8.2 Bepalen geometrische factor

Voor het berekenen van de doorlatendheid bij de constant-headtest (verlaging) is de geometrische factor benodigd. De geometrische factor is afhankelijk van de vorm, lengte en diameter van het meettracé.

	$F = 2 \cdot \pi \cdot D$	spherical cavity at the bottom of the well
	$F = \pi \cdot D$	semi-spherical configuration – bottom of the well
	$F = \pi \cdot D \cdot \sqrt{4 \cdot L/D + 1}$	Cylindrical cavity with: 0,7 < L/D <1,2
	$F = \dfrac{2 \cdot \pi \cdot L}{\ln\left(\left(L/D\right) + \sqrt{\left(\left(L/D\right)^2 + 1\right)}\right)}$	Cylindrical cavity with: 1,2 < L/D <10
	$F = \dfrac{2 \cdot \pi \cdot L}{\ln\left(2 \cdot L/D\right)}$	Cylindrical cavity with: L/D > 10

Tervisiedocument Stichting RIONED

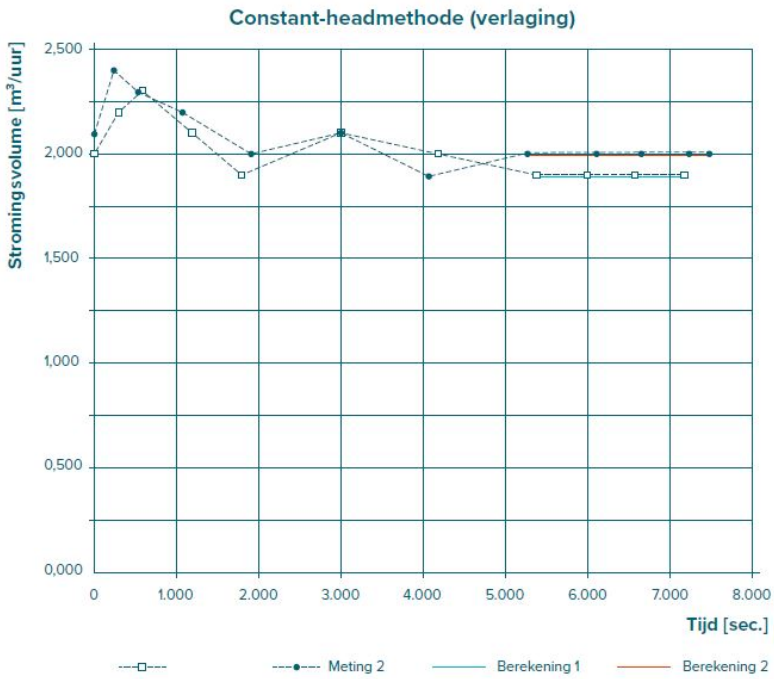
Figuur A Voorbeelden van geometrische factoren (Bron: prEN ISO 22282-1:2008 (E) © ISO 2008) <<OPM Inge: FIGUUR VOLGT NOG IN NIEUWE STIJL>>

Tervisiedocument Stichting RIONED

1.4.8.3 Rekenvoorbeeld

Op deze pagina is de uitwerking van een berekening na een constant-headtest (verlaging) beschreven.

Constant-headtest: het constant verlagen van de grondwaterspiegel waarbij het benodigde debiet wordt gemeten. Het rekenvoorbeeld geeft weer hoe u de meetresultaten kunt verwerken.



Berekening = traject waarover de k-waarde bepaald wordt

Datum van uitvoering:	25 augustus 2010
Diepte boorgat:	2,05 m - maaiveld
Grondwaterstand:	0,55 m
Boorgatdiameter:	0,10 m
Filterlengte:	0,80 m
Waterverlaging in boorgat:	
reeks 1	0,28 m
reeks 2	0,25 m
Berekende doorlaatfactor (k)	
Voor traject reeks 1:	90 m/dag
Voor traject reeks 2:	106 m/dag

Meting 1		Meting 2	
Tijd [sec.]	Aflezing debiet	Tijd	Aflezing debiet
0	2,0	0	2,1
5	2,2	4	2,4
10	2,3	9	2,3
20	2,1	18	2,2
30	1,9	32	2,0
50	2,1	50	2,1
70	2,0	68	1,9
90	1,9	88	2,0
100	1,9	102	2,0
110	1,9	111	2,0
120	1,9	121	2,0
		125	2,0

Figuur A Rekenvoorbeeld constant-headtest (verlaging).

ting RIONED

Uitleg rekenvoorbeeld

$k_{verz} = Q / (F * H)$

Tabel A Berekening k_{verz}

	Uitleg	Rekenvoorbeeld 1
k_{verz}	verzadigde doorlatendheid [m/dag]	?
Q	debiet constant-flow in de evenwichtssituatie [m^3/dag]	1,9 m^3/uur =45,6 m^3/dag
F	geometrische factor [m]	zie: bepalen geometrische factor 1,2 < L/D < 10 zie: tabel B
H	waterverlaging bij evenwicht [m]	0,28 m

Tabel B Berekening geometrische factor

$$F = \frac{2 * \pi * L}{\ln\left(\left(\frac{L}{D}\right) + \sqrt{\left(\left(\frac{L}{D}\right)^2 + 1\right)}\right)}$$

	Uitleg	Rekenvoorbeeld 1
F	Geometrische factor [m]	?
L	Lengte van het filter [m]	0,8 m
D	Diameter van het boorgat [m]	0,1 m

Invullen leidt tot **F = 1,81 m**

$$k_{verz} = \frac{45,6}{1,81 * 0,28} = 90 \text{ m/dag}$$

ment Stichting RIONED

1.4.9 Constant-flowtest (verhoging)

Bij constant-flow wordt de waterstand met een constant debiet (Qin = constant) aangepast tot een constante waterhoogte wordt bereikt.

De constant-flowmethode geeft hetzelfde resultaat als de constant-headmethode. Deze methode is toepasbaar in grovere gronden: bij k-waarden groter dan 0,10 m/d. In de praktijk blijkt dat vooral de constant-headmethode wordt toegepast in de grovere gronden.

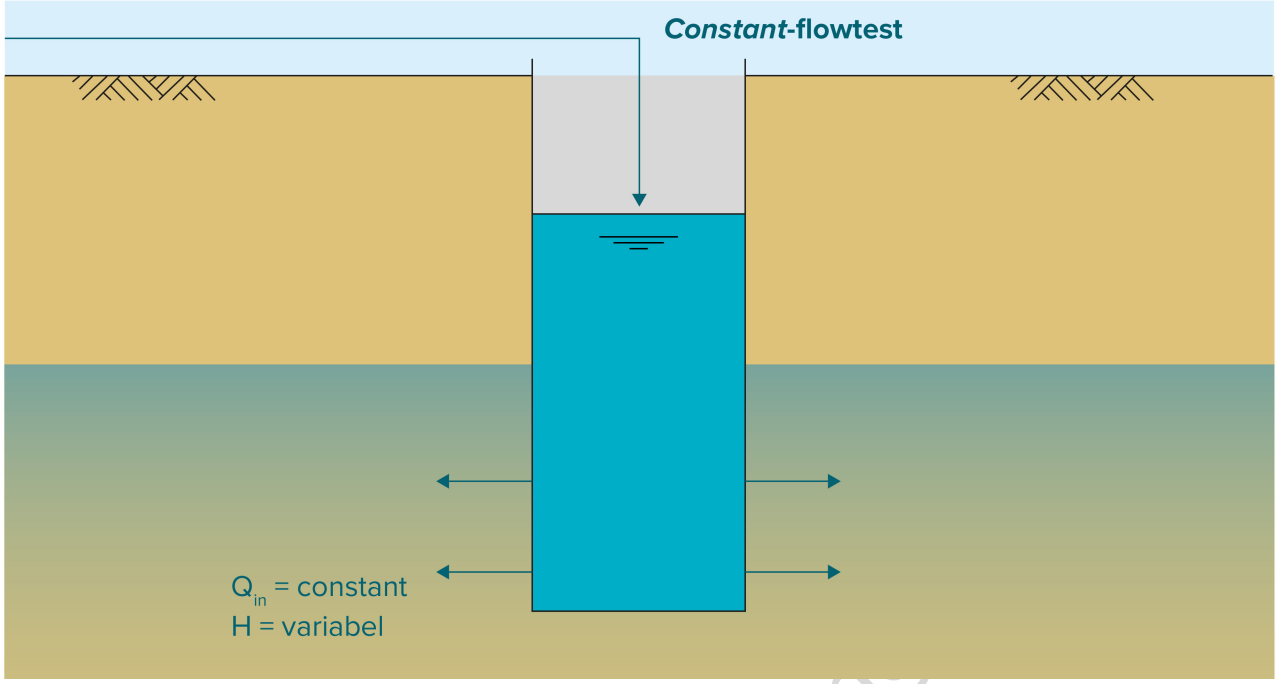
Voor de constant-flowmethode is specifieke apparatuur nodig, waardoor deze methode weinig wordt gebruikt. In de keuze voor meetmethoden (Methode kiezen) blijft deze minder gangbare methode buiten beschouwing.

Toepassingsgebied

Voor bodemmateriaal met een k-waarde groter dan 10 m/d is de constant-flow de beste methode. In de praktijk wordt in dergelijke zeer goed doorlatende bodems geen doorlatendheidstest uitgevoerd voor onderzoek naar infiltratie- of drainagevoorzieningen.

De proef vindt plaats in een (hand)boorgat. De meting is zowel boven als onder de grondwaterstand uit te voeren. Zelfs tot 4 m beneden het maaiveld, ook diep onder het grondwater. Voorwaarde is dan wel dat de veldmedewerker de te meten zone met filterstelling en zwelklei voldoende isoleert. De constant-flowtest houdt in: het verhogen van de grondwaterspiegel met een constant debiet, waarbij zich uiteindelijk een constant waterniveau instelt.

Tervisiedocument Stichting RIONED



Figuur A Kenmerken constantflowtest (verhoging).

Tervisiedocument Stichting

Toepassingsgebied:

- k > 0,10 m/ d
- Kenmerk : constante watertoevoeging
- Meting van horizontale doorlatendheid
- Normen: prEN _ISO- DIS_22282-2
- Boven / onder grondwater
- Peilbuis: ja

Meetopstelling

Bij deze meting moet de veldmedewerker een filterbuis gebruiken om te voorkomen dat het boorgat door de watertoevoeging instort. Ook heeft hij een pomp nodig die een zeer nauwkeurig en constant af te stellen debiet levert.

Uitvoering

Aan de grondwaterspiegel in het boorgat voegt een pomp met een constant debiet water toe. Na verloop van tijd stelt zich een evenwichtssituatie in. Hierbij ontstaat een constante verhoging van de grondwaterspiegel. De exacte verhoging is afhankelijk van het pompdebiet, het traject waarover u de doorlatendheid wilt bepalen en de grondsoort. De verhoging moet minimaal 2,5 x de diameter van het boorgat bedragen.

Vervolgens meet de veldmedewerker de toegevoegde hoeveelheid water per tijdseenheid (aflezen pompdebiet) en de constante verhoging. Hij kan de meting stoppen als de stroming constant is. Dit is het geval als minimaal drie meetwaarden (met een meetinterval van circa 3 minuten) van het toegevoegde water en de waterhoogte gelijk zijn. Na de meting boort hij door tot een diepte van minimaal 2 x de gecreëerde waterhoogte (H). Zo is te controleren welke formule nodig is om het meetresultaat uit te werken.

Uitwerking meetresultaat

Om de k-waarde uit de veldgegevens te berekenen, zijn meerdere modellen beschikbaar. De model - keuze hangt af van de randvoorwaarden van de modellen en de aangetroffen situatie in het veld. Deze bijlage bespreekt een van de modellen.

Als de afstand van de bodem van het boorgat tot de eerste ondoorlatende laag groter is dan 2 x de waterverhoging (H), is de Glover-formule aan te bevelen:

$$k_{verz} = A * Q \qquad \text{(B5.2)}$$

waarbij:

k_{verz}= verzadigde doorlatendheid [m/dag]

Q = stromingsdebiet van het water in evenwichtssituatie [m^3/dag]

A = geometrische coëfficiënt [m^{-2}]

.

De waarde van A is te berekenen door:

$$A = \{\sinh^{-1}(H/r) - [(r/H)^2 + 1]^{1/2} + r/H\}/(2\pi H^2) \qquad \text{(B5.3)}$$

waarbij:

H = hoogte van de waterkolom [m]

r = straal van het boorgat [m]

$\sinh^{-1}$ = inverse hyperbolische sinusfunctie

Tervisiedocument Stichting RIONED

.

Is de afstand van de bodem van het boorgat naar de eerste ondoorlatende laag kleiner dan 2 x de waterverhoging (H), dan is K_{verz} te berekenen door:

$$k_{verz} = B * Q \qquad \text{(B5.4)}$$

waarbij:

B = geometrische coëfficiënt [m^{-2}]

.

B is te berekenen door:

$$B = [3\ln(H/r)]/[\pi H(3H + 2s)] \qquad \text{(B5.5)}$$

waarbij:

H = hoogte van de waterkolom [m]

r = straal van het boorgat [m]

s = afstand van onderkant boorgat tot eerste ondoorlatende laag [m]

.

De Glover-formule met formule B5.2 is geschikt voor H/r-waarden hoger dan 5. Bij een H/r-ratio lager dan 5 wordt de foutenmarge te groot.

Aandachtspunten

- De nauwkeurigheid van de pomp en van het afgestelde debiet bepaalt de betrouwbaarheid van de meting.
- Het pompdebiet moet exact constant zijn.

Tervisiedocument Stichting RIONED

- Als het na verloop van tijd ontstane waterniveau in het boorgat tijdens de test niet echt constant is of blijft, is de meting niet goed uitgevoerd. Dan moet de veldmedewerker deze opnieuw doen.
- Is de ratio H/r kleiner dan 5, dan is de meting niet betrouwbaar. De veldmedewerker moet het pompdebiet aanpassen of het boorgat opnieuw (kleiner of groter) boren. Daarom is goede controle van het waterpeil in het boorgat (H) belangrijk.

Tervisiedocument Stichting RIONED

1.4.10 Constant-flowtest (verlaging)

De constant-flowtest houdt in: het verlagen van de grondwaterspiegel met een constant debiet, waarbij zich uiteindelijk een constant waterniveau instelt.

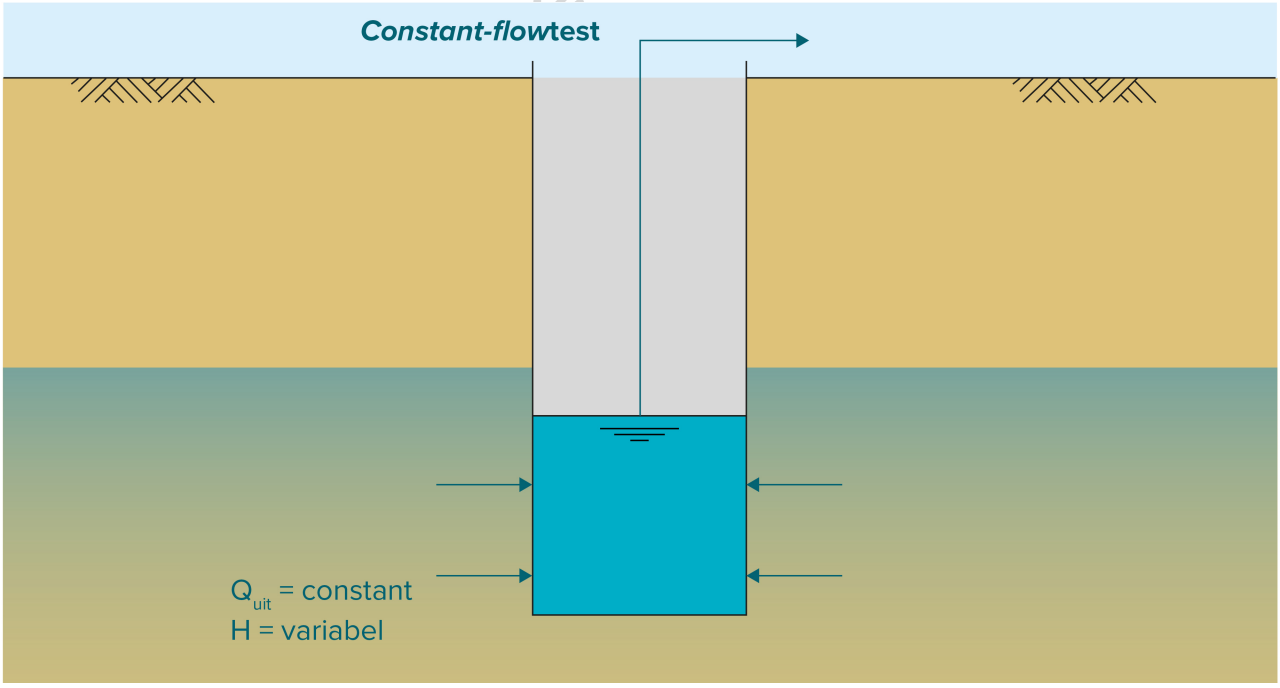
De constant-flowmethode geeft hetzelfde resultaat als de constant-headmethode. Deze methode is toepasbaar in grovere gronden: bij k-waarden groter dan 0,10 m/d. In de praktijk blijkt dat vooral de constant-headmethode wordt toegepast in de grovere gronden.

Voor de constant-flowmethode is specifieke apparatuur nodig, waardoor deze methode weinig wordt gebruikt. In de keuze voor meetmethoden (Methode kiezen) blijft deze minder gangbare methode buiten beschouwing.

Toepassingsgebied

De proef vindt plaats in een (hand)boorgat, onder de grondwaterstand. De methode is geschikt voor metingen tot ver beneden het maaiveld, ook diep onder het grondwater. Voorwaarde is wel dat de veldmedewerker de te meten zone met filterstelling en zwelklei voldoende isoleert.

ent Stichting RIONED



Figuur A Kenmerken constant-flowtest (verlaging).

Toepassingsgebied

- k > 0,10 m/ d
- Kenmerk : constante waterverlaging
- Meting van horizontale doorlatendheid
- Normen: prEN _ISO- DIS_22282-2
- Onder grondwater
- Peilbuis: ja

Meetopstelling

Bij de meting moet de veldmedewerker een filterbuis (met grotere diameter) gebruiken. Ook heeft hij een pomp nodig die een zeer nauwkeurig en constant af te stellen debiet levert. Het onttrokken water moet hij op voldoende afstand van de peilbuis lozen, zodat dit water de meting niet beïnvloedt.

Uitvoering

Een pomp verlaagt met een constant debiet de grondwaterspiegel in het boorgat. Na verloop van tijd stelt zich een evenwichtssituatie in. Hierbij ontstaat een constante verlaging van de grondwaterspie- gel. De exacte verlaging is afhankelijk van het pompdebiet, het traject waarover u de doorlatendheid wilt bepalen en de grondsoort. Maar de verlaging moet minimaal 2,5 x de diameter van het boorgat bedragen.

Vervolgens meet de veldmedewerker de onttrokken hoeveelheid water per tijdseenheid (aflezen pompdebiet) en de constante verlaging. Hij kan de test stoppen als de stroming constant is. Dit is het geval als de meetwaarden van de onttrokken hoeveelheid water en de waterhoogte minimaal een half uur gelijk zijn. Na de meting boort hij door tot een diepte van minimaal 2 x de gecreëerde waterverlaging (H).

Uitwerking meetresultaat

Zodra het evenwicht is bereikt, is de k-waarde met de volgende formule te bepalen:

Tervisiedocument Stichting RIONED

$$k_{verz} = \frac{Q}{F * H} \qquad (B5.1)$$

waarbij:

k_{verz}= verzadigde doorlatendheid [m/dag]

Q = debiet constant-flow in de evenwichtssituatie [m³/dag]

F = geometrische factor [m]

H = waterverlaging bij evenwicht [m]

.

F is afhankelijk van de hoogte het meettracé en staat in bijlage B van de norm prEN_ISO- verz DIS_22282-1 (zie Bepalen geometrische factor).

Aandachtspunten

- De nauwkeurigheid van de pomp en van het afgestelde debiet bepaalt de betrouwbaarheid van de meting.
- Het pompdebiet moet exact constant zijn.
- Als het na verloop van tijd ontstane waterniveau in het boorgat tijdens de test niet echt constant is of blijft, is de meting niet goed uitgevoerd. Dan moet de veldmedewerker deze opnieuw doen.
- Is de ratio H/r kleiner dan 5, dan is de meting niet betrouwbaar. De veldmedewerker moet het pompdebiet aanpassen of het boorgat opnieuw (groter of kleiner) boren. Daarom is goede controle van het waterpeil in het boorgat (H) belangrijk.
- De veldmedewerker moet het onttrokken water op voldoende afstand van de peilbus lozen, zodat dit water de meting niet beïnvloedt.

Tervisiedocument Stichting RIONED

1.5 Laboratoriumproeven verticale doorlatendheid

Dit onderdeel beschrijft laboratoriumproeven om de verticale verzadigde doorlatendheid van een bodemmonster te bepalen.

Deze proeven zijn in vier variaties uit te voeren:

- falling-head;
- rising-head;
- constant-head (verhoging);
- constant-head (verlaging).

De toelichting op deze methoden vindt u in de onderdelen Falling-headtest in boorgat of peilbuis , Rising-headtest in boorgat of peilbuis , Constant-headtest (verhoging) in boorgat of peilbuis en Constant-headtest (verlaging) in boorgat of peilbuis .

In de onderdelen Falling-head/rising-head en Constant-head (verhoging/verlaging) staan de formules om de doorlatendheid te berekenen aan de hand van de uitkomsten in het laboratorium.

Tervisiedocument Stichting RIONED

1.5.1 Falling-head/rising-head

In het laboratorium kan een falling-head of rising-head test gedaan worden op een ongeroerd bodemmonster om de doorlatendheid te bepalen.

Toepassingsgebied

Voor deze proef is een ongeroerd gestoken monster nodig (zie meetopstelling hieronder) uit de laag waarvan u de doorlatendheid wilt laten berekenen. Dit monster is zowel uit de verzadigde als de onverzadigde zone te halen. De meting vindt plaats op slecht doorlatende grond.

Tabel A Kenmerken laboratoriumproef falling-head en rising-head

Toepassingsgebied:	k<1,0 m/d
Kenmerk:	eenmalige verhoging/verlaging, meting van daling/stijging in laboratorium
Meting van de verzadigde verticale doorlatendheid	
Gestoken ongeroerd monster	
Normen:	NEN 5124

Meetopstelling

Het ongeroerd gestoken monster is ongeveer 30 à 40 cm lang en heeft een diameter van 5 tot 7 cm. De (steekbus)ring blijft om het monster om de wanden af te sluiten. Zo kan het water alleen in verticale richting stromen.

Aandachtspunten

Het monster/de steekbus moet goed gevuld zijn en goed worden vervoerd. Als de bus niet volledig gevuld is, kan de pakking van het monster slapper worden. Hierdoor verandert de k-waarde. Het monster mag niet worden geroerd, het moet altijd een steekbus zijn. Omdat het monster slechts een klein stukje bodem bevat, is de homogeniteit /heterogeniteit van de bodem nog meer van belang dan bij veldmetingen. De representativiteit van dit monster bepaalt de waarde van de meting. Er is geen samenhang met de omliggende bodem (zoals bij een veldmeting).

Uitwerking meetresultaat - Falling-head/rising-head

Tervisiedocument Stichting RIONED

De doorlatendheid kunt u berekenen met de volgende formule:

$$k_{verz} = \frac{A_1 L}{A_2(t_2 - t_1)} ln \frac{h(t_1)}{h(t_2)} \qquad \text{(B12.1)}$$

waarbij:

k_{verz}	=	(verzadigde) doorlatendheid [m/dag]
L	=	lengte van het monster [m]
$h(t_1)$, $h(t_2)$	=	waterpeil op monster op tijdstip t1 en t2 [m]
t_2-t_1	=	tijdsinterval [dagen]
A_1	=	doorstroomoppervlak van de ring [m²]
A_2	=	doorstroomoppervlak van het monster [m²]

.

Tervisiedocument Stichting RIONED

1.5.2 Constant-head (verhoging/verlaging)

In het laboratorium kan een constant-headtest (verhoging/verlaging) gedaan worden op een ongeroerd bodemmonster om de doorlatendheid te bepalen.

Toepassingsgebied

Voor deze proef is een ongeroerd gestoken monster nodig uit de laag waarvan u de doorlatendheid wilt laten berekenen. Dit monster is zowel uit de verzadigde als de onverzadigde zone te halen. De meting vindt plaats op goed doorlatende grond.

Tabel A Kenmerken laboratoriumproef constant-head (verhoging/verlaging)

Toepassingsgebied	0,1 m/d < k < 1000 m/d
Kenmerk	constante verhoging variabele watertoevoeging of constante verlaging variable wateronttrekking in laboratorium
	Meting van de verzadigde verticale doorlatendheid
	Gestoken ongeroerd monster
Normen	NEN 5123

Meetopstelling

Het steekmonster (in het veld genomen) is ongeveer 30 à 40 cm lang. Uit dit steekmonster neemt de labmedewerker een proefmonster. Na preparatie plaatst hij dit proefmonster in de meetopstelling.

Aandachtspunten

De aandachtspunten zijn dezelfde als bij Falling-head/rising-head .

Uitwerking meetresultaat – Constant-head (verhoging/verlaging)

De k-waarde kunt u berekenen met de volgende formule, afgeleid van de wet van Darcy:

Tervisiedocument Stichting RIONED

$$k_{verz} = \frac{QL}{A\Delta h} \qquad \text{(B12.2)}$$

waarbij:

k_{verz} = doorlatendheid [m/dag]

Q = constant debiet [m^3/dag]

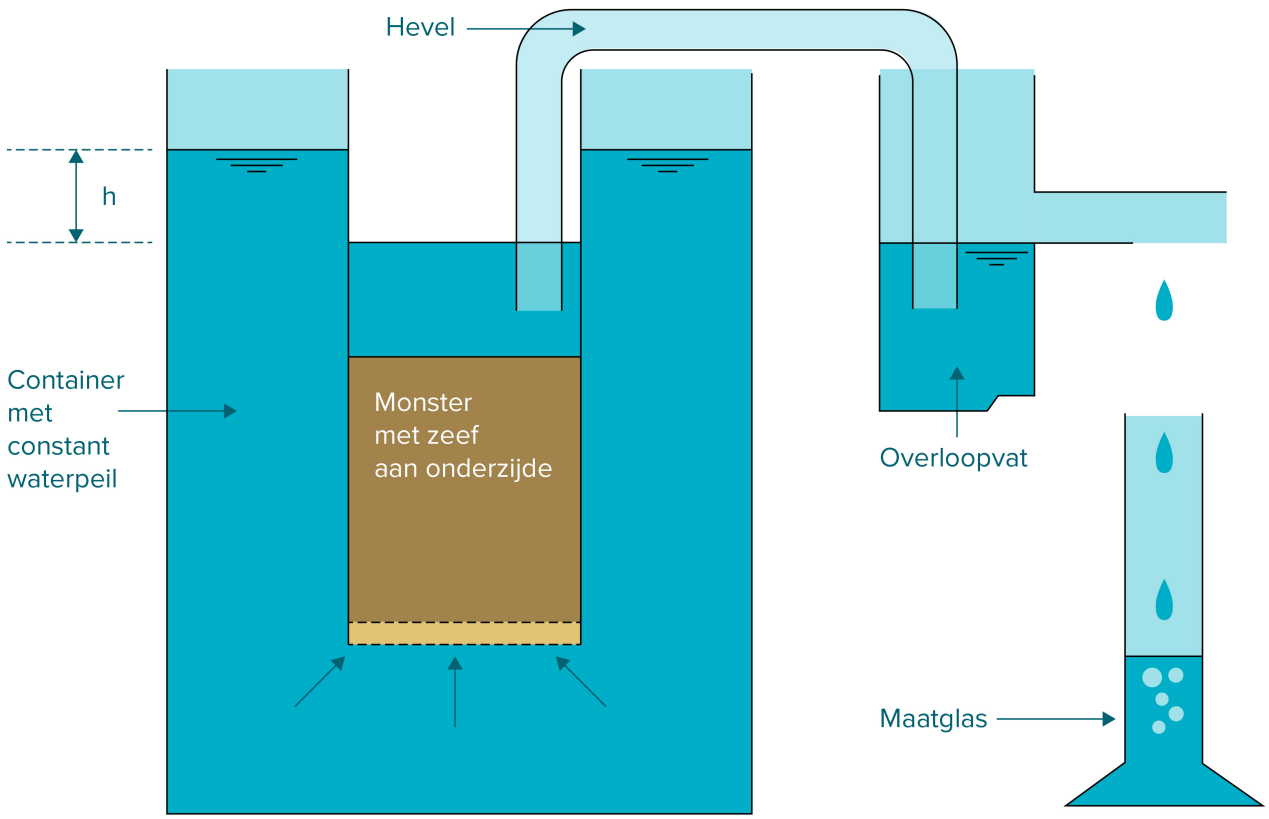
Δh = constant potentiaalverschil [m]

L = lengte van het monster [m]

A = doorstroomoppervlak van het monster [m^2]

.

In figuur A ziet u de verschillende parameters.



Figuur A Opstelling laboratoriumproef constant-head.

Stichting RIONED

1.6 Indirecte bepaling doorlatendheid (methoden)

Soms volstaat een indicatieve bepaling van de doorlatendheid.

Bijvoorbeeld als u alleen wilt weten of een bodem slecht, matig, goed of zeer goed doorlatend is, dan kunt u dit indirect en indicatief (laten) bepalen. Hiervoor bestaan verschillende methoden:

- korrelverdelingsanalyse ;
- boorbeschrijving/veldinschatting;
- sondering.

Onderliggende pagina's beschrijven deze drie indirecte methoden om de doorlatendheid in te schatten.

Tervisiedocument Stichting RIONED

1.6.1 Korrelverdelingsanalyse

In het laboratorium kan van een bodemmonster een korrelverdelingsanalyse worden uitgevoerd. De resultaten kunnen met behulp van verschillende formules worden omgerekend naar de doorlatendheid.

Over het algemeen bestaat de Nederlandse grond uit deeltjes (korrels) van verschillende grootte (grofweg kleiner dan 4 mm) en verschillend materiaal. Afhankelijk van het soort afzetting is de grond fijner of grover. Grovere grond heeft een grotere doorlatendheid (zie ook Doorlatendheid van de bodem) . Hoe fijner het materiaal, hoe kleiner de doorlatendheid.

De grootte van de korrels en de verhouding van de verschillende korrelgrootten kenmerken een grondsoort. De diverse korrelgrootten hebben elk hun eigen naam (zie tabel A).

Tabel A Materialen en korrelgrootten (conform NEN-EN-ISO 14688)

Naam	**Korrelgrootte [mm]**
Lutum	<0,002
Silt	0,002 tot 0,063
Zand	0,063 tot 2,0
Grind	2,0 tot 63
Steen	63 tot 200
Keien	200 tot 630
Blokken	> 630

Tervisiedoument Stichting RIONED

Tabel B Kenmerken korrelverdelingsanalyse

Korrelverdelingsanalyse	
Normen en richtlijnen:	Het laboratorium voert de korrelverdelingsanalyse volgens actuele geldende normen en richtlijnen uit.
Mengmonsters:	Nee

Inzicht in:	Onder andere samenstelling monster, fractiebepaling, d-waarden, verdichtingsmogelijkheid, een- of tweetoppigheid, inschatting van de doorlatendheid, reinigbaarheid.
Aandachtspunt:	Doorlatendheidsbepaling op basis van korrelverdeling is een empirische inschatting, waarbij maar een beperkt aantal van alle doorlatendheidsbepalende factoren mee te nemen is.
Toegevoegde waarde:	Korrelverdelingsanalyse verbindt boorbeschrijving en doorlatendheidsonderzoek.

Methoden laboratorium

De grofheid van het materiaal is in het veld te bepalen. De nauwkeurigheid hiervan is sterk afhankelijk van de deskundigheid en ervaring van de veldmedewerker. Vooral de siltfractie (materiaal tussen 2 en 63 µm) is zeer lastig te bepalen en vereist ervaring en deskundigheid.

Door de korrelverdeling van het materiaal te bepalen, ontstaat een nauwkeuriger beeld van de samenstelling van het bodemmateriaal. Hiervoor zijn verschillende methoden beschikbaar:

- Zeving van het materiaal:
  - door droge zeving, bijvoorbeeld de zogenoemde SCG -analyse (NEN 5753);
  - door natte zeving, bijvoorbeeld de RAW -analyse (RAW -proeven 1,2, 6 en 9).
- Bezinking met areometertest conform de RAW .
- Röntgenstralingsmetingen op basis van verschil in valsnelheid door de sedigraaf te gebruiken.
- Luchtstraalzeving (NEN-EN 933 deel 10).
- Laserdiffractie (NEN ISO 13320 deel 1).
- Spectroscopie (NEN ISO 13321).

De industrie past vooral luchtstraalzeving , laserdiffractie en spectroscopie toe. Deze methoden komen binnen de geotechniek en geohydrologie minder vaak voor. Deze module beperkt zich tot de in deze vakgebieden meestvoorkomende methoden: zeving van deeltjes conform de NEN 5753 en de RAW -proeven.

Bij de RAW -methode worden carbonaat en organische stof niet verwijderd. Het lab rapporteert de fracties altijd in percentage van de totale massa van de droge stof. Bij de zeving van deeltjes conform NEN 5753 worden carbonaat en

Tervisiedoument Stichting RIONED

organische stof wel verwijderd. Hierbij kan het lab zowel in percentage van de droge stof als in percentage van de minerale delen rapporteren. De wegenbouw gebruikt vaak de RAW -methode. De NEN 5753 wordt bij milieukundig bodemonderzoek toegepast om onder meer de reinigbaarheid van grond te beoordelen.

Tervisiedocument Stichting RIONED

1.6.1.1 Uitvoering korrelverdelingsanalyse

Op deze pagina staat beschreven welke fracties bepaald kunnen worden bij een korrelverdelingsanalyse om inzicht in de doorlatendheid te krijgen.

Voor een goed inzicht in de opbouw van het bodemmonster is een uitgebreide zeving van minimaal tien korrelfracties wenselijk. Ook de fracties kleiner dan 63 µm horen hierbij. Juist de fijne fractie is erg belangrijk bij verschillende aspecten van de bodem. Het advies is de volgende fracties te laten bepalen:

Tabel A Te bepalen fracties bij zeven

Nummer	Fractie
1	4 mm (alleen nodig bij grove mengsels)
2	2 mm
3	1 mm
4	500 µm
5	250 µm
6	125 µm
7	63 µm
8	50 µm
9	32 µm
10	16 µm
11	2 µm

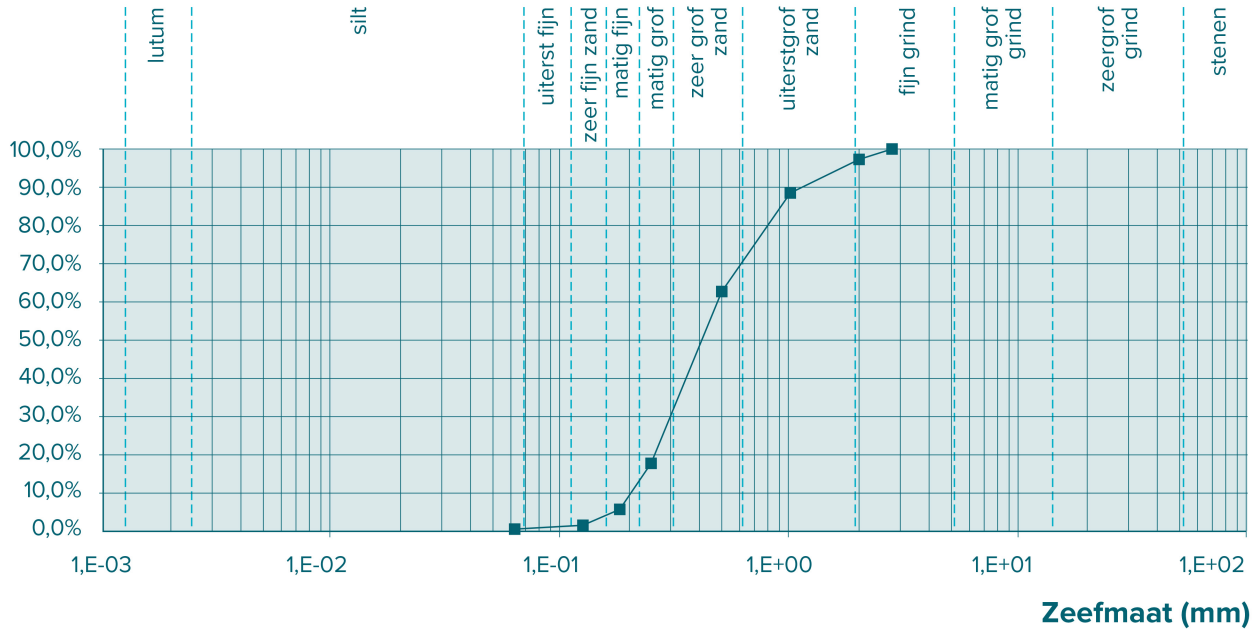
Let op: Voor het toepassen van de Grontmij formule (toepassingsgebied; zand en sterk zandige klei) is de bepaling van het lutumgehalte (< 2 µm) benodigd.

De labmedewerker bepaalt de grove fractie van het grondmonster via droge zeving. Voor de deeltjes kleiner dan 63 µm is dit niet mogelijk, hiervoor moet hij nat zeven. Voor de deeltjes kleiner dan 16 µm is de korrelverdeling op verschillende manieren te bepalen, bijvoorbeeld met de areometertest, de sedigraaf of een pipet.

Van nature komen homogeen samengestelde bodems bijna niet voor, meestal bestaat een grond- monster uit meerdere fracties. Figuur A geeft de verschillende fracties van een willekeurig gekozen zandmonster cumulatief in een korrelverdelingsdiagram (zeefkromme) weer.

De uitwerking van deze methode, de formules en een rekenvoorbeeld vindt u in Formules en uitwerking .

Tervisiedocument Stichting RIONED



Figuur A Voorbeeld korrelverdelingsanalyse.

Tervisiedocument Stichting

Op basis van het korrelverdelingsdiagram zijn verschillende zaken te bepalen die interessant zijn voor het doorlatendheidsonderzoek, zoals:

- De samenstelling van het grondmonster (% zeer grof zand, % matig grof zand, % matig fijn zand, etc.).
- Zeer nauwkeurige fractiebepaling (lutum, silt en zand) en de daaraan gerelateerde bodemclassificatie volgens de NEN 5104 (zanddriekhoek).
- De d-waarden: het percentage grond dat door de zeef is gegaan. Oftewel het massapercentage kleiner dan de betreffende waarde. Stel d90 = 1,18 mm, dan betekent dit dat 90% van de massa van het zandmengsel een korrelgrootte kleiner dan 1,18 mm heeft.

1.6.1.2 Nut en noodzaak korrelverdelingsanalyse

Deze pagina beschrijft de voor- en nadelen van een korrelverdelingsanalyse (ten opzichte van directe bepalingen) en de aandachtspunten.

Voordelen

Een korrelverdelingsanalyse is een onafhankelijke, goed beschreven, herhaalbare methode om inzicht in de samenstelling van het bodemmateriaal te krijgen. De analyse is zeer breed toepasbaar, onder andere in geotechniek, milieu en geohydrologie. Bij uitvoering volgens de standaardprotocollen en -richtlijnen is er een kleine kans op fouten.

Nadelen

Een korrelverdelingsanalyse houdt geen rekening met de gelaagdheid en lokale opbouw van de bodem. Juist deze gelaagdheid is erg belangrijk bij de stroming in de bodem. Daarnaast verdwijnt de pakking bij het zeven en wordt het ijzergehalte niet bepaald.

Soms bepaalt het lab vóór de analyse ook het kalk- en humusgehalte, maar dit gebeurt lang niet altijd. Of dit wel of niet gebeurt, is van invloed op de gemeten korrelverdeling.

Aandachtspunten

- Laat altijd de fracties groter dan 2 mm in de rapportage opnemen. Deze hebben invloed op de doorlatendheid van het materiaal. (Bij fijne mengsel is de fractie groter dan 2 mm niet aanwezig, dan is alleen de zeving van kleine deeltjes kleiner dan 2 mm van belang).
- Laat altijd de fracties kleiner dan 0,063 mm bepalen en laat deze ook rapporteren.
- Laat het percentage humus (het gloeiverlies) bepalen.
- Laat het percentage carbonaat (calcium) bepalen.
- Laat het lutumgehalte bepalen bij toepassing van de Grontmij formule.
- Laat de zeving voorbehandelen zodat conglomeraten worden afgebroken.
- Laat de zeving pas uitvoeren na verwijdering van humus en carbonaten.
- Laat de zeving rapporteren in percentage droge stof (exclusief humus en carbonaat), dus niet in percentage minerale delen (inclusief humus en carbonaat).

Tenvisiedocument Stichting RIONED

1.6.1.3 Toepassingsgebied formules en uitwerking korrelverdelingsanalyse

Met de gegevens uit de korrelverdelingsanalyse is de doorlatendheid van de bodem in te schatten. Hiervoor zijn verschilllende formules beschikbaar, die op deze pagina staan beschreven.

Uitwerking gegevens korrelverdelingsanalyse

In de loop van de jaren hebben veel personen wereldwijd formules bedacht die een of meer van de doorlatendheidsbepalende factoren meenemen. Tabel A geeft een overzicht van formules waarvan een toepassingsgebied bekend. Dit is dus slechts een selectie van de beschikbare formules. Omdat binnen de Nederlandse geohydrologie de doorlatendheid voornamelijk wordt uitgedrukt in m/d, is de uitkomst van de verschillende formules ook in m/d. Bij "uitleg formules" vindt u een nadere toelichting op de formules.

Tervisiedocument Stichting RIONED

Naamgever	Formule	Toepassingsgebied
Hazen	$k = \frac{g}{\upsilon} * 6 * 10^{-4} * (1 + 10 * (n - 0{,}26)) * d_e^2$	$0{,}1\,mm < d_e < 3\,mm$ $C = \frac{d_{60}}{d_{10}} < 5$
Beyer	$k = 388.8 * log\left(\frac{500}{C}\right) * d_e^2$	$0{,}06\,mm < d_e < 0{,}6\,mm$ $1 < C = \frac{d_{60}}{d_{10}} < 20$
Beyer aangepast door Grundbau Tachenbuch	$k = \left(\frac{E}{\frac{d_{60}}{d_{10}} + F} + G\right) * 8{,}64 * d_e^2$	$0{,}06\,mm < d_e < 0{,}6\,mm$ $1 < C = \frac{d_{60}}{d_{10}} < 20$
Kozeny	$k = \frac{g}{\upsilon} * 8{,}3 * 10^{-4} * \frac{n^3}{(1-n^2)} * d_e^2$	Grove zanden
USBR	$k = \frac{g}{\upsilon} * 4{,}8 * 10 * d_{20}^{0{,}3} * d_e^2$	$C < 5$ Zand en zandige klei
Sauerbrei	$k = \frac{g}{\upsilon} * 3{,}75 * 10^{-3} * \tau * \frac{n^3}{(1-n)^2} * d_e$	$d_{100} < 0{,}5\,mm$ Zand en zandige klei
Pavchich	$k = 302{,}4 * \tau * d_e^2$	$0{,}06\,mm < d_e < 1{,}5\,mm$
Grontmij	$k = \left(\frac{m_{63}}{60}\right)^2 * 10^{-0{,}2*L}$	Zand en sterk zandige klei $L < 12\,\%$
Seelheim	$k = 308 * d_{50}^2$	$C < 2{,}5$

k = doorlatendheid [m/d] of [m/s]
g = gravitatie versnelling [m/s^2]
C = uniformiteitscoëfficient
υ = kinematische viscositeit [m^2/s]
d_e = effectieve korreldiameter (de maatgevende korreldiameter waarmee de hoeveelheid kleine deeltjes wordt meegenomen, verschilt per formule) [mm]
n = porositeit [-]
t = temperatuurcorrectiefactor [-]
E = pakkingsfactor Beyer
F = pakkingsfactor Beyer
G = pakkingsfactor Beyer
L = lutumgehalte [%]
m_{63} = mediaan van de zandfractie [mm]

Tabel A Formules om doorlatendheid te berekenen met korrelverdelingsanalyse

Toepassing formules

Elke formule is ontwikkeld door iemand die in een specifiek deel van de wereld werkzaam was en dus bedacht voor de daar geldende omstandigheden en randvoorwaarden. Elke formule heeft dus zijn eigen toepassingsgebied en moet ook hierin worden toegepast. Gebruik erbuiten resulteert in te grote of te kleine waarden.

De gemeten doorlatendheid geeft altijd een beter inzicht dan de berekende doorlatendheid op basis van de korrelverdeling.

Tervisiedocument Stichting RIONED

Uitleg formules

Formule van Hazen

$$k = \frac{g}{\upsilon} * 6 * 10^{-4} \quad * (1 + 10 * (n - 0{,}26)) * d_e^2$$

waarbij:

k = doorlatendheid [m/s]

g = gravitatieconstante [9,81 m/s^2]

υ = kinematische viscositeit [m^2/s]

n = porositeit [-]

d_e = effectieve korreldiameter [mm], bij Hazen de = d_{10}

.

Twee randvoorwaarden bepalen het toepassingsgebied van deze formule:

$$0{,}1\,\text{mm} < d_e < 3\,\text{mm}$$

$$C = \frac{d_{60}}{d_{10}} < 5$$

.

Formule van Beyer

Tervisiedocument Stichting RIONED

$$k = 388.8 * log\left(\frac{500}{C}\right) * d_e^2$$

waarbij:

k = doorlatendheid [m/d]

C = uniformiteitscoëfficiënt [-]

d_e = effectieve korreldiameter [mm], bij Beyer de = d_{10}

.

Twee randvoorwaarden bepalen het toepassingsgebied van deze formule:

$$0{,}06 \text{ mm} < d_e < 0{,}6 \text{ mm}$$

$$1 < C = \frac{d_{60}}{d_{10}} < 20$$

.

Formule van Beyer aangepast door Grunbay Taschenbuch

$$k = \left(\frac{E}{\frac{d_{60}}{d_{10}} + F} + G\right) * 8{,}64 * d_e^2$$

waarbij:

k = doorlatendheid [m/d]

d_{10} = korreldiameter behorend bij 10% zeefdoorgang [mm]

d_{60} = korreldiameter behorend bij 60% zeefdoorgang [mm]

d_e = effectieve korreldiameter [mm], bij Beyer $d_e = d_{10}$

Tervisiedocument Stichting RIONED

.

Tabel B Pakkingsfactor Beyer aangepast door Grundbau Taschenbuch

	Los	Matig	Vast
E [-]	349	268	234
F [-]	4,4	3,4	3,1
G [-]	80	55	39

Twee randvoorwaarden bepalen het toepassingsgebied van deze formule:

$$0{,}06\ \text{mm} < d_e < 0{,}6\ \text{mm}$$

$$1 < C = \frac{d_{60}}{d_{10}} < 20$$

.

Formule van Kozeny

$$k = \frac{g}{\upsilon} * 8{,}3 * 10^{-4} * \frac{n^3}{(1-n^2)} * d_e^2$$

waarbij:

k = doorlatendheid [m/s]

g = gravitatieconstante [9,81 m/s^2]

υ = kinematische viscositeit [m^2/s]

n = porositeit [-]

d_e = effectieve korreldiameter [mm], bij Kozeny $d_e = d_{10}$

.

Tervisiedocument Stichting RIONED

Deze formule is alleen toepasbaar bij grove zanden.

Formule van USBR

$$k = \frac{g}{\upsilon} * 4{,}8 * 10 \quad * d_{20}^{0{,}3} * d_e^2$$

waarbij:

k = doorlatendheid [m/s]

g = gravitatieconstante (9,81 m/s^2)

υ = kinematische viscositeit [m^2/s]

d_{20} = korreldiameter behorend bij 20% zeefdoorgang [mm]

d_e = effectieve korreldiameter [mm], bij USBR $d_e = d_{20}$

.

Twee randvoorwaarden bepalen het toepassingsgebied vanddeze formule:

$$C < 5$$

.

Zand en zandige klei

Formule van Sauerbrei

Tervisiedocument Stichting RIONED

$$k = \frac{g}{\upsilon} * 3{,}75 * 10^{-3} * \tau * \frac{n^3}{(1-n)^2} * d_e$$

waarbij:

k = doorlatendheid [m/s]

g = gravitatieconstante [9,81 m/s^2]

υ = kinematische viscositeit [m^2/s]

τ = temperatuurcorrectiefactor [-]

n = porositeit [-] (niet in %, maar eenheidsloos!)

d_e = effectieve korreldiameter [mm], bij Sauerbrei de = d_{17}

.

Twee randvoorwaarden bepalen het toepassingsgebied van deze formule:

$C < 5$

.

Zand en zandige klei

Formule van Pavchich

Tervisiedocument Stichting RIONED

$$k = 302{,}4 * \tau * d_e^2$$

waarbij:

k = doorlatendheid [m/d]

τ = temperatuurcorrectiefactor [-]

d_e = effectieve korreldiameter [mm], bij Pavchich de = d_{17}

.

Eén randvoorwaarde bepaalt het toepassingsgebied van deze formule:

$$0{,}06 \text{ mm} < d_e < 1{,}5 \text{ mm}$$

.

ment Stichting RIONED

T [° C]	[-]	T [° C]	[-]	T [° C]	[-]
0	0,588	10	0,807	20	1,052
1	0,612	11	0,837	21	0,080
2	0,635	12	0,854	22	1,107
3	0,656	13	0,874	23	1,131
4	0,676	14	0,902	24	1,155
5	0,698	15	0,926	25	1,180
6	0,721	16	0,950	30	1,313
7	0,744	17	0,975	40	1,620
8	0,766	18	1,000	50	1,926
9	0,786	19	1,025	60	2,231

Tabel B Temperatuur- correctiefactoren bij gebruik formule van Pavchich

Formule van Seelheim

$$k = 308 * d_{50}^{2}$$

waarbij:

k = doorlatendheid [m/d]

d_{50} = korreldiameter behorend bij 50% zeefdoorgang [mm]

.

Eén randvoorwaarde bepaalt het toepassingsgebied van deze formule:

$$C < 2{,}5$$

.

Formule van Grontmij (1979)

$$k = \left(\frac{m_{63}}{60}\right)^{2} * 10^{-0{,}2*L}$$

waarbij:

k = doorlatendheid [m/d]

L = lutumgehalte (deeltjes kleiner dan 2 µm) [%]

m_{63} = mediaan van de zandfractie [µm]

.

Tervisiedocument Stichting RIONED

Twee randvoorwaarden bepalen het toepassingsgebied van deze formule:

$$L < 12\%$$

.

Zand en sterk zandige klei

Tervisiedocument Stichting RIONED

1.6.2 Boorbeschrijving

Op basis van een boorbeschrijving kan een (onzekere) inschatting van de doorlatendheid worden gemaakt.

In de afgelopen eeuw hebben verschillende onderzoekers (onder wie Hooghoudt, Ernst, Locher en De Bakker, Grontmij) geprobeerd een verband te vinden tussen de boorbeschrijving en de doorlatendheid. In 1996 publiceerde de heer Pomper hierover een uitgebreid artikel in het blad Stromingen (het vakblad van de Nederlandse Hydrologische Vereniging). Hierbij rekende hij de volgende aspecten van de boorbeschrijving om:

- de sortering naar het S-cijfer;
- de zandfractie van het beschreven sediment naar het U-cijfer;
- het slibgehalte naar een correctiefactor;
- het humusgehalte naar de correctiefactor.

Op basis van deze getalswaarden is de doorlatendheid in te schatten. Een beschrijving van deze methode vindt u in het betreffende artikel uit Stromingen (via www.nhv.nu kunt u dit artikel met de zoekfunctie opvragen).

Ook het Cultuurtechnisch Vademecum beschrijft correlatieve en empirische methoden om de doorlatendheid te bepalen op basis van poriëngrootteverdeling, lutumgehalte en het M50-cijfer.

Deze methoden bevat een zeer grote onzekerheid en stelt eisen aan de kundigheid van zowel de veldmedewerker als degene die de gegevens verwerkt en interpreteert. Daarom werkt dit onderdeel de boorbeschrijvingsmethode niet verder uit.

Tervisiedocument Stichting RIONED

1.6.3 Sondering

Door het plaatsen van een sondering kan indicatief inzicht worden verkregen in de variatie van de grondsoorten en doorlatendheid.

Bij een sondering wordt een metalen kegelvormige conus in de grond gedrukt (meestal tot 25 à 50 meter). Hierbij is zowel de weerstand die de conus ondervindt te meten als de wrijving die de wand van de conus ondervindt. Sommige bedrijven meten niet standaard de wandwrijving, dus vraag hier altijd expliciet om.

De sondeergegevens komen vervolgens in een grafiek die ook het berekende wrijvingsgetal (verhouding plaatselijke wrijving/conusweerstand) laat zien. Het wrijvingsgetal geeft samen met de conusweerstand een indicatie van de bodemopbouw onder de grondwaterstand. Conusweerstanden van meer dan 2 à 3 MegaPascal (MPa) duiden op zandlagen. Lagere weerstanden komen meestal voor in samenhangende lagen (klei, leem, veen). Tabel A geeft een indicatie van de relatie tussen het wrijvingsgetal en verschillende grondsoorten.

Tabel A indicatieve relatie wrijvingsgetal en grondsoort
(Bron: www.votb.nl/ondergrond/4.html)

Grondsoort	Wrijvingsgetal [%]
Zand	0,8 - 1,2
Leem	1,2 - 3
Klei	3 - 6
Veen	6 en hoger

N.B. Boven het grondwater kunnen de waarden in tabel A aanzienlijk afwijken.

Aandachtspunten

- Laat de sondering uitvoeren conform NEN-EN-ISO 22476-1
- Laat behalve de conusweerstand ook altijd het wrijvingsgetal en de waterspanning meten.
- Alleen onder het grondwaterniveau zijn representatieve sondeergevens te krijgen.

HPT sondering

Bij het uitvoeren van een Hydraulic Profiling Tool (HPT) sondering wordt tijdens het sonderen continu water met een constant debiet in de bodem geïnjecteerd. De injectiedruk wordt daarbij geregistreerd. De hoeveelheid geïnfiltreerd

Tervisiedocument Stichting RIONED

water, gedeeld door de gemeten injectiedruk, geeft een relatieve waarde voor de waterdoorlatendheid van de grondlagen. Door deze metingen te koppelen aan directe / in-situ bepalingen op verschillende diepten kan de relatieve doorlatendheid vertaald worden naar absolute doorlatendheid.

Tervisiedocument Stichting RIONED

1.7 Beoordelen uitkomsten doorlatendheidsonderzoek

Dit onderdeel beschrijft de beoordeling van de uitkomsten van de doorlatendheidsonderzoeken.

Na het uitvoeren van de doorlatendheidsonderzoeken is het zaak om de resultaten te controleren. Deze pagina geeft aan op welke punten de resultaten gecontroleerd kunnen worden.

Een goede opbouw is nog geen garantie voor een goede uitvoering en rapportage van de doorlatendheidsproeven. Daarom staat in tabel A een lijst met aandachtspunten, waarop u bij de beoordeling van een rapport in elk geval moet letten.

Tabel A. Aandachtspunten beoordeling uitgevoerd doorlatendheidsonderzoek

Aandachtspunten
Zijn de juiste doorlatendheidsproeven uitgevoerd op basis van bodemopbouw, grondwaterstand en doel?
Zijn de doorlatendheidsmetingen in het juiste bodemtraject uitgevoerd?
Komt de gemeten doorlatendheid overeen met wat op grond van het bodemtype in de boorbeschrijving te verwachten is?
Als de resultaten afwijken van de verwachting op basis van bodemtype; is tijdens de uitvoering hierover contact opgenomen door de veldwerker met de opdrachtgever van het veldwerk? Waar wordt dit door veroorzaakt?
Zijn de boringen voldoende diep doorgezet om storende lagen te kunnen detecteren?
Zijn de doorlatendheidsproeven vaak genoeg herhaald?
Is de te onderzoeken bodemlaag voor de start van de proef voldoende voorverzadigd?
Een doorlatendheidsonderzoek geeft altijd meerdere uitkomsten, doordat meerdere proeven uitgevoerd worden. Door herhalingen, verschillende methoden (bijvoorbeeld korrelverdelingsanalyse en directe veldmeting), en/of proeven op verschillende locaties in het plangebied. Het is belangrijk om bij vervolgstappen de bandbreedte van de uitkomsten (k-waarden) te blijven gebruiken. Hierdoor blijft de onzekerheidsmarge van de doorlatendheid zichtbaar, wat van belang is bij de dimensionering van voorzieningen.

Een niet goed uitgevoerd doorlatendheidsonderzoek kan zorgen voor complicaties na de aanleg van infiltratievoorzieningen. Dit wil niet zeggen dat dan altijd complicaties optreden. Een voorziening kan immers ook prima functioneren zonder of na beperkt

Tervisiedocument Stichting RIONED

onderzoek. Maar soms blijkt in de praktijk dat de voorziening veel te ruim is gedimensioneerd. Dan had het dus goedkoper gekund.

Informatie over dimensionering en ontwerp van drainagesystemen vindt u in Functioneel ontwerp horizontale drainage . Meer informatie over infiltratiesystemen en de berekening daarvan vindt u in Infiltratie van hemelwater en Berekenen infiltratievoorzieningen .

Tervisiedocument Stichting RIONED