

32/uub(6g) 1^e ex

BIBLIOTHEEK
STARINGGEBOUW

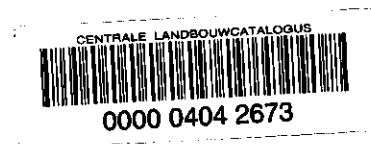
De waterdichtheid van natuurlijke materialen in relatie
met de bovenafdichting van stortterreinen

H.P. Oosterom

Rapport 69

STARING CENTRUM, Wageningen, 1990

16 OKT. 1990



150 = 521 349 *

REFERAAT

Oosterom, H.P. 1990. De waterdichtheid van natuurlijke materialen in relatie met de bovenafdicthting van stortterreinen. Wageningen, Staring Centrum. Rapport 69. 67 blz; 7 fig.; 4 tab.

Dit rapport vermeldt de resultaten van een laboratoriumonderzoek aan enkele natuurlijke materialen, waarvan op basis van kleimineralogische en granulaire samenstelling verwacht werd, dat ze geschikt zouden kunnen zijn als afdichtingsmateriaal bij de waterdichte eindafdekking van afvalstortterreinen: zand-bentoniet mengsels, boorgruis en een aantal Nederlandse kleisoorten. De mate van waterdichtheid is bepaald met de "falling head"-methode. Uit de resultaten bleek duidelijk het niet-Darcy gedrag, een effect dat optreedt bij zeer slecht doorlatende materialen. De metingen zijn verwerkt met het computerprogramma DARCY, geschreven in standaard-FORTRAN77 notatie.

Trefwoorden: afvalstortterreinen, kleimineraal, granulaire samenstelling, verdichting, waterdichte eindafdekking, zand-bentoniet, boorgruis, klei, "falling-head" methode, niet-Darcy gedrag.

ISSN 0924-3070

Copyright 1990.

STARING CENTRUM Instituut voor Onderzoek van het Landelijk Gebied
Postbus 125, 6700 AC Wageningen
Tel.: 08370-19100; telefax: 08370-24812; telex: 75230 VISI-NL

Het Staring Centrum is een voortzetting van: het Instituut voor Cultuurtechniek en Waterhuishouding (ICW), het Instituut voor Onderzoek van Bestrijdingsmiddelen, afd. Milieu (IOB), de Afd. Landschapsbouw van het Rijksinstituut voor Onderzoek in de Bos- en Landschapsbouw "De Dorschkamp" (LB), en de Stichting voor Bodemkartering (STIBOKA).

Het Staring Centrum aanvaardt geen aansprakelijkheid voor eventuele schade voortvloeiend uit het gebruik van de resultaten van dit onderzoek of de toepassing van de adviezen.

Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm en op welke andere wijze ook zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van het Staring Centrum.

Project nr. 155.14

[414RM/08.90]

INHOUD	Blz
VOORWOORD	7
SAMENVATTING	9
1 INLEIDING	13
2 WATERDOORLATENDHEID VOLGENS DARCY	17
2.1 Methoden voor de bepaling van de water- doorlatendheid	19
2.1.1 De "constant head"-methode	19
2.1.2 De "falling head"-methode	19
2.2 Programma beschrijving 'DARCY'	23
3 MATERIAAL ONDERZOEK	25
3.1 Minerale samenstelling	25
3.2 Watergehalte en verdichtingsmogelijkheden	27
3.3 Fysisch-chemische reacties	28
4 LEKKAGE AFDICHTINGSLAAG	31
5 CONCLUSIES	35
LITERATUUR	39
AANHANGSELS	
1 Voorbeeld invoerfile DARCY	41
2 Voorbeeld uitvoerfile DARCY	43
3 Fortran-programma DARCY	45
4 Relatie $v(x)$ en $i(x)$ van onderzochte monsters	53
AFBEELDINGEN/FIGUREN	
1 Wet van Darcy	17
2 Relatie stijghoogtegradiënt en laagdikte	18
3 "Falling-head" methode	20
4 Programma beschrijving 'DARCY'	24
5 Proctorcurven	29
6a Darcy-gedrag	35
6b Niet-Darcy gedrag	35
7 Relatie lekkage en dichtheid	36
TABELLEN	
1 Lekkage van een afdichtende laag onder Nederlandse omstandigheden	14
2 Resultaat van geteste materialen op waterdichtheid	26
3 Relatie lekkage en droge dichtheid zand- bentoniet	28
4a Lekkage bij enkele zand-bentoniet mengsels	32
4b Lekkage bij enkele Nederlandse kleisoorten	33

VOORWOORD

In het begin van de jaren tachtig is bij de afdeling Vast Afval en Bodembescherming van het toenmalig Instituut voor Cultuurtechniek en Waterhuishouding (ICW), een begin gemaakt met het onderzoek naar de bruikbaarheid van natuurlijke materialen, als afdichtende laag in de eindafdekking van stortterreinen, onder leiding van Dr. J. Hoeks.

In de loop der jaren hebben verschillende personen hieraan gewerkt, te weten: Mevr. J.R. Hofkamp, de heren A.H. Ryhiner, G.J. Agelink, H. Glas en G. Jessen. Dit rapport staat niet op zich zelf; het is een voortzetting van het werk van deze mensen en tevens een aanvulling op urgente vragen vanuit het beleid en de praktijk.

SAMENVATTING

Onderzoek naar de waterdichtheid van afdichtingsmaterialen is het meest essentiële, maar ook het meest tijdrovende onderdeel van het vooronderzoek ter beoordeling van de geschiktheid van het aangeboden afdichtingsmateriaal. Er is een breed scala van materialen onderzocht, waaronder een aantal Nederlandse kleisoorten, zand-bentoniet mengsels en boorgruis (bevat bentoniet).

Elke grond kan in principe slecht doorlatend worden gemaakt. Bekend is in dit verband het toevoegen van het kleimineraal montmorilloniet in poedervorm. Dit produkt wordt gewonnen onder de naam bentoniet en heeft van nature een grote zwelcapaciteit. Menging van zand met ca. 5% bentoniet biedt de mogelijkheid goed doorlatend zand vrijwel waterdicht te maken. Ook Nederlandse kleisoorten bevatten het kleimineraal montmorilloniet. Afhankelijk van de ouderdom en zwaarte (% lutum) van de grond, kan het gehalte oplopen tot 3 à 7%. Tijdens de afzetting van het materiaal heeft het kleimineraal volop de tijd om te zwellen. De actuele, nog resterende zwelcapaciteit is daardoor gering. Naarmate het lutumgehalte hoger ligt, neemt in het algemeen de kans om in aanmerking te komen voor toepassing in een afdichtingssysteem toe.

De stroming van water door een poreus medium wordt in het algemeen beschreven met de Wet van Darcy. Deze wet geeft aan dat de doorlatendheid (v) recht evenredig is met de aangelegde potentiaalgradiënt (i) volgens de vergelijking: $v = k * i$ (zie fig. 1). De doorlaatfactor (k) wordt grotendeels bepaald door:

- de granulaire samenstelling;
- de kleimineralogische samenstelling;
- de droge dichtheid (droge massa per volume-eenheid grond);
- het effectieve poriënvolume voor waterstroming (afhankelijk van watergehalte en structuur).

Voor de bepaling van de doorlaatfactor zijn de volgende twee methoden van belang:

- "constant head"-methode (meting bij constante gradiënt);
- "falling head"-methode (meting bij afnemende gradiënt).

De "falling head"-methode verdient verre weg de voorkeur boven de "constant head"-methode, vanwege de grotere nauwkeurigheid. Een ander voordeel van de "falling head"-methode is, dat uit de metingen direct de relatie tussen v en i kan worden afgeleid. Dat is belangrijk, omdat uit eerder onderzoek (Gabener, 1984; Ryhiner en Hoeks, 1986; Jessen, 1988) gebleken is dat bij zeer slecht doorlatende materialen sprake is van een niet-lineaire relatie tussen gradiënt en doorstroomsnelheid.

Dit effect wordt ook wel het niet-Darcy gedrag genoemd (fig. 6). Uit dit onderzoek blijkt dat de doorlatendheden van de geteste materialen, zich goed laten beschrijven door de exponentiële functie $Y = a * X ** b$, gezien de hoge correlatiecoëfficiënten (zie aanhangsel 4). Voor de berekening van de relatie uit de metingen van de "falling head"-methode is het FORTRAN-programma DARCY geschreven (fig. 4, aanhangsel 3, 1 en 2). Vervolgens kan nu voor elke praktijksituatie de lekkage worden berekend. Voor een goed functionerende drainage ligt de gradiënt in de orde van 1 tot 5 en bij volledig verstopte drains zou de gradiënt op kunnen lopen tot 10.

Maatgevend voor de lekkage van de bovenafdichting is de waarde, die berekend wordt voor $i = 5$ (tabel 2).

De volgende factoren zijn grotendeels bepalend voor de optredende lekkage:

- het lutum- of leemgehalte van natuurlijke klei- en leemgronden;
- het bentonietgehalte van zand-bentoniet mengsels;
- het droogvolumegegewicht; het watergehalte is tijdens de uitvoering bepalend voor de maximaal haalbare verdichting;
- de chemische samenstelling van de vloeistof, waarmee het materiaal getest is.

Klei met meer dan 30% lutum (deeltjes $< 2 \mu\text{m}$) biedt een redelijk perspectief. De bezetting van het kleicomplex is echter ook van belang. Naarmate het aandeel meerwaardige ionen (Fe, Ca en mogelijk ook Al-ionen) toeneemt, neemt de doorlatendheid toe. De verdichting die men in de praktijk kan realiseren ligt meestal van te voren al vast. Deze vloeit voort uit de volumedichtheid en het watergehalte in natuurlijke ligging. De praktijk heeft uitgewezen dat een verdichting uitgevoerd bij een iets hoger watergehalte (w) dan het optimaal watergehalte ($w\text{-opt}$), bepaald volgens de Proctorprocedure, tot structuurbederf leidt en daardoor tot een lagere doorlatendheid.

Percolatiewater afkomstig uit een vuilstort, dringt moeilijker door een kleilaag heen dan schoon water. De lekkage is dan veelal nihil. Enerzijds zou men verwachten dat door de hoge zoutconcentraties de zwelling afneemt en de doorlatendheid toeneemt, anderzijds zal door de aanwezigheid van organische bestanddelen verstopping van de poriën optreden. Het verdient aanbeveling de doorlatendheidsmetingen uit te voeren met een testvloeistof, die de samenstelling van het infiltrerende water in de afdichtingslaag zal benaderen.

Zand in de juiste verhouding en intensief vermengd met bentoniet onder toevoeging van de juiste hoeveelheid water en vervolgens maximaal verdicht, is voldoende waterdicht te krijgen. Naarmate het zand meer oplosbare bestanddelen bevat (bijv. kalk), zal dat op den duur de doorlatendheid negatief beïnvloeden. Schoon zand kan door menging met 5% bentoniet geschikt gemaakt worden voor een afdichtings-

laag. Hogere bentonietpercentages (10% en meer) hebben weinig effect. Boorgruis, bestaande uit 12,5% bentoniet, blijkt minder geschikt te zijn, vanwege het oorspronkelijk vrij hoge vochtgehalte. De maximaal haalbare verdichting blijkt te gering waardoor de lekkage ontoelaatbare waarden aan zal nemen. Ook voor zandbentoniet mengsels geldt een w-opt, waarbij de grootste dichtheid gehaald wordt. De dichtheid is van doorslaggevende betekenis (tabel 3). Op het laboratorium kan men een zodanige dichtheid halen, dat een lekkage van 10 mm/jaar ($i = 5$) niet wordt overschreden. Mogelijk kan de verdichting nog vergroot worden door slecht gegradeerd zand te nemen, bestaande uit fijne en grove fracties. Een goede verdichtingstechniek in samenhang met het te verdichten materiaal zal in de praktijk leiden tot een minimaal poriënvolume, hetgeen een onverantwoorde lekkage kan tegengaan.

In de praktijk kan de lekkage nog verder worden teruggedrongen door intensivering van het drainagestelsel en/of door de toepassing van een grotere dikte van de afdichtingslaag. Het gevolg is een algehele verlaging van de gradiënt. De gevolgen voor de lekkage zijn getalmatig weergegeven in tabel 4.

1 INLEIDING

Op oudere stortplaatsen, die niet voorzien zijn van een basisafdichting, kan de emissie van stoffen met het percolatiewater en de kans op grondwaterverontreiniging alleen achteraf nog worden beperkt door de aanleg van een waterdichte bovenafdichting.

Recent aangelegde stortplaatsen zijn meestal voorzien van een basisafdichting, bestaande uit synthetisch materiaal. Op grond van de stelling dat de basisafdichting op de lange termijn nooit 100% waterdicht zal blijven, moet uiteindelijk de waterdichte isolatie, zoals vereist volgens de IBC-criteria, worden gerealiseerd met een bovenafdichting. Ook in deze situatie zal de lekkage door de bovenafdichting praktisch nul moeten zijn. Hoewel met natuurlijke materialen absolute waterdichtheid vrijwel nooit haalbaar is, zijn deze materialen op de lange duur echter zeer bestendig.

De grootte van de toegestane lekkage is enerzijds afhankelijk van de stand der techniek, anderzijds wordt deze bepaald door de kwetsbaarheid van het omringende milieu.

Het onderzoek naar de waterdichtheid is het meest essentiële, maar ook het meest tijdrovende onderdeel van het vooronderzoek voor de beoordeling van de geschiktheid van het aangeboden afdichtingsmateriaal. In dit rapport worden resultaten vermeld van een laboratoriumonderzoek naar enkele natuurlijke materialen, waarvan op basis van granulair en kleimineralogische samenstelling, de verdichtingsmogelijkheden en de plasticiteit de verwachting was gewekt, dat ze mogelijk geschikt zouden zijn als afdichtingsmaterialen (Ryhiner en Hoeks, 1986).

Grondsoorten, die in de landbouw bekend staan vanwege hun slechte doorlatendheid, zijn meestal niet geschikt voor afdichting van stortplaatsen, omdat ze niet voldoende waterdicht zijn. Om dit te illustreren is in tabel 1 de lekkage door een afdichtingslaag berekend bij een laagdikte 0,25 m in relatie met de doorlaatfactor, de verwachte potentiaal- of stijghoogtegradiënt en de tijdsduur van de afvoerperiode. Voor de berekening van de gradiënt is aangenomen dat de drukhoogte onder de afdichtingslaag -0,50 m bedraagt, terwijl in extreme situaties (drainage werkt niet) de drukhoogte boven de afdichtingslaag op kan lopen tot 0,75 m. Dit levert een gradiënt op van 6. Als het drainagesysteem boven de afdichtingslaag wel goed functioneert, zal de maximaal optredende gradiënt niet groter worden dan ca. 4, omdat de grondwaterstand boven de afdichtingslaag in het algemeen niet hoger zal komen dan 0,25 m. Voor het lekkage-criterium kan een gemiddeld hoogste gradiënt $i = 5$ worden aangehouden. Om de infiltratie van regenwater te beperken tot minder dan 20 mm/jaar moet de k-factor kleiner zijn dan 0,02 mm/dag (d.i. $< 2,3 \cdot 10^{-10}$ m/s).

Tabel 1 De jaarlijkse lekkage (mm/jaar) door een bovenafdichting (laagdikte 0,25 m) als functie van de doorlaatfactor, stijghoogte-gradiënt en de duur van de afvoerperiode onder Nederlandse klimaatsomstandigheden (Hoeks en Agelink, 1982).

Doorlaatfactor		Stijghoogte- gradiënt (-)	Afvoer- periode (dagen/jaar)	Jaarlijkse lekkage (mm/jaar)
(mm/dag)	(m/s)			
2,0	$2,3 * 10^{-8}$	1,0-1,5	150	300 - 450
1,0	$1,2 * 10^{-8}$	1,5	180	270
0,5	$5,8 * 10^{-9}$	2,0	200	200
0,2	$2,3 * 10^{-9}$	3,0	200	120
0,1	$1,2 * 10^{-9}$	4,0	200	80
0,05	$5,8 * 10^{-10}$	5,0	200	50
0,02	$2,3 * 10^{-10}$	5,0	200	20
0,01	$1,2 * 10^{-10}$	5,0	200	10
0,005	$5,8 * 10^{-11}$	5,0	200	5

In principe kan elke grond slecht doorlatend gemaakt worden door toevoeging van kleipoeder. Bekend is in dit verband het toevoegen van montmorilloniet in poedervorm. Dit produkt staat bekend onder de naam "bentoniet" naar de vindplaats Fort Benton in de staat Wyoming (USA). Door menging van zand en bentoniet worden de poriën tussen de zandkorrels ten dele opgevuld met bentoniet, dat na zwelling het water in deze poriën vasthoudt. Op deze wijze is het mogelijk goed doorlatend zand zodanig waterdicht te maken dat het geschikt is voor de toepassing als afdichtingsmateriaal bij de eindafdekking van afvalstort-terreinen.

De lekkage van deze afdeklaag moet praktisch nihil zijn. Deze eis vloeit voort uit het bodembeschermingsbeleid. Synthetische materialen zijn op de korte termijn zeker waterdicht, maar op de lange termijn is deze garantie niet te geven. Met als inzet de toepassing van het bodembeschermingsbeleid en de mogelijkheden, die natuurlijke materialen met de huidige stand van zaken bieden als afdichtingsmateriaal, kan gesteld worden dat zoveel mogelijk gestreefd moet worden naar absolute waterdichtheid. Maar aangezien absoluut in de praktijk nooit "absoluut" is, zullen in de toekomst de beleidsmakers aan moeten geven voor hoe groot de lekkage mag zijn, voortvloeiend uit enerzijds een brongericht beleid en anderzijds een effectgericht beleid. In het laatste geval wordt gesteld dat de emissie van stoffen geen ontoelaatbare belasting van het milieu tot gevolg mag hebben.

De onderzochte materialen zijn op basis van herkomst en samenstelling ingedeeld in drie categorieën:

- materiaal bestaande uit bodemmineralen, gemengd met kleipoeder;
- materialen die in natuurlijke ligging gewonnen worden en als zodanig verwerkt worden;
- materialen die als afvalprodukt beschikbaar komen voor hergebruik en waaraan al of niet kleipoeder is toegevoegd.

Aangezien zeer lage doorlatendheden kunnen worden verwacht, is voor de bepaling van de k-factor gebruik gemaakt van de "falling head"-methode. Tevens wordt dan inzicht verkregen in hoeverre de k-factor afhankelijk is van de grootte van de gradiënt. Voordat serieus met de aflezingen is gestart, heeft een verzadigingsprocedure plaatsgevonden. Een monster is verzadigd wanneer men bij het uiteinde een afvoer kan konstateren. Indien de chemische samenstelling van het doorgeleide water sterk afwijkt van de samenstelling van het aanwezige vocht in het monster, is het na verzadiging noodzakelijk het monster door enige malen te spoelen, totdat al het oorspronkelijke vocht in het monster is vervangen. In het meest gunstige geval duurt de initialisering bij de huidige proefopstelling 2 à 3 weken.

Bij praktisch alle monsters zijn de metingen begonnen bij een gradiënt > 60 en in de meeste gevallen beëindigd bij een gradiënt < 10 .

Afhankelijk van de grootte van de doorlatendheid van het materiaal wordt het traject sneller of minder snel doorlopen. Is er sprake van ondeugdelijk materiaal, dan wordt het traject reeds in 1 dag afgelegd.

Materialen, die in aanmerking komen voor bovenafdichting, hebben bij de huidige proefopstelling op z'n minst al 2 weken nodig om dit traject af te kunnen leggen. De proef is uitgevoerd in een donkere ruimte bij kamertemperatuur.

Bij uitvoering van de doorlatendheidsmetingen ligt het voor de hand het monster te doorstromen met een vloeistof, die qua chemische samenstelling enigszins overeenkomt met de infiltrerende vloeistof:

- leidingwater heeft de voorkeur, voor zover het een bovenafdichting betreft;
- percolatiewater uit het stort kan aan de teen van een helling in kontakt komen met de afdichting.

Aanvankelijk is uitgegaan van een standaardvloeistof (gedemineraliseerd water). De vertaling van deze resultaten naar een praktijk situatie is moeilijk, zodat overgestapt is op een doorstroomvloeistof, die meer de werkelijkheid benadert.

De bewerking van de metingen, voor berekening van de doorlaatfactor, gradiënt en lekkage, is overgelaten aan het FORTRAN-programma 'DARCY'. Met behulp van SIMPLOT, een tekenprogramma, zijn de gegevens grafisch verwerkt.

2 WATERDOORLATENDHEID VOLGENS DARCY

De lekkage van water door een afdichtingslaag is afhankelijk van de fysische eigenschappen van het afdichtingsmateriaal en de aangelegde potentiaalgradiënt. Deze laatste wordt bepaald door de dikte van de laag en het verschil in stijghoogte van het water boven en onder de laag. De stroming van water door een poreus medium wordt in het algemeen beschreven met de Wet van Darcy. Deze wet geeft aan dat de doorlatendheid recht evenredig is met de aangelegde potentiaalgradiënt volgens de vergelijking (zie ook fig. 1):

$$v = k \cdot i$$

waarin: v = doorlatendheid of filtersnelheid (m/s)

k = doorlaatfactor (m/s)

i = potentiaalgradiënt (m/m)

De filtersnelheid (v) komt overeen met het debiet (m^3/s), dat is het per tijdseenheid verplaatste volume water, per eenheid van oppervlakte (m^2).

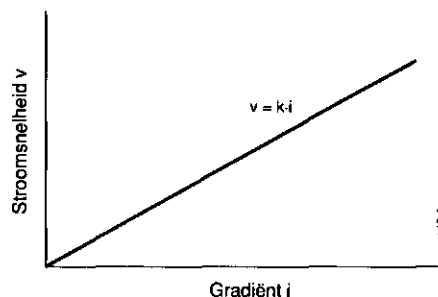


Fig. 1 De relatie tussen v en i volgens de wet van Darcy.

De doorlaatfactor (k) is kleiner naarmate de grond meer weerstand biedt tegen de stroming van water. Deze weerstand wordt grotendeels bepaald door de fysische eigenschappen van het bodemmateriaal, zoals:

- de granulaire samenstelling;
- de kleimineralogische samenstelling;
- de drogedichtheid (drooggewicht per volume-eenheid grond);
- het effectieve poriënvolume voor waterstroming (afhankelijk van watergehalte en structuur).

Een ander aspect bij de doorlatendheidsmetingen betreft de aan te leggen stijghoogtegradiënt, omdat de filtersnelheid

zeer waarschijnlijk geen lineaire relatie vertoont met de stijghoogtegradiënt. In feite zou de doorlatendheid gemeenten moeten worden bij de in het veld voorkomende gradiënten, die bij goed functionerende drainage in de orde van 1 tot 5 liggen en bij volledig verstopte drains kunnen deze oplopen tot 10. Voor de stroming van water in grond wordt de potentiaal meestal opgegeven als stijghoogte (m of cm waterkolom). De stijghoogte (h) is opgebouwd uit twee componenten, namelijk de drukhoogte (h_d) en de plaatshoogte (h_p). Voor de plaatshoogte wordt een referentieniveau aangehouden, in dit geval (zie fig. 2) bijvoorbeeld de onderkant van het monster. De stijghoogte aan de bovenzijde van het monster is dus gelijk aan de drukhoogte h_d (hoogte waterkolom) plus de plaatshoogte ten opzichte van het referentieniveau ($h_p = dz$). De stijghoogte aan de onderzijde van de kolom is gelijk aan de drukhoogte afhankelijk van de vochtspanning in de onderliggende laag, de drukhoogte in de onderliggende laag gelijk is hier aan 0 wegens vrije uitstroming aan de lucht). De plaatshoogte wordt dan per definitie gelijkgesteld aan 0 (referentievlak).

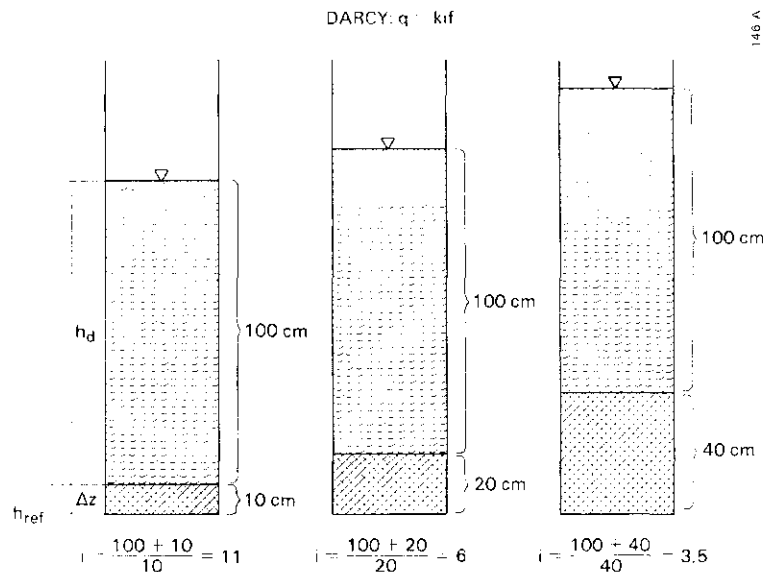


Fig. 2 Effect van de dikte van de afdichtingslaag op de stijghoogtegradiënt (zie tekst voor betekenis symbolen).

De stijghoogtegradiënt i bedraagt dan (zie ook fig. 2):

$$i = \frac{h_d + dz}{dz} \quad \text{of} \quad \frac{h_d}{dz} + 1$$

De gradiënt neemt dus af met toenemende dikte (dz) van de afdichtingslaag en afnemende hoogte van de waterkolom. Echter, al zou $h_d = 0$ zijn, dan blijft de gradiënt $i = 1$, zodat nog steeds lekkage optreedt. Vanwege de geringe doorlatendheid van natuurlijke afdichtingsmaterialen wordt

de doorlatendheid vaak bij hoge gradiënten ($i = 25$ à 75) bepaald.

Met betrekking tot de aangelegde gradiënt zijn de volgende twee methoden voor doorlatendheidsmeting van belang:

- "constant head"-methode (meting bij constante gradiënt);
- "falling head"-methode (meting bij afnemende gradiënt).

Beide methoden worden in de volgende paragrafen behandeld.

2.1 Methoden voor de bepaling van de waterdoorlatendheid

2.1.1 De "constant head"-methode

Bij de "constant head"-methode wordt de stijghoogtegradiënt tijdens de meting constant gehouden door een constant waterniveau boven het monster te handhaven. Dit wordt gerealiseerd door een continue water toevoer waarbij het overtollige water via een overloop kan weglopen. Gezien de in het veld optredende gradiënten moet de doorlatendheid worden gemeten bij een gradiënt $i \leq 10$. Wil men met deze methode de doorlatendheid bij verschillende gradiënten meten, dan kan, na beëindiging van een meting bij een bepaalde gradiënt, voor een volgende meting een andere gradiënt worden aangelegd door het waterniveau aan te passen.

Na verzadiging van het monster wordt het door het monster stromende water aan de uitstroomzijde opgevangen en wordt het volume door weging vastgesteld. Vanwege de zeer geringe doorlatendheid moet verdamping van water aan de uitstroomzijde uitgesloten worden, omdat anders een te lage doorlatendheid wordt berekend. Verdampingsverliezen kunnen worden voorkomen door het opvangkolfje (niet luchtdicht!) af te dekken (bijvoorbeeld met een wattenprop). Hoewel het voorkomen van verdamping niet onmogelijk is, is dit toch vaak lastig te realiseren. Om deze reden wordt de "constant head"-methode minder geschikt geacht voor bepaling van de waterdichtheid van afdichtingsmaterialen, tenzij door vergroting van het monsteroppervlak het uitgestroomde volume zo groot is dat verdampingsverliezen een ondergeschikte rol spelen (zie meetopstelling, zoals beschreven door Hoeks et al. 1987).

2.1.2 De "falling head"-methode

Er is reeds aangegeven dat bij de "constant head"-methode de meting van het uitstromend watervolume bij lage doorlatendheden niet erg nauwkeurig is, vooral omdat verdampingsverliezen niet altijd te vermijden zijn. Bij de "falling head"-methode wordt het instromend volume gemeten en bij de gegeven opstelling (zie fig. 3) kan dit veel nauwkeuriger plaatsvinden, terwijl verdampingsverliezen beter uit te sluiten zijn (overigens leiden verdampings-

verliezen bij deze methode tot een overschatting van de doorlatendheid). Het probleem van verdamping speelt hier nauwelijks een rol omdat het stijgbuisje waarin het waterniveau zich bevindt een zeer kleine diameter heeft. Door het monsteroppervlak relatief groot te kiezen t.o.v. de doorsnede van het stijgbuisje, treedt ook bij zeer lage doorlatendheden nog een duidelijk meetbare daling van het waterniveau in de stijgbuis op. Bovendien kan het buisje nog worden afgesloten met een wattenprop om verdamping tegen te gaan. De "falling head"-methode verdient vanwege een grotere nauwkeurigheid de voorkeur boven de "constant head"-methode.

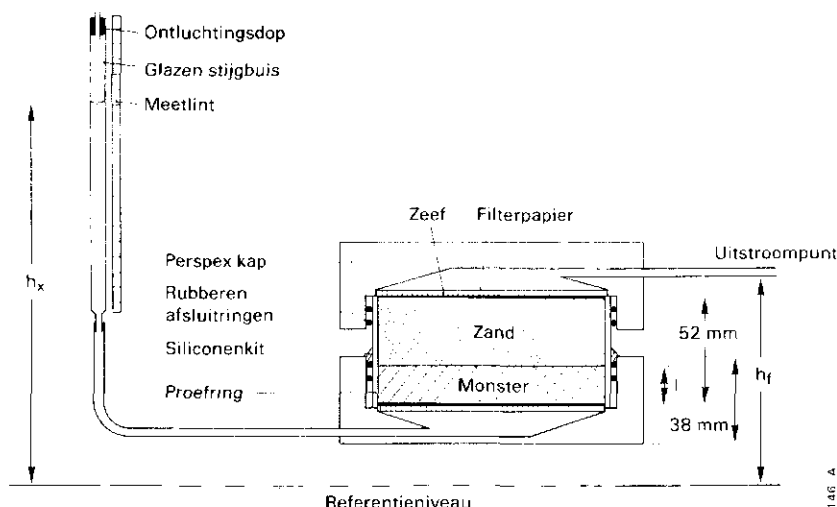


Fig. 3 Meetopstelling voor de "falling head"-methode.

Bij de "falling head"-methode neemt de stijghoogtegradiënt voortdurend af tijdens de meting. Er vindt geen toevoer van water plaats, waardoor het waterniveau boven het monster tijdens de meting geleidelijk zakt omdat water wordt afgevoerd via het grondmonster. Bij deze methode wordt de doorlatendheid vastgesteld door de daling van het waterniveau in de stijgbuis, en daarmee de instroming van water in het monster, te meten als functie van de tijd. Bij aanvang van de meting dient de gradiënt minimaal 20 of hoger te zijn. De metingen worden voortgezet tot een gradiënt van 5 of lager is bereikt. Eventueel kan de proef herhaald worden door de gradiënt opnieuw te verhogen tot minimaal 20 en vervolgens weer te laten afnemen tot beneden 5. De verwachting is dat de gevonden doorlatendheid bij deze tweede serie metingen in de meeste gevallen lager is dan bij de eerste serie. Het voordeel van de "falling head"-methode is dat uit de metingen direct de relatie tussen v en i kan worden vastgesteld, zodat ook in geval van een niet lineaire relatie direct bij elke willekeurige

gradiënt de daarbij behorende lekkage kan worden berekend.

Het te onderzoeken afdichtingsmateriaal wordt in een ring gebracht en verdicht bij het optimaal watergehalte (aangenomen dat dit ook in de praktijk realiseerbaar is) tot de maximale Proctordichtheid is bereikt. De dikte van het monster in de ring moet nauwkeurig worden vastgesteld (in mm's nauwkeurig) en moet tenminste 2,5 cm bedragen. De ring moet bij voorkeur geheel gevuld zijn met monster. Wanneer dit niet het geval is moet de ring verder worden opgevuld met vochtig goed doorlatend zand. Het ringmonster wordt ingeklemd tussen twee perpexkappen. De kappen worden met een beugel op elkaar geklemd om volumetoename door swelling van het monster te voorkomen. Tussen de kappen en de ring bevinden zich vier rubberringen om lekkage langs de buitenkant van de ring te voorkomen. Voor alle zekerheid wordt de ruimte tussen de ring en de onderste perspex kap nog afgekit met siliconenkit. In de twee (identieke) kappen bevinden zich een zeefje en een opening. Op de onderste kap is de stijgbuis aangesloten en deze dient dus als instroomopening. Het monster wordt van onder naar boven doorstroomd om daarmee zoveel mogelijk de insluiting van lucht te beperken. De opening aan de bovenste kap fungeert als afvoer. Hier wordt het uitstromende water opgevangen. Op het niveau waar vrije uitstroming aan de lucht plaatsvindt is de drukhoogte gelijk aan 0 en daarom wordt dit niveau meestal ook gekozen als referentieniveau voor de plaatshoogte, zodat de stijghoogte $h(f)$ aan de uitstroomzijde 0 is. De stijghoogte aan de instroomstroomzijde $h(x)$ wordt bepaald door het water-niveau in de stijgbuis af te lezen. De stijghoogte is gelijk aan de afgelezen waarde van het waterniveau t.o.v. het referentieniveau. Verdamping uit de stijgbuis moet zoveel mogelijk worden voorkomen. De diameter van de stijgbuis bij de "falling head"-methode wordt zo klein mogelijk gehouden om ook bij een geringe doorlatendheid een duidelijke daling van het waterniveau in de stijgbuis te kunnen waarnemen.

De stijghoogte wordt regelmatig afgelezen, zodat aan de hand van de opeenvolgende aflezingen een voldoende aantal representatieve metingen beschikbaar komen, waaruit een betrouwbare relatie van v en i kan worden berekend. Het tijdsinterval zal langer worden, naarmate het waterniveau minder snel daalt.

Gabener (1983) heeft het stromingsgedrag voor de "falling head"-methode met formules beschreven. Voor berekening van de doorlaatfactor k heeft hij de volgende formule ontworpen:

$$k = \left(\frac{a \cdot d}{A \cdot dt} \right) \ln \left(\frac{h(1)}{h(2)} \right) \quad (3)$$

waarin: a = oppervlakte van het stijgbuisje (m^2)
 $h(1)$ = stijghoogte op tijdstip $t(1)$ (m)
 $h(2)$ = stijghoogte op tijdstip $t(2)$ (m)

dt = duur van het tijdsinterval $t(2)$ en $t(1)$
 (sec)
 d = dikte van het monster (m)
 A = oppervlakte van het monster (m^2)

Aangezien de gradiënt tijdens het tijdsinterval dt niet constant is moet de gemiddelde gradiënt worden berekend om de bijbehorende filtersnelheid te kunnen berekenen. Deze gemiddelde gradiënt $i(x)$ is te berekenen uit het harmonisch gemiddelde van $i(1)$ en $i(2)$:

$$i(1) = \frac{h(1)}{d} \text{ en } i(2) = \frac{h(2)}{d} \quad (4)$$

$$i(x) = \frac{2 * i(1) * i(2)}{i(1) + i(2)} \quad (5)$$

met de bijbehorende filtersnelheid $v(x)$:

$$v(x) = \left(\frac{2 * a}{A * dt} \right) \left(\frac{h(1) * h(2)}{h(1) + h(2)} \right) \ln \left(\frac{h(1)}{h(2)} \right) \quad (6)$$

Met de formules (3), (4), (5) en (6) worden voor elk tijdsinterval de waarden $v(x)$ en $i(x)$ berekend. In een grafiek kunnen deze tegen elkaar worden uitgezet, waardoor de relatie tussen v en i zichtbaar wordt. Ook is het mogelijk om met behulp van regressieberekeningen na te gaan met welke lineaire of niet-lineaire vergelijking deze relatie het best kan worden beschreven. Bij de berekening van de doorlatendheden van geteste materialen blijkt dat de exponentiële functie deze relatie het beste weergeeft, gezien de hoge correlatiecoëfficiënten. De algemene weergave van deze exponentiële functie luidt:

$$Y = a * X ** b \quad (7)$$

In deze vergelijking worden de waarden voor a en b als volgt berekend:

$$b = \frac{\sum (\ln X_i) (\ln Y_i) - \frac{(\sum \ln X_i) (\sum \ln Y_i)}{N}}{\sum (\ln X_i) ** 2 - \frac{(\sum \ln X_i) ** 2}{N}} \quad (8)$$

$$a = \exp \frac{\sum \ln Y_i}{N} - b \frac{\sum \ln X_i}{N} \quad (9)$$

De correlatiecoëfficiënt $R**2$ wordt als volgt berekend:

$$R^{**2} = \frac{b^{**2} \sum (\ln X_i)^{**2} - \frac{(\sum \ln X_i)^{**2}}{N}}{\sum (\ln Y_i)^{**2} - \frac{(\sum \ln Y_i)^{**2}}{N}} \quad (10)$$

De bespreking van het programma DARCY, waarmee de berekeningen worden uitgevoerd, komt in de volgende paragraaf aan de orde.

2.2 Programma beschrijving 'DARCY'

- Toelichting

In aanhangsel 1 worden twee voorbeelden gegeven van de opzet van een invoerfile t.b.v. het programma DARCY. De resultaten na RUN DARCY worden weggeschreven naar een uitvoerfile. Een voorbeeld hiervan is weergegeven in aanhangsel 2.

In aanhangsel 3 staat het programma DARCY genoteerd in standaard FORTRAN77, voorzien van commentaar voor zover noodzakelijk terwille van de duidelijkheid.

Vanuit het programma DARCY worden 2 subroutines aangeroepen:

- SUBROUTINE SECONDEN berekent het aantal seconden tussen twee waarnemingen, noodzakelijk voor de berekening van de harmonieuze gradiënt $I(X)$, doorlaatsnelheid $V(X)$ en k -factor $KDARCY(X)$ over het interval. Deze subroutine maakt gebruik van de LOGICAL FUNCTION SCHRIK, waarin controle en correcties plaatsvinden voor het aantal dagen in de maand februari, wanneer het een schrikkeljaar betreft.
- SUBROUTINE DRUKAF, waarin de resultaten van de berekeningen naar een uitvoerfile worden weggeschreven. De subroutine maakt gebruik van de SUBROUTINE EXPKROMME voor de regressie berekeningen tussen $I(X)$ en $V(X)$. Vervolgens is met behulp van de regressielijn voor enkele gradiënten de lekkage berekend bij een afvoerperiode van 200 dagen per jaar.

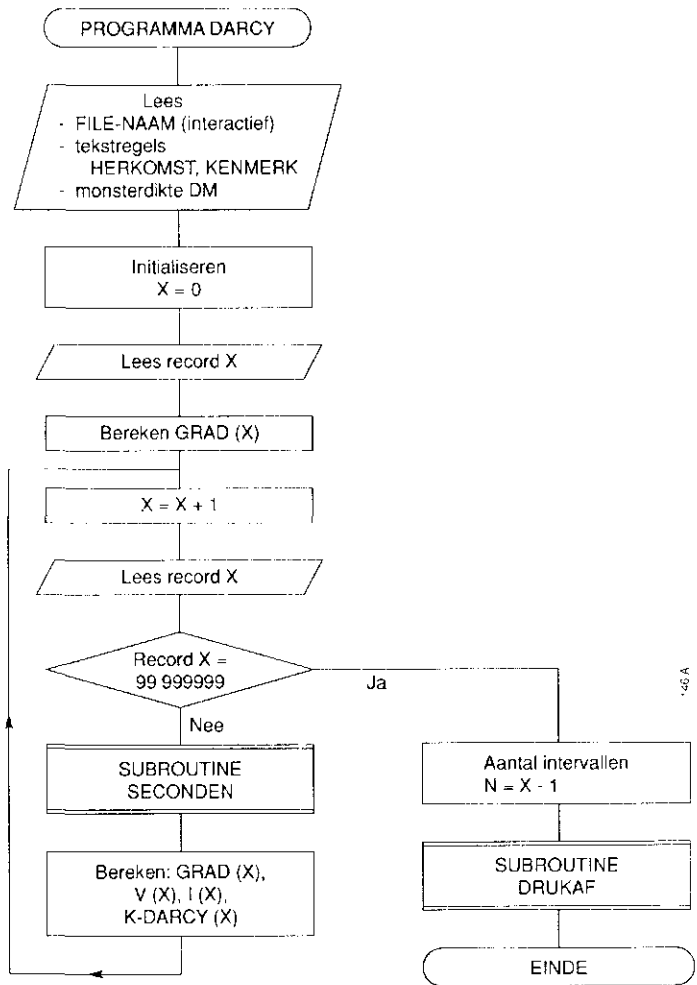


Fig. 4 Programmastructuurschema (PSS)

3 MATERIAAL ONDERZOEK

In aanhangsel 4 staan de resultaten van de berekeningen van de onderzochte zand-bentoniet-, boorgruis- en kleimonsters weergegeven. Tabel 2 geeft een samenvatting en een overzicht van factoren, die bepalend zijn voor de waterdichtheid. In het algemeen gelden hiervoor:

- het lutum- of leemgehalte bij natuurlijke klei- en leemgronden;
- het bentonietgehalte bij zand-bentoniet mengsel;
- het droogvolumegegewicht (het watergehalte van het materiaal tijdens uitvoering is bepalend voor de maximaal haalbare verdichting;
- de samenstelling van de doorstroomvloeistof.

Al deze aspecten worden nader toegelicht in de volgende paragrafen.

Bij de behandeling wordt steeds naar het monsternummer verwezen in tabel 2.

3.1 Minerale samenstelling

Wanneer in de praktijk over kleipoeder gesproken wordt betreft het veelal bentoniet, dat voor 60 à 70% uit het kleimineraal montmorilloniet bestaat. Het komt slechts voor op specifieke plaatsen in de wereld, vanwaar het wordt verscheept zonder enige voorbewerking te ondergaan. De bewerkingen vinden plaats in het land van bestemming. Het kleimineraal montmorilloniet staat bekend om het sterke zwelvermogen, waardoor bij een goede toepassing in een afdichtingslaag, het poriënwater nagenoeg in zijn geheel gebonden wordt. Zand in de juiste verhouding en intensief vermengd met bentoniet onder toevoeging van water en vervolgens maximaal verdicht, is voldoende waterdicht voor de toepassing in de constructie van de bovenafdichting als afdichtingslaag. Uit eerder onderzoek van Hoeks (1987) is reeds gebleken, dat schoon zand, gemengd met 5% bentoniet al voldoende waterdicht is. Toename van het bentonietgehalte verhoogt de waterdichtheid, weliswaar met een afnemende efficiëntie. Percentages hoger dan 10 hebben een te verwaarlozen effect (monsters 1 t/m 9). Ook Nederlandse kleiën bevatten het kleimineraal montmorilloniet (Jessen, 1988). Afhankelijk van de geologische ouderdom en de zwaarte (% lutum) van de grond, kan het gehalte oplopen tot 3 à 7 gew.%. Het actuele zwelvermogen is echter gering, omdat het montmorilloniet reeds in gezwollen toestand in het materiaal aanwezig is. Uitmijven van water bij volledig verzadigde kleigronden is moeilijk te realiseren. Naarmate de grond zwaarder is

Tabel 2 Kenmerken van geteste materialen en het resultaat op de waterdichtheid bij een gradiënt van $i = 5$. In het aanhangsel staan de figuren met de regressievergelijking voor de berekening van de lekkage.

Mon-ster	Code*	Aan-hangsel	Gehalte (gew.%)		Volume-gewicht droog (kg/dm ³)	Testvloei-stof	Lekkage bij $i=5$ (mm/jaar)
			lutum	water			
1	B06/2.1	4-1	6,0	8,0	1,81	leidingwater	4
2	B06/3.1	4-1	6,0	8,0	1,84	leidingwater	11
3	B06/1.1	4-2	6,0	8,0	1,82	leidingwater	8
4**	B06/1.4	4-2	6,0	8,0	1,82	leidingwater	17
5	B06/5.3	4-3	6,0	8,0	1,41	leidingwater	46
6	B10/2.1	4-4	10,0	0,0	1,65	demi-water	18
7	B15/1.1	4-4	15,0	0,0	1,67	demi-water	18
8	B10/2.2	4-5	10,0	0,0	1,65	VAM-percolaat	19
9	B15/1.3	4-5	15,0	0,0	1,67	VAM-percolaat	24
10	B12/4.2	4-6	12,0	36,0	1,31	leidingwater	63
11**	B12/5.2	4-6	12,0	47,0	1,15	leidingwater	134
12**	B12/5.3	4-7	12,0	47,0	1,15	leidingwater	148
13	O17/5.1	4-8	33,8	42,0	1,36	demi-water	> 350
14	O17/5.3	4-8	33,8	42,0	1,36	VAM-percolaat	> 350
15	W22/4.1	4-9	37,4	17,0	1,69	demi-water	148
16	W22/4.3	4-9	37,4	17,0	1,69	VAM-percolaat	71
17	N11/2.1	4-10	27,8	29,0	1,52	demi-water	32
18	N11/2.3	4-10	27,8	29,0	1,52	VAM-percolaat	18
19	W21/1.2	4-11	31,5	16,0	1,59	demi-water	20
20	W21/1.6	4-11	31,5	16,0	1,59	VAM-percolaat	6
21	TK/4.2	4-12	51,5	17,0	1,89	demi-water	13
22	TK/4.3	4-12	51,5	17,0	1,89	VAM-percolaat	2
23	RK/3.1	4-13	37,8	30,0	1,48	demi-water	11
24	N29/3.3	4-14	37,2	36,0	1,45	demi-water	7
25	N29/3.5	4-14	37,2	36,0	1,45	VAM-percolaat	1

*) De code bestaat uit kenmerkmonster/nummer.herhaling

- Monsters, die bentoniet bevatten, hebben als kenmerk: letter B gevolgd door het bentonietgehalte (%)

- Kenmerk kleimonsters:

O17 = beekklei; W22 = zware zeeklei; N11 = lichte zeeklei; W21 = lichte zeeklei; TK = Tegelse klei; RK = Reuver klei; N29 = zware zeeklei

**) Opmerkingen:

- Monster 4: Monster 3 na een simulatieperiode van ca. 100 jaar

- Monster 11: Zoutuitspoeling geconstateerd

- Monster 12: Monster 11 na een simulatie van 25 jaar

(d.w.z. hoger lutumgehalte), worden de eigenschappen voor toepassing in een afdichtingssysteem gunstiger (monsters 13 t/m 25). Kleien, die na de afzetting gedurende lange tijd onder grote druk hebben gestaan, bijvoorbeeld onder invloed van bovenliggende formaties, hebben door de tijd heen een deel van hun vocht verloren door uitpersing. Het droog volumegewicht is daardoor zodanig toegenomen, dat dergelijk materiaal in natuurlijke ligging gekenmerkt wordt door waterdichte eigenschappen. Door afgraven en opnieuw verdichten zal het droog volumegewicht ongunstig beïnvloed worden. Verandering van het watergehalte tijdens de periode van afgraven en verwerken moet worden voorkomen. Toename van het watergehalte moet voorkomen worden, omdat het steeds moeilijker zal worden de gewenste dichtheid te halen (monsters 21 t/m 25). Afname van het watergehalte moet eveneens worden voorkomen, omdat het in

elkaar schuiven van de deeltjes meer energie gaat kosten, om de gewenste dichtheid te halen (monsters 6 t/m 9). Bij het boren naar olie en aardgas komen produkten vrij, waarvan de samenstelling waterdichte eigenschappen doet vermoeden. Het gaat daarbij voornamelijk om boorgruis vermengd met boorspoeling. Boorgruis bevat bestanddelen die afkomstig kunnen zijn van grote diepte tot ca. 3 000 m, met als hoofdbestanddelen klei, zand en in mindere mate krijt. De spoeling wordt gebruikt om het boorgruis omhoog en uit het boorgat te brengen en bestaat voor 7 à 10% uit toevoegingen van o.a. bentoniet, kaliumchloride en bariet. Het mengsel dat als afval vrij komt, bestaat uit gelijke volume delen boorgruis en spoeling. Het drogestofgehalte is 40 à 50 procent, waarvan weer 12,5 procent bentoniet is. Het chloridegehalte is minder dan 5000 mg Cl/kg ds. De bentoniet heeft tijdens het proces kunnen zwellen bij een overmaat aan water. Met behulp van een zeefbandpers is het mogelijk het watergehalte van 45 gew.% terug te brengen tot 35 gew.%. De waterdichtheid van het materiaal laat echter toch te wensen over. Dit wordt enerzijds veroorzaakt door de geringe dichtheid en anderzijds door de aanwezigheid van zouten (chloride, bariet, enz). Naarmate de concentratie aan opgeloste zouten hoger ligt, neemt de dikte van de waterlaag rondom het kleimineraal af, met het gevolg dat de waterdoorlatendheid toeneemt (monsters 10 t/m 12).

3.2 Watergehalte en verdichtingsmogelijkheden

Grond kan niet verder verdicht worden dan het vochtgehalte en/of de geometrie van de bodem toelaten. Verdichting van de bodem gaat ten koste van het met lucht gevulde poriënvolume, waardoor het effectieve poriënvolume afneemt, hetgeen nog versterkt wordt door de aanwezigheid van sterk zwellende kleimineralen. De mate waarin een zand verdicht kan worden, zal invloed hebben op de benodigde hoeveelheid bentoniet.

De dichtheden van de onderzochte monsters variëren nogal, waarvoor meer dan één reden is aan te geven. De monsters 3 en 6 zijn verdicht bij een bepaalde standaard energie volgens de Proctorprocedure. Een hogere dichtheid is mogelijk met gebruikmaking van extra energie. De inspanning echter weegt niet op tegen het verkregen effect. Bij de monsters 10 en 11 was verdere verdichting niet mogelijk vanwege het bereiken van het verzadigingspunt (verzadigingsgraad = 100%). Bij monster 5 is bewust voor een lagere dichtheid gekozen. Het resultaat van de verschillende dichtheden op de jaarlijkse lekkage van een afdichtingssysteem is samengevat in tabel 3. Het bentonietgehalte van de monsters ligt op een zodanig niveau dat de onderlinge verschillen weinig invloed hebben op de doorlatendheid. De hoogste gehalten zijn te vinden in de monsters met de laagste dichtheden.

Tabel 3 Relatie tussen de gerealiseerde drogedichtheid (kg/dm^3) en de jaarlijks optredende lekkage bij een gradiënt van $i = 5$.

Monsternummer	droog volumegewicht (kg/dm^3)	jaarlijkse lekkage (mm)
11	1,15	134
10	1,31	63
5	1,41	46
6	1,65	18
3	1,82	8

Bij monster 6 heeft de verdichting plaats gevonden bij een volkomen droog monster. De maximaal te bereiken dichtheid bij toediening van een standaardhoeveelheid energie is afhankelijk van het vochtgehalte. Om te bepalen bij welk vochtgehalte (w-opt) de maximale droge dichtheid (ρ -max) gehaald kan worden, wordt op het laboratorium de Proctor-proef gedaan. De proef houdt in dat bij oplopend vochtgehalte een standaardhoeveelheid energie wordt toegediend. Uit de Proctorcurve kan men vervolgens aflezen bij welk vochtgehalte de maximale dichtheid gehaald kan worden. Het blijkt dat met slecht gegradeerd materiaal, met zowel fijne als grove fracties, de grootste verdichting kan worden verkregen, waardoor het poriënvolume minimaal is. Verdichten gaat niet alleen ten koste van het poriënvolume, maar veelal ook ten koste van de structuur, met name geldt dit voor kleien. Wanneer voor een kleigrond w-opt en ρ -max bepaald is, blijkt dat de doorlatendheid het kleinst is bij een verdichting met een vochtgehalte iets groter dan w-opt, dat wil zeggen aan de natte zijde van de Proctorcurve (Reuter, 1985). Met name bij kleien ontstaat door het verknedden een disperse structuur waardoor de poriën verstopt raken en de doorlatendheid sterk terugloopt. Het vochtgehalte luistert erg nauw, enerzijds om bij een zand-bentoniet mengsel de maximale dichtheid te verkrijgen en anderzijds bij kleiën het effect van verknedden te bewerkstelligen, met als uiteindelijk doel een zo gering mogelijke doorlatendheid. Dat het optimum-vochtgehalte nauw luistert laat fig. 5 zien.

3.3 Fysisch-chemische reacties

Reeds in het voorgaande is het belang aangetoond van het waterbindend en zwellend vermogen van kleimineralen in relatie tot de doorlatendheid. Kleimineralen bestaan uit chemische verbindingen, die over een kationen adsorptie

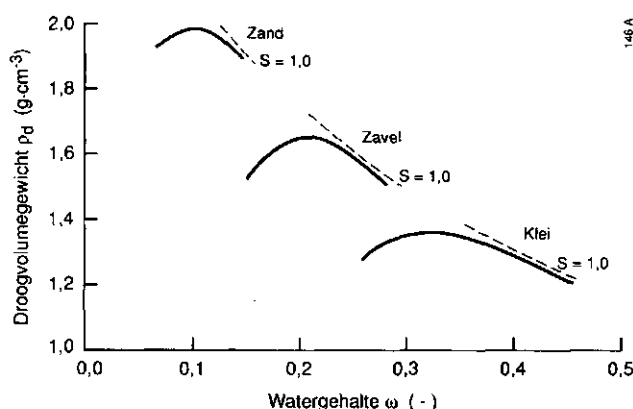


Fig. 5 Standaard Proctorcurven, specifiek voor fijn- en grofkorrelige materialen (Reuter, 1985).

capaciteit beschikken. De kationen adsorptie-capaciteit van montmorilloniet is groot. Door de negatieve lading van het kleimineraal worden kationen, vanwege hun positieve lading, aangetrokken. Anderzijds hebben de kationen de neiging om zich in de vloeistof te willen verspreiden (diffusie onder invloed van lokale verschillen in concentratie), zodat de ionenconcentratie overal gelijk wordt. Er ontstaat dan een evenwicht tussen aantrekkings- en diffusiekrachten, waarbij de kationenconcentratie afneemt met de afstand tot het kleimineraal. De afstand van het mineraaloppervlak tot het punt in de vloeistof, waar de kationenconcentratie constant is, wordt de 'diffuse dubbellaag' genoemd. Watermoleculen zijn dipolen, waardoor ze worden aangetrokken door het negatief geladen kleimineraal en zodoende worden vastgehouden in de dubbellaag. De dikte van de diffuse dubbellaag is afhankelijk van:

- de waardigheid van de kationen:

Meerwaardige kationen worden sterker aangetrokken door het negatief geladen kleioppervlak dan éénwaardige ionen. Als het kleioppervlak bezet is met Ca^{2+} -ionen dan is daardoor de diffuse dubbellaag dunner dan bij bezetting met Na^{+} -ionen. En in het geval van Fe^{3+} -ionen, is de dubbellaag nog weer dunner dan bij Ca^{2+} -ionen. Er wordt dan ook minder water vastgehouden in de diffuse dubbellaag. Zo kan het zwelvermogen van montmorilloniet variëren van 2 cm^3 water per gram klei bij bezetting met vooral tweewaardige kationen (vnl. Ca^{2+} -ionen) tot 12 cm^3 per gram bij bezetting met overwegend éénwaardige kationen (vnl. Na^{+} -ionen). Monster 13 (O17) vertoont een hoge doorlatendheid. Uitspoeling van ijzerionen is duidelijk waargenomen. De ongunstige bezetting van het klei-complex veroorzaakt hier een dunne dubbellaag. Hetzelfde effect is te zien bij monster 4, zij het nu met Ca^{2+} -ionen. Voor het zandbentoniet mengsel is kalkrijk

zand gebruikt. Dat het uitwisselingsproces zeer langzaam verloopt is duidelijk; ook de doorlatendheid is gering. Bij het aanbrengen van een hoge gradiënt gedurende lange tijd, kan het effect van de ionenuitwisseling in de tijd bestudeerd worden. Na een tijdssimulatie (versneld doorspoelen bij een hoge gradiënt) van ca. 100 jaar bleek dat de lekkage verdubbeld was (monster 3 en 4). Zo kan de kationenbezetting na verloop van tijd een verandering ondergaan als gevolg van ionenuitwisseling tussen het adsorptie-complex en de opgeloste stoffen in de passerende vloeistof. Het effect van kalk kan gemineraliseerd worden door te streven naar een zo groot mogelijke dichtheid.

- zoutconcentratie (ionsterkte) en organische verbindingen:

Naarmate de zoutconcentratie in de bodemoplossing toeneemt wordt de diffuse dubbellaag verder ingedrukt. Percolaat van een vuilstort bevat zeer hoge zoutconcentraties (830 mS/m, 5000 mg Cl/l), waardoor men een hogere doorlatendheid zou verwachten dan bij demi-water. Doorlatendheidsproeven, uitgevoerd met gedemineraliseerd water en percolatiewater uit een vuilstort, hebben bij een zand-bentoniet mengsel aangetoond met percolatiewater de doorlatendheid ongeveer 100 keer groter is dan voor gedemineraliseerd water (Hoeks e.a., 1987). De resultaten van de monsters, beschreven in dit rapport bevestigen deze resultaten niet. Percolatiewater uit een vuilstort bevat behalve zout ook allerlei organische verontreinigingen, die de poriën kunnen verstopen. Ook in de bodemkunde is bekend dat inspoeling van organische stof aanleiding kan geven tot verstopping. Veenkoloniale gronden kennen de aanwezigheid van een gliedelaagje. Tijdens het transport door de bodem slaat de colloïdale humus neer op de overgang van veen naar zand. De gliedelaag werkt storend op de verticale waterbeweging (Van der Heij en Peerlkamp, 1966). Tijdens de proeven is wel gebleken dat bij fijnkorrelige materialen, zoals kleien, de doorlatendheid bij gebruik van vuilstortpercolaat sterk achterblijft (monster 22 en 25) t.o.v. demi-water (monster 21 en 24). Grofweg kan gezegd worden, dat door dit sterk verontreinigde water de doorlatendheid bij kleimonsters met ca. 80% is teruggelopen tot enkele mm's per jaar. Bij zand-bentoniet mengsels is dit niet of nauwelijks waargenomen.

4 LEKKAGE AFDICHTINGSLAAG

De grootte van de lekkage door de bovenafdichting is, zoals reeds vermeld in de inleiding, afhankelijk van de aangelegde gradiënt. De gemiddeld hoogste gradiënt, die men kan aantreffen boven de afdichtingslaag is berekend op $i = 5$. De lekkage voor $i = 5$ bij een afvoerperiode van 200 dagen per jaar is een goede norm om de waterdichtheid van het materiaal te beoordelen. Als de relatie tussen $v(x)$ en $i(x)$ in een vergelijking $v = f(i)$ is vastgelegd, kan door invulling van $i = 5$ de lekkage q als volgt worden berekend:

$$q = v(x) * 3600 * 24 * 200 * 1000 \text{ mm/jaar} \quad (11)$$

Als $v(x)$ kleiner is dan $1,2 \cdot 10^{(-10)}$ m/s ($i(x) = 5$ en $k = 2,4 \cdot 10^{(-9)}$ m/s), dan is de lekkage minder dan 20 mm/jaar. Een afdichting met een lekkage groter dan 20 mm/jaar is in het algemeen niet acceptabel. Ook op de lange duur zal de lekkage beneden de 20 mm/jaar moeten blijven, wil het onderzochte afdichtingsmateriaal bruikbaar zijn. In hoofdstuk 2 is reeds vermeld dat de gradiënt de resultante is van stijghoogteverschil en laagdikte (fig. 2). Door de stijghoogte in de praktijk te verlagen door bijv. intensiever te draineren kan men volstaan met een dunnere afdichtingslaag, zonder dat overigens de lekkage verandert. Daar staat echter tegenover dat bij toepassing van een dikkere laag op de drainagekosten kan worden bespaard.

In tabel 4 is de lekkage berekend voor zand-bentoniet mengsels (4a) en voor een aantal kleien (4b), met als variabelen:

- grondwaterstand boven de afdichtingslaag
- laagdikte

De grondwaterstand boven de afdichtingslaag varieert van 0,10 tot 0,55 m in stappen van 0,15 m. Bij een bepaalde grondwaterstand is vervolgens de laagdikte variabel. Deze loopt van 0,2 m tot maximaal 0,6 m in stappen van 0,2 m. Bij de berekening van de gradiënt is er tevens van uitgegaan dat het vochtgehalte van het materiaal onder de afdichtingslaag een vochtspanning heeft van $p_F 2,0$ (d.i. een onderzoek van 1,0 m waterkolom).

De resultaten staan vermeld in tabel 4. De lekkage kan worden teruggedrongen door een grotere dikte van de afdichtingslaag voor te schrijven eventueel gecombineerd met een betere ontwatering. Ook één van deze twee maatregelen leidt tot vermindering van de lekkage. In het algemeen wordt de lekkage sterker beïnvloed door laagdikte dan door de mate van ontwatering.

Aandacht voor een goede verdichtingstechniek tijdens de uitvoering kan eveneens veel bijdragen aan de vermindering van de lekkage (tabel 4a). Besteed men aan het vooronderzoek, het ontwerp en de uitvoering van de laag de nodige zorg en aandacht dan kan de lekkage beperkt blijven tot

slechts enkele mm (in tabel 4a is de kleinste waarde 4,5 mm/jaar).

Als men bezuinigt op onderzoekskosten, materiaal en uitvoeringskosten dan gaat dit ten koste van een goede af-dichting. De lekkage ($i=5$) kan dan zelfs oplopen tot enkele tientallen mm's per jaar (in tabel 4a is grootste waarde 92,1 mm/jaar).

Tabel 4a Lekkage (mm/jaar) over een periode van 200 dagen bij enkele zand-bentoniet mengsels (verschil in dichtheden) bij verschillende grondwaterstanden en laagdikten (pF onderzijde 2,0).
N.B. De cursief-vet gedrukte resultaten zijn toelaatbaar.

ZAND-BENTONIET

Monster	5	6	7	3
Bentonietgehalte (%)	6	10	15	6
Droog volumegewicht (kg/dm ³)	1,41	1,65	1,67	1,82
Watergehalte (%)	8	0	0	8
Porievolumen (%)				
totaal	47	38	63	31
water	11	0	0	15
lucht	36	38	37	16

* GRONDWATERSTAND = 0,10 M

LAAGDIKTE (M)	GRADIENT (-)				
0,2	6,5	63,9	22,4	21,8	10,6
0,3	4,7	42,5	16,8	17,0	7,6
0,4	3,8	32,5	13,8	14,4	6,1
0,5	3,2	26,7	12,0	12,8	5,2
0,6	2,8	23,0	10,8	11,7	4,5

* GRONDWATERSTAND = 0,25 M

LAAGDIKTE (M)	GRADIENT (-)				
0,2	7,3	73,1	24,7	23,7	11,9
0,3	5,2	48,2	18,3	18,4	8,4
0,4	4,1	36,5	15,0	15,5	6,7
0,5	3,5	29,9	13,0	13,7	5,6
0,6	3,1	25,5	11,6	12,5	5,0

* GRONDWATERSTAND = 0,40 M

LAAGDIKTE (M)	GRADIENT (-)				
0,2	8,0	82,5	26,9	25,5	13,1
0,3	5,7	54,0	19,9	19,7	9,2
0,4	4,5	40,7	16,2	16,6	7,3
0,5	3,8	33,0	14,0	14,6	6,1
0,6	3,3	28,1	12,5	13,2	5,4

* GRONDWATERSTAND = 0,55 M

LAAGDIKTE (M)	GRADIENT (-)				
0,2	8,8	92,1	29,1	27,3	14,4
0,3	6,2	59,9	21,4	21,0	10,1
0,4	4,9	44,9	17,4	17,6	7,9
0,5	4,1	36,3	15,0	15,4	6,6
0,6	3,6	30,7	13,3	14,0	5,8

Tabel 4b Lekkage (mm /jaar) over een periode van 200 dagen bij enkele kleien bij verschillende grondwaterstanden en laagdikten (pF onderzijde = 2,0).
(N.B. De cursief-vet gedrukte resultaten zijn toelaatbaar).

KLEI

Monster	13	15	17	19	21	23	24
Kenmerk	O17	W22	N11	W21	TK	RK	N29
Lutum %	33,8	37,4	27,8	31,5	51,5	37,8	37,2
Droog VG (kg/dm ³)	1,36	1,69	1,52	1,60	1,89	1,48	1,45
Watergehalte (%)	42	17	29	16	17	30	36
Poriënvolume (%)							
totaal	49	36	43	40	29	44	45
water	57	28	44	26	32	44	52
lucht	0	8	0	14	0	0	0

* GRONDWATERSTAND = 0,10 M

LAAGDIKTE (M) GRADIENT (-)

0,2	6,5	300,0	204,5	46,8	27,6	18,7	15,4	9,5
0,3	4,7	300,0	138,3	29,3	17,9	12,0	11,0	6,4
0,4	3,8	300,0	106,9	21,4	13,5	8,9	8,8	4,9
0,5	3,2	300,0	88,6	17,1	11,0	7,2	7,4	4,0
0,6	2,8	300,0	76,8	14,4	9,4	6,1	6,6	3,5

* GRONDWATERSTAND = 0,25 M

LAAGDIKTE (M) GRADIENT (-)

0,2	7,3	300,0	232,6	54,7	31,8	21,6	17,3	10,8
0,3	5,2	300,0	156,0	33,8	20,5	13,7	12,2	7,2
0,4	4,1	300,0	119,6	24,6	15,3	10,2	9,7	5,5
0,5	3,5	300,0	98,5	19,4	12,3	8,1	8,2	4,5
0,6	3,1	300,0	84,8	16,2	10,5	6,9	7,2	3,8

* GRONDWATERSTAND = 0,40 M

LAAGDIKTE (M) GRADIENT (-)

0,2	8,0	300,0	261,3	62,9	36,1	24,7	19,1	12,2
0,3	5,7	300,0	173,9	38,5	23,1	15,5	13,4	8,0
0,4	4,5	300,0	132,5	27,8	17,1	11,4	10,6	6,1
0,5	3,8	300,0	108,6	21,9	13,7	9,1	8,9	5,0
0,6	3,3	300,0	93,0	18,1	11,6	7,6	7,8	4,2

* GRONDWATERSTAND = 0,55 M

LAAGDIKTE (M) GRADIENT (-)

0,2	8,8	300,0	290,4	71,4	40,6	27,8	21,0	13,6
0,3	6,2	300,0	192,2	43,5	25,7	17,4	14,6	8,9
0,4	4,9	300,0	145,6	31,1	19,0	12,7	11,5	6,7
0,5	4,1	300,0	118,7	24,3	15,1	10,1	9,6	5,4
0,6	3,6	300,0	101,3	20,1	12,7	8,4	8,4	4,6

O17 = beekklei; W22 = zware zeeklei; N11 = lichte zeeklei; W21 = lichte zeeklei;
RK = reuverterklei; TK = tegelse klei; N29 = zware zeeklei

- Meetmethoden

Er zijn twee methoden bekend, die zich lenen voor de bepaling van de doorlatendheid van materialen: De "constant-head" en de "falling-head". Bij de "constant head"-methode wordt de doorlatendheid bepaald bij een constante gradiënt. Aangezien het verband tussen de lekkage en de gradiënt niet lineair verloopt, hetgeen blijkt uit de resultaten van de "falling head"-methode bij de verschillende materialen (aanhangsel 4), geeft interpolatie geen juist inzicht in de grote van de doorlaatfactor. Dit wordt geïllustreerd met fig. 6. De "falling head" geeft duidelijk meer informatie over het niet-Darcy gedrag bij materialen met zeer lage doorlatendheden. Het onderzoek naar de doorlatendheid van de in dit rapport beschreven materialen, zijn uitgevoerd met de "falling head"-methode. De constructie van de opstelling is zodanig, dat bij een infiltratiesnelheid van 0,1 mm/dag ($q=1,2 \cdot 10^{-9}$ m/s), het waterniveau in de stijgbuis 13,4 mm/dag daalt. Deze relatie wordt bepaald door het quotiënt van het oppervlak van het monster en het oppervlak in de stijgbuis. De verhouding tussen beiden moet zodanig gekozen worden, dat de mogelijkheid bestaat om binnen enkele weken over een tiental betrouwbare metingen te beschikken. Door de "falling-head" te herhalen krijgt men informatie over de verandering van de doorlatendheid in de tijd (veranderingen in de tijd kunnen versneld worden door gedurende lange tijd bij een hoge gradiënt het monster door te spoelen). De relatie tussen $v(x)$ en $i(x)$ laat zich door een exponentiële functie beschrijven:

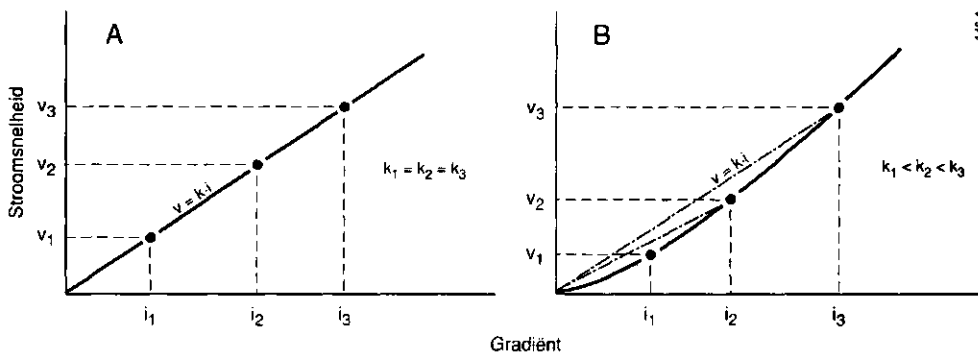
$$v(x) = a * i(x) ** b.$$


Fig. 6A: Darcy-gedrag als resultaat van de "constant head"-methode berekend uit: k_1 of k_2 of k_3 . B: Het niet-Darcy gedrag als resultaat van de "falling head"-methode, berekend uit: k_1 en k_2 en k_3 .

- Zand-bentoniet mengsels

Voor een goede afdichting moet men streven naar een optimale verdichting. Uit tabel 3 kan men afleiden dat de dichtheid minimaal $1,6 \text{ kg/dm}^3$ moet zijn om een lekkage van 20 mm/jaar niet te overschrijden. De proctordichtheid van een zandmengsel is ca. $1,8 \text{ kg/dm}^3$. Met een goede uitvoeringstechniek is deze dichtheid in de praktijk eenvoudig te halen. Voor een hogere dichtheid moet men vervolgens gebruik maken van een hogere verdichtingsenergie. Beter is echter bij de keuze van materialen uit te gaan van een optimale korrelgrootteverdeling. De gradering van het totale mengsel is van grote invloed. Gedacht moet worden aan een optimale verhouding tussen hoeveelheden fijn materiaal (lutum, leem) en grover materiaal (zand en grind). Dichtheden van slecht gegradeerde materialen met matig afgeronde korrels kunnen waarden bereiken van meer dan $2,0 \text{ kg/dm}^3$. De lekkage bij dergelijke dichtheden zijn zeer gering. Men kan dit afleiden uit de gegevens van tabel 3. Met behulp van deze gegevens en het feit dat bij een dichtheid van $2,68 \text{ kg/dm}^3$ de waterdoorlatenheid 0 is, kan men een schatting maken van de lekkage, zoals fig. 7 ons laat zien. Maatregelen om te komen tot terugdringing van de lekkage met behulp van een zo hoog mogelijke dichtheid, verdient alle aandacht.

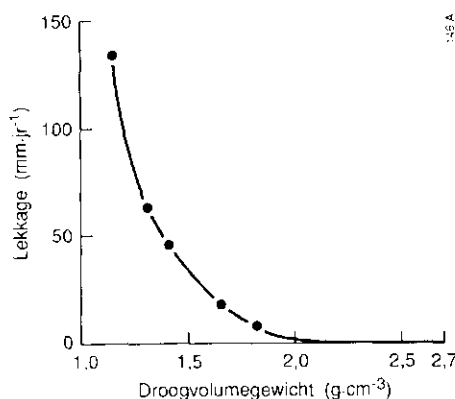


Fig. 7 Relatie tussen lekkage en droog volumegewicht van een afdichtingslaag bij een gradiënt van 5 (zie ook tabel 3).

Ook het vochtgehalte tijdens het verdichtingsproces is van belang. Het mag niet te hoog zijn om te voorkomen dat verzadiging een verdere verdichting in de weg staat, anderzijds mag het niet te laag zijn vanwege de weerstand die optreedt tijdens het in elkaar schuiven van de deeltjes. Bentonietgehalten van meer dan 5% hebben nagenoeg geen invloed meer op de doorlatendheid. Uit onderzoek van Hoeks (1987) is eveneens gebleken dat bij een bentonietgehalte van 5% een voldoende lage doorlatendheid wordt bereikt. Een zeer sterke toename van het bentonietgehalte zou zelfs een averechts effect kunnen hebben. De doorlatendheid, bepaald met leidingwater als testvloeistof, is in het algemeen kleiner dan wanneer percolaat uit een vuilstort als testvloeistof wordt gebruikt.

- Kleigronden

In Nederland komen, geologisch gezien, jonge en oude afzettingen voor, soms op verschillende diepten. Van de oude afzettingen liggen plaatselijk de tertiaire kleien aan de oppervlakte. Kleiën worden gekenmerkt door het lutumgehalte (deeltjes $< 2 \mu\text{m}$), de samenstelling van de kleimineralen en de kationenbezetting aan het kleicomplex. Bij een relatief groot percentage meerwaardige ionen is de doorlatendheid groter dan bij éénwaardige ionen. Met name is dit gebleken bij een ijzerhoudende klei door aanwezigheid van het driewaardig ijzerion. Ook het tweewaardig calciumion bevordert de toename van de doorlatendheid, zij het in mindere mate dan een driewaardig ion. Kleien met een lutumgehalte van meer dan 30% zijn potentiële afdichtingsmaterialen. Een ongunstige kationenbezetting van het kleicomplex kan alsnog aanleiding geven tot afkeuring. Er is weinig bekend over die effecten van ionenuitwisseling in de tijd, waardoor enerzijds de kwaliteit van slecht materiaal kan verbeteren, terwijl anderzijds goedgekeurd materiaal uit de samenstelling van percolerend water kan degenereren. Evenals voor zand-bentonietmengsels geldt ook voor kleien dat een hogere dichtheid een beter resultaat geeft. Kleigronden hebben in natuurlijke ligging reeds een dichtheid, die niet of zeer moeilijk kan worden verhoogt. Nederlandse kleigronden bestaan voor 3 à 7% uit het kleimineraal montmorilloniet. Aangezien dit kleimineraal volledig uitgezwollen is, mag na aanbrengen van een afdichtingslaag van dit materiaal geen extra zwellings meer worden verwacht. Tijdens verwerking moet zowel uitdroging als toename van het vochtgehalte worden tegengegaan. Door de verdichting uit te voeren bij een iets hoger dan het optimaal vochtgehalte, bepaald volgens de standaard Proctortest, treedt een kneedwerking op, waarbij de structuur van de kleigrond wordt "verpest". Dit leidt tot een sterke verlaging van de doorlatendheid. Geen onderzoek is gedaan naar de toepassing van lichte klei gemengd met bentoniet. Los daarvan is het twijfelachtig of bentoniet zich in de praktijk gemakkelijk laat mengen met klei. Waarschijnlijk zal intensieve menging hoge kosten met zich meebrengen. Een afdichtingslaag, samengesteld uit kleimaterialen blijkt in contact met

percolatiewater uit een vuilstort beter te voldoen, dan met schoonwater. Dichtslibben en neerslaan van stoffen uit het percolaat zal verstopping van de poriën tot gevolg hebben.

- Boorgruis

Als gevolg van het hoge watergehalte van dit materiaal, is boorgruis vooralsnog ongeschikt voor het maken van afdichtingen. De lekkage is te groot om van een afdichting te kunnen spreken. Verlaging van het vochtgehalte door droging of menging met droog materiaal is noodzakelijk maar vraagt om een technische oplossing.

LITERATUUR

Heij, D. van der en P.K. Peerlkamp, 1966. Kennis van grond en bodem. Groningen, Uitgave J.B. Wolters.

Hoeks, J. en G.J. Agelink, 1982. Onderzoek naar de mogelijkheden om de infiltratie van regenwater in een afvalstort te verminderen. Wageningen, ICW. Rapport 3.

Hoeks, J., A.H. Ryhiner en J. Van Dommelen 1987. Onderzoek naar de praktische uitvoerbaarheid van bovenafdichting op afvalstortterreinen. Wageningen, ICW. Rapport 21.

Hoeks, J., H.P. Oosterom, D. Boels, K. Strijbis, en W. ter Hoeven, 1990. Richtlijnen voor ontwerp en konstruktie van een waterdichte eindafdekking op afvalstortterreinen. Wageningen, Staring Centrum. Rapport 91.

Reuter, E., 1985. Eigenungsuntersuchungen von natürlichen Dichtingsmaterialien für Deponien. Technische Universität Braunschweig, Braunschweig. Mitteilung des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik, Heft nr 17. Fachseminar 6-7 Februar.

Gabener, G.H., 1984. Über Abweichungen vom darcysche Gesets bei durchströmung bindigen Boden. Berlin. Bautechnik, Fachblad für dem gesamte Bauingenieurswesen nr.6, blz. 351-358.

Niet-gepubliceerde bronnen

Jessen, G., 1988. Onderzoek naar de geschiktheid van natuurlijke materialen voor de afdichting van vuilstortplaatsen. Scriptie in het kader van het afstudeervak Cultuurtechniek. Wageningen, ICW. Nota 1875

Ryhiner, A.H. en J. Hoeks, 1986. Onderzoek naar de bruikbaarheid van Reuverse en Tegelse klei als afdichtingsmateriaal op afvalstortterreinen. Wageningen, ICW. Nota 1726.

AANHANGSEL 1

VOORBEELD VAN EEN INVOERFILE VOOR HET PROGRAMMA DARCY

Opmerkingen:

- Bij het aanmaken krijgt de file een NAAM en extensie .DAT
- Het record HERKOMST wordt gevuld met identificatiegegevens
- Het record KENMERK wordt gevuld met eigenschappen, die verband houden met het monster en de test
- Het record MONSTERDIKTE(M) is dikte (hoogte) in meters (fixed format)
- De volgende records zijn als volgt samengesteld (fixed format):
 - 99 999999 99.99 9.999
 - 99 = volgnummer waarnemingen
 - 999999 = datum (jjmmdd)
 - 99.99 . . . = tijdstip in uren en minuten (uu.mm)
 - 9.999 = stijghoogte in meters water kolom
- Het sluitrecord is gevuld met negens

Voorbeeld 1:

```

|HERKOMST: B06/ZAND-BENTONIETKLEI 1.1|
|KENMERK: bent%=6.0 watergeh=8.0 VG<droog>=1.82 leidingwater|
|MONSTERDIKTE(M)=0.0185|
| 0 881117 13.45 1.170|
| 1 881118 8.55 1.106|
| 2 881118 15.45 1.084|
| 3 881121 9.00 0.911|
| 4 881122 13.10 0.842|
| 5 881124 9.23 0.761|
| 6 881129 14.30 0.571|
| 7 881201 9.45 0.518|
| 8 881202 10.05 0.490|
| 9 881205 8.56 0.420|
|10 881206 14.15 0.393|
|11 881208 15.06 0.349|
|12 881212 11.30 0.280|
|13 881215 9.40 0.235|
|14 881227 9.23 0.114|
|15 890104 9.35 0.066|
|99 999999 99.99 9.999|

```

Voorbeeld 2:

HERKOMST: TEGELSE KLEI 4.2				
KENMERK: lutum%=51.5 watergeh= 17.0 VG<droog>=1.89 demi-water				
MONSTERDIKTE(M)=0.0260				
0	871124	08.42	1.687	
1	871124	16.45	1.581	
2	871125	08.43	1.429	
3	871125	16.50	1.355	
4	871126	08.29	1.231	
5	871126	16.32	1.177	
6	871127	08.50	1.078	
7	871127	11.52	1.060	
8	871130	10.38	0.739	
9	871201	16.51	0.640	
10	871203	08.35	0.532	
12	871204	12.17	0.473	
12	871207	10.54	0.356	
13	871210	13.09	0.267	
14	871214	10.55	0.190	
99	999999	99.99	9.999	

AANHANGSEL 2

VOORBEELD VAN EEN UITVOERFILE VAN HET PROGRAMMA DARCY

Voorbeeld 1

HERKOMST: B06/ZAND-BENTONIETKLEI 1.1
 KENMERK: lutum%=6.0 VG<droog>=1.82 leidingwater
 START: 17 NOV 1988 (48 DAGEN)

DIKTE MONSTER 0.0185 M.

INTERVAL X	AFLEZING (M)	GRADIENT (-)	SECONDEN	I(X) (-)	V(X) (E-10 M/SEC)	K-DARCY (E-10 M/SEC)
0	1.170	63.2				
1	1.106	59.8	69000	61.5	69.42	1.13
2	1.084	58.6	24600	59.2	66.97	1.13
3	0.911	49.2	234900	53.5	54.88	1.03
4	0.842	45.5	101400	47.3	50.91	1.08
5	0.761	41.1	159180	43.2	38.04	0.88
6	0.571	30.9	450420	35.3	31.16	0.88
7	0.518	28.0	155700	29.4	25.45	0.87
8	0.490	26.5	87600	27.2	23.92	0.88
9	0.420	22.7	255060	24.4	20.47	0.84
10	0.393	21.2	105540	21.9	19.14	0.87
11	0.349	18.9	175860	20.0	18.69	0.94
12	0.280	15.1	332640	16.8	15.41	0.92
13	0.235	12.7	252600	13.8	13.27	0.96
14	0.114	6.2	1035780	8.3	8.03	0.97
15	0.066	3.6	691920	4.5	4.95	1.09

REGRESSIE LIJN: $V(X) = 0.91E-10 * I(X) ** 1.02$
 CORR. COEFF.= 0.98)

Voor een afvoer van 200 dagen geldt het volgende:

gradient I = 2 geeft een lekkage van 3.2 mm/jaar
 I = 5 " " 8.1 "
 I =10 " " 16.3 "
 I =20 " " 33.0 "

LEKKAGE: $1,2*10^{**(-10)}$ m/sec ~ 0,01 mm/etm

Voorbeeld 2

HERKOMST: TEGELSE KLEI 4.2
 KENMERK: lutum%=51.5 VG<droog>=1.89 demi-water
 START: 24 NOV 1987 (21 DAGEN)

DIKTE MONSTER 0.0260 M.

INTERVAL X	AFLEZING (M)	GRADIENT (-)	SECONDEN	I (X) (-)	V (X) (E-10 M/SEC)	K-DARCY (E-10 M/SEC)
0	1.687	64.9				
1	1.581	60.8	28980	62.8	273.72	4.36
2	1.429	55.0	57480	57.7	197.70	3.42
3	1.355	52.1	29220	53.5	189.56	3.54
4	1.231	47.3	56340	49.6	164.57	3.32
5	1.177	45.3	28980	46.3	139.49	3.01
6	1.078	41.5	58680	43.3	126.18	2.92
7	1.060	40.8	10920	41.1	123.44	3.00
8	0.739	28.4	254760	33.5	92.34	2.76
9	0.640	24.6	108780	26.4	67.92	2.57
10	0.532	20.5	143040	22.3	56.22	2.52
11	0.473	18.2	99720	19.3	44.21	2.30
12	0.356	13.7	254220	15.6	34.01	2.18
13	0.267	10.3	267300	11.7	24.59	2.10
14	0.190	7.3	337560	8.5	16.76	1.96

REGRESSIE LIJN: $V(X) = 0.88E-10 * I(X) ** 1.34$
 CORR. COEFF.= 0.99)

Voor een afvoer van 200 dagen geldt het volgende:

gradient I = 2	geeft een lekkage van	3.8 mm/jaar
I = 5	"	13.1 "
I = 10	"	33.2 "
I = 20	"	83.9 "

LEKKAGE: $1.2 * 10^{(-10)}$ m/sec ~ 0,01 mm/etm

AANHANGSEL 3

***** PUBLICEREN IN LANDSCAPE EN 2 A4-TJES VERKLEINEN TOT 1 A4

BESCHRIJVING VAN HET PROGRAMMA DARCY IN FORTRAN77

```
*****
*   PROGRAMMA DARCY
*   Het programma DARCY is een rekenprogramma voor de interpretatie van de
*   metingen bij de 'falling-head'-methode naar mm'm lekkage per jaar (op
*   basis van 200 dagen afvoer). De gegevens en de metingen worden in een
*   invoerfile geplaatst volgens het voorbeeld in aanhangsel 1. Het program-
*   ma leest de gegevens m.b.v. edit descriptors (fixed format). De resulta-
*   ten zijn terug te vinden in de uitvoerfile (FILE.OUT) en heeft de dezelf-
*   de naam als de invoerfile (FILE.DAT).
*   Het programma is gemaakt en getest bij software engineer assistent H. P.
*   Met opmerkingen en vragen kunt u terecht bij het STARINGCENTRUM-Wageningen
*
*****
```

C..... declaratie unnamed common block.....

```
COMMON  N,DATUM,TIJD,SEC,DM,HD,GRAD,I,V,KDARCY
```

C..... declaratie integers

```
C          X= index (volgnummer waarneming)
C          DATUM(X,1)= JAAR   (2 posities)
C          DATUM(X,2)= MAAND  ( "   )
C          DATUM(X,3)= DAG    ( "   )
C          TIJD(X,1)= UUR     ( "   )
C          TIJD(X,2)= MINUUT  ( "   )
C          SEC(X)= aantal seconden tussen waarneming X-1 en X
C                      INTEGER
C          X,N,DATUM(0:100,3),TIJD(0:100,2),SEC(0:100)
```

C..... declaratie reals

```
C          AB= dwarsdoorsnede stijgbuis meetopstelling
C          AR= "   ring van het monster
C          DM= dikte van het monster (zie invoerfile)
C          HD(X)= stijghoogte voor waarneming X
C          GRAD(X)= gradiënt voor waarneming X
C          I(X)= harmonieuze gradiënt tussen waarneming X-1 en X
C          V(X)= gemiddelde lekkage bij gradiënt I(X)
C          KDARCY(X)= k-factor bij een gradiënt I(X)
C                      REAL    AB,AR,DM,
C          +          HD(0:100),GRAD(0:100),I(0:100),V(0:100),KDARCY(0:100)
```

C..... declaratie characters

```
C          HERKOMST en KENMERK bevatten tekst
C          met specifieke gegevens, afkomstig van de invoerfile
C          FILENAAM is de naam van de invoer en uitvoerfile
C          De invoerfile heeft de extensie .DAT meegekregen
C          De uitvoerfile krijgt de extensie .OUT
C                      CHARACTER*75  HERKOMST,KENMERK,
```

```
          +
          FILENAAM*10,INVOERFILE*15,UITVOERFILE*15
```



```

150                                     FORMAT(3X,3(I2),2(1X,I2),F6.3)
                                     END
*****
SUBROUTINE SECONDEN (X,DATUM,TIJD,SEC)
*****

                                     INTEGER
X,DATUM(0:100,3),TIJD(0:100,2),MND(12),SEC(0:100),
+
JAAR1,MAAND1,DAG1,UUR1,MIN1,JAAR2,MAAND2,DAG2,UUR2,MIN2
                                     LOGICAL SCHRIK
                                     SAVEJAAR1,MAAND1,DAG1,UUR1,MIN1
                                     DATA
MND/31,28,31,30,31,30,2*31,30,31,30,31/
                                     DATA JAAR1,MAAND1,DAG1,UUR1,MIN1/5*99/

                                     SEC(X)=0
                                     IF (X.EQ.0) THEN

JAAR1=DATUM(X,1)
MAAND1=DATUM(X,2)
DAG1=DATUM(X,3)
UUR1=TIJD(X,1)
MIN1=TIJD(X,2)
RETURN
ELSE
JAAR2=DATUM(X,1)
MAAND2=DATUM(X,2)
DAG2=DATUM(X,3)
UUR2=TIJD(X,1)
MIN2=TIJD(X,2)
ENDIF

                                     IF (SCHRIK(JAAR1)) MND(2)=29

                                     IF (MIN2.GE.MIN1) THEN
SEC(X)=(MIN2-MIN1)*60
ELSE
SEC(X)=(60-MIN1+MIN2)*60
UUR1=UUR1+1
IF (UUR1.EQ.24) THEN
UUR1=1
DAG1=DAG1+1
IF (DAG1.GT.MND(MAAND1)) THEN
DAG1=1
MAAND1=MAAND1+1
IF (MAAND1.GT.12) THEN
MAAND1=1
JAAR1=JAAR1+1
MND(2)=28
IF (SCHRIK(JAAR1)) MND(2)=29
ENDIF
ENDIF
ENDIF
IF (UUR2.GE.UUR1) THEN
SEC(X)=SEC(X)+(UUR2-UUR1)*60*60
ELSE
SEC(X)=SEC(X)+(24-UUR1+UUR2)*60*60
DAG1=DAG1+1
IF (DAG1.GT.MND(MAAND1)) THEN
DAG1=1
MAAND1=MAAND1+1
IF (MAAND1.GT.12) THEN
MAAND1=1
JAAR1=JAAR1+1
MND(2)=28
IF (SCHRIK(JAAR1)) MND(2)=29
ENDIF
ENDIF
ENDIF

```

```

IF (DAG2.GE.DAG1) THEN
SEC(X)=SEC(X)+(DAG2-DAG1)*24*60*60
ELSE
SEC(X)=SEC(X)+(MND(MAAND1)-DAG1+DAG2)*24*60*60
MAAND1=MAAND1+1
IF (MAAND1.GT.12) THEN
MAAND1=1
JAAR1=JAAR1+1
MND(2)=28
IF (SCHRIK(JAAR1)) MND(2)=29
ENDIF
ENDIF

IF (MAAND2.GE.MAAND1) THEN
DO 100 I=MAAND1,MAAND2-1
SEC(X)=SEC(X)+MND(I)*24*60*60
CONTINUE
ELSE
DO 200 I=MAAND1,12
SEC(X)=SEC(X)+MND(I)*24*60*60
CONTINUE

JAAR1=JAAR1+1

MND(2)=28

IF (SCHRIK(JAAR1)) MND(12)=29

DO 300 I=1,MAAND2-1
SEC(X)=SEC(X)+MND(I)*24*60*60
CONTINUE
ENDIF

IF (JAAR2.GT.JAAR1) THEN
DO 400 I=JAAR1,JAAR2-1
IF (SCHRIK(I)) THEN
SEC(X)=SEC(X)+366*24*60*60
ELSE
SEC(X)=SEC(X)+365*24*60*60
ENDIF
CONTINUE
ENDIF

JAAR1=JAAR2
MAAND1=MAAND2
DAG1=DAG2
UUR1=UUR2
MIN1=MIN2

RETURN
END

```



```

*****
LOGICAL FUNCTION SCHRIK(JAAR)
*****
* Een jaar is een schrikkeljaar als het deelbaar is door 4, tenzij *
* het een eeuwjaar betreft (bijv. 1800, 1900) en niet deelbaar *
* is door 400 (bijv. 2000) *
*****

```

```

INTEGER JAAR
LOGICAL JR4, JR100, JR400

```

```

JR4 =MOD(JAAR,4).EQ.0
JR100=MOD(JAAR,100).EQ.0
JR400=MOD(JAAR,400).EQ.0

```

```

SCHRIK={JR4.AND..NOT.JR100}.OR.JR400

```

```

RETURN
END

```

```

*****
SUBROUTINE DRUKAF (HERKOMST,KENMERK)
*****

COMMON  N,DATUM,TIJD,SEC,DM,HD,GRAD,I,V,KDARCY

INTEGER
X,N,DATUM(0:100,3),TIJD(0:100,2),SEC(0:100),TSEC

REAL    DM,A,B,R2,
+       HD(0:100),GRAD(0:100),I(0:100),V(0:100),KDARCY(0:100),
+       LEK

CHARACTER*75
HERKOMST,KENMERK,EINDREGEL,MND(12)*3

DATA
MND/'JAN','FEB','MRT','APR','MEI','JUN',
+   'JUL','AUG','SEP','OKT','NOV','DEC'/

TSEC=0

DO 100, X=1,N
TSEC=TSEC+SEC(X)
100  CONTINUE

WRITE (25,105)
WRITE (25,'('' ',A)') HERKOMST
WRITE (25,'('' ',A)') KENMERK
WRITE (25,110) DATUM(0,3),MND(DATUM(0,2)),DATUM(0,1)+1900,
+   TSEC/(24*60*60)+1

WRITE (25,105)
WRITE (25,120)DM
WRITE (25,'('' ',22(''-''))')
WRITE (25,130)
WRITE (25,140)
WRITE (25,105)

105 FORMAT(75(' '-'))
110 FORMAT(' START: ',I2,A4,I5,' ('',I2,' DAGEN)')
120 FORMAT(' DIKTE MONSTER ',F6.4,' M.')
130 FORMAT(
+ ' INTERVAL  AFLEZING  GRADIENT  SECONDEN  '
+ '          '          ' I(X)      V(X)      K-DARCY')
140 FORMAT(
+ ' X          (M)      (-)      '
+ '          '          ' (-) (E-10 M/SEC) (E-10 M/SEC)')

DO 200, X=0,N
IF (X.EQ.0)THEN
WRITE(25,150) X,HD(X),GRAD(X)
ELSE
WRITE(25,150) X,HD(X),GRAD(X),
+   SEC(X),I(X),V(X)*10.**10,KDARCY(X)*10.**10
ENDIF
200  CONTINUE
WRITE (25,105)

150 FORMAT(I5,F12.3,F10.1,I12,F9.1,2(F10.2))

CALL EXPKROMME (A,B,R2)

```

```

WRITE(25,'( '' REGRESSIE LIJN: V(X) =
'',E8.2,
+      '' * I(X) ** ',F4.2)')A,B
WRITE(25,'('' CORR. COEFF.= ',F4.2,'')'')R2

WRITE (25,105)

INDEX=2
LEK=A*(INDEX)**B*60.*60.*24.*200.*10.**3
WRITE (25,205)
WRITE(25,210) INDEX,LEK
INDEX=5
LEK=A*(INDEX)**B*60.*60.*24.*200.*10.**3
IF (INDEX.LE.I(1)) WRITE(25,215) INDEX,LEK
INDEX=10
LEK=A*(INDEX)**B*60.*60.*24.*200.*10.**3
IF (INDEX.LE.I(1)) WRITE(25,215) INDEX,LEK
INDEX=20
LEK=A*(INDEX)**B*60.*60.*24.*200.*10.**3
IF (INDEX.LE.I(1)) WRITE(25,215) INDEX,LEK

205 FORMAT(' Voor een afvoer van 200 dagen geldt het volgende:')
210 FORMAT('      gradient I =',I2,
+' geeft een lekkage van ',F5.1,' mm/jaar')
215 FORMAT('      I =',I2,
+'      ',F5.1,' ')
EINDREGEL= ' LEKKAGE: '//
+      ' 1,2*10**(-10) m/sec ~ 0,01 mm/etm '

WRITE(25,'(A)')EINDREGEL

RETURN
END

```

```

*****
SUBROUTINE EXPKROMME (A,B,R2)
*****

COMMON  N,DATUM(0:100,3),TIJD(0:100,2),SEC(0:100),
+       DM,HD(0:100),GRAD(0:100),I,V,KDARCY

INTEGER X,DATUM,TIJD,SEC

REAL    A,B,R2,V(0:100),I(0:100),LX,LY

SLX=0.
SLY=0.
SPLXLY=0.
SLX2=0.
SLY2=0.

DO 100, X=1,N
C.....I(X) op X-as
C.....V(X) op Y-as
      LX=ALOG(I(X))
      LY=ALOG(V(X))

      SLX=SLX+LX
      SLY=SLY+LY

      SPLXLY=SPLXLY+LX*LY

      PSLXSLY=SLX*SLY
      SLX2=SLX2+LX*LX
      SLY2=SLY2+LY*LY
      PSLX2=SLX*SLX
      PSLY2=SLY*SLY

100      CONTINUE

B=(SPLXLY-PSLXSLY/REAL(N))/(SLX2-PSLX2/REAL(N))
      A=EXP((SLY-B*SLX)/REAL(N))

R2=B*B*(SLX2-PSLX2/REAL(N))/(SLY2-PSLY2/REAL(N))

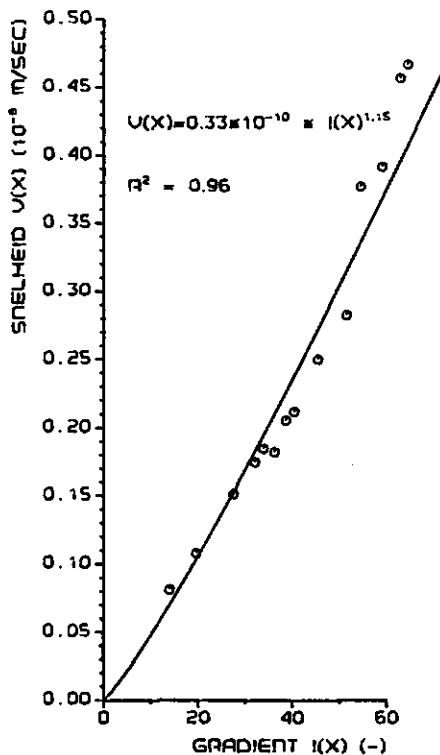
RETURN
END

```

AANHANGSEL 4

DE RELATIE $v(x)$, $i(x)$ IN DE GETESTE MONSTERS, BEREKEND UIT DE RESULTATEN VAN DE "FALLING HEAD"-METHODE

4-1



HERKOMST: B06/ZAND-BENTONIETKLEI 2.1

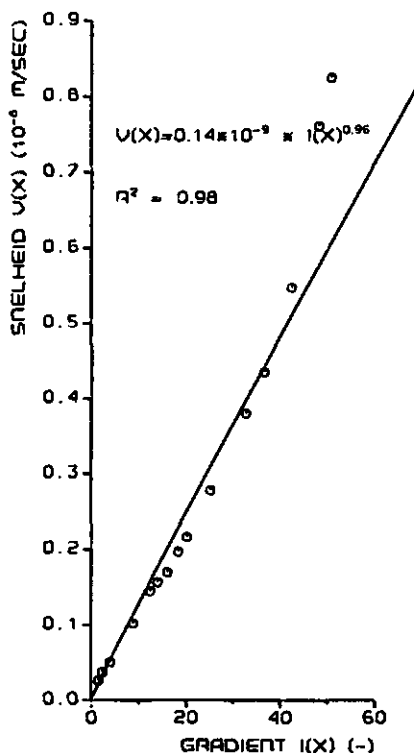
START: 17 NOV 1988 (48 DAGEN)

KENMERK: lutums=6.0 $VG_{drop}=1.81$ leidingwater

INTERVAL X	i(X) (-)	v(X) (10^{-8} M/SEC)	K-DARCY (10^{-10} M/SEC)
1	64.4	0.47	0.72
2	62.9	0.46	0.73
3	59.0	0.39	0.66
4	54.4	0.38	0.69
5	51.4	0.28	0.55
6	45.4	0.25	0.55
7	40.5	0.21	0.52
8	38.6	0.21	0.53
9	36.2	0.18	0.50
10	33.9	0.18	0.54
11	32.1	0.17	0.54
12	27.4	0.15	0.55
13	19.6	0.11	0.55
14	14.0	0.08	0.58

Een afvoerperiode van 200 dagen

bij $i(X) = 2$	geeft een <i>lektrage</i> van	1.3 mm/jaar
" 5	"	3.7 "
" 10	"	8.2 "
" 20	"	18.2 "
" 30	"	29.1 "



HERKOMST: B06/ZAND-BENTONIETKLEI 3.1

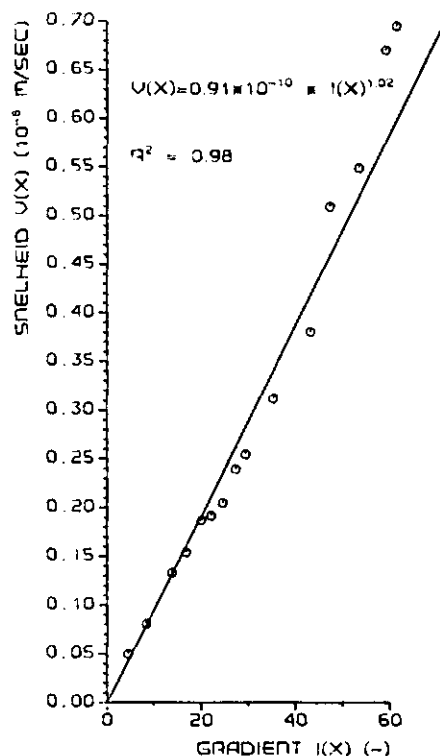
START: 17 NOV 1988 (48 DAGEN)

KENMERK: lutums=6.0 $VG_{drop}=1.84$ leidingwater

INTERVAL X	i(X) (-)	v(X) (10^{-8} M/SEC)	K-DARCY (10^{-10} M/SEC)
1	50.9	0.82	1.62
2	48.3	0.76	1.58
3	42.4	0.55	1.29
4	36.6	0.44	1.19
5	32.7	0.38	1.16
6	25.3	0.28	1.10
7	20.2	0.22	1.07
8	18.4	0.20	1.07
9	16.1	0.17	1.05
10	14.0	0.16	1.11
11	12.5	0.14	1.16
12	8.8	0.10	1.15
13	4.0	0.05	1.25
14	2.4	0.04	1.56
15	1.5	0.03	1.68

Een afvoerperiode van 200 dagen

bij $i(X) = 2$	geeft een <i>lektrage</i> van	4.7 mm/jaar
" 5	"	11.3 "
" 10	"	22.0 "
" 20	"	42.8 "
" 30	"	63.1 "



HERKOMST: B06/ZAND-BENTONIETKLEI 1.1

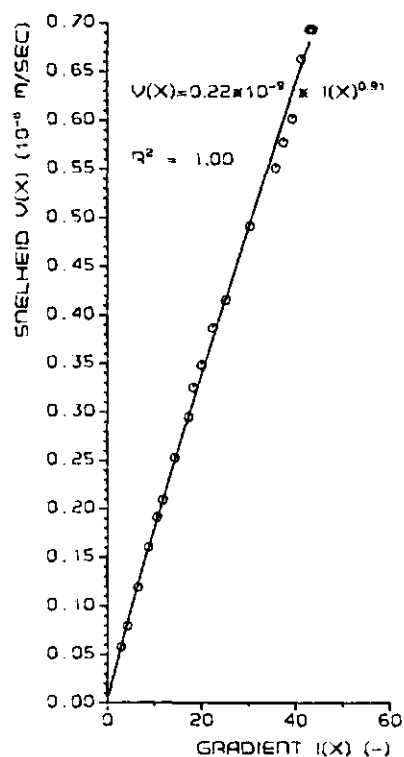
START: 17 NOV 1988 (48 DAGEN)

KENMERK: $\alpha_{\text{totaal}} = 0.0$ $V_{\text{droog}} = 1.82$ leidingwater

INTERVAL X	I(X) (-)	V(X) (10^{-8} M/SEC)	K-DARCY (10^{-10} M/SEC)
1	61.5	0.69	1.13
2	59.2	0.67	1.13
3	53.5	0.55	1.03
4	47.3	0.51	1.08
5	43.2	0.38	0.88
6	35.3	0.31	0.88
7	29.4	0.25	0.87
8	27.2	0.24	0.88
9	24.4	0.20	0.84
10	21.9	0.19	0.87
11	20.0	0.19	0.94
12	16.8	0.15	0.92
13	13.8	0.13	0.96
14	8.3	0.08	0.97
15	4.5	0.05	1.09

Een afvoerperiode van 200 dagen

bij $I(X) = 2$ geeft een <i>lekkage</i> van	3.2 mm/jaar
≈ 5	8.1
≈ 10	16.3
≈ 20	33.0
≈ 30	49.8



HERKOMST: B06/ZAND-BENTONIETKLEI 1.4

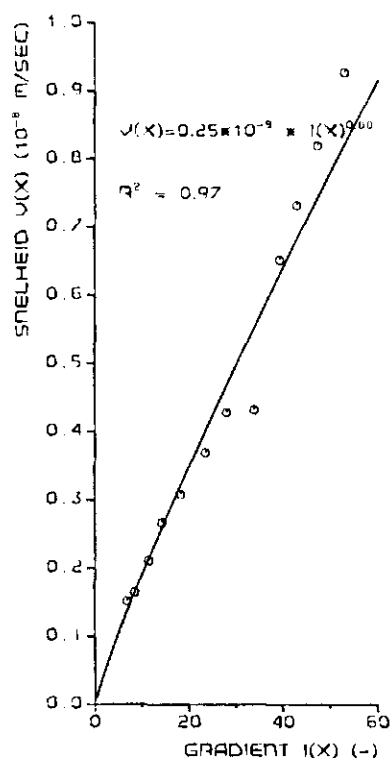
START: 7 JUN 1989 (26 DAGEN)

KENMERK: $V_{\text{droog}} = 1.82$ leidingwater $T = 100$ JAAR

INTERVAL X	I(X) (-)	V(X) (10^{-8} M/SEC)	K-DARCY (10^{-10} M/SEC)
1	43.5	0.69	1.59
2	43.0	0.69	1.61
3	41.2	0.66	1.61
4	39.3	0.60	1.53
5	37.4	0.58	1.54
6	35.7	0.55	1.54
7	30.2	0.49	1.63
8	25.1	0.42	1.65
9	22.4	0.39	1.73
10	20.0	0.35	1.75
11	18.2	0.33	1.79
12	17.2	0.29	1.72
13	14.3	0.25	1.77
14	11.7	0.21	1.78
15	10.5	0.19	1.82
16	8.7	0.16	1.84
17	6.5	0.12	1.83
18	4.3	0.08	1.85
19	2.9	0.06	2.02

Een afvoerperiode van 200 dagen

bij $I(X) = 2$ geeft een <i>lekkage</i> van	7.1 mm/jaar
≈ 5	16.5
≈ 10	31.1
≈ 20	58.5
≈ 30	84.7



HERKOMST: B10/ZANDBENTONIETKLEI 2.1

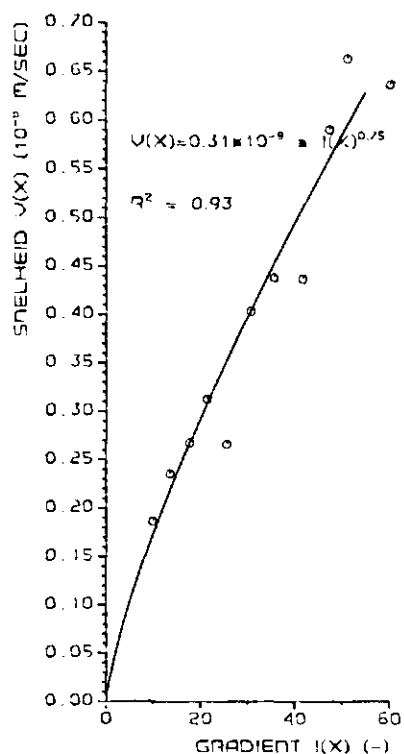
START: 16 NOV 1987 (22 DAGEN)

KENMERK: lutums=100 $VG_{200\text{dag}}=1.65$ demi-water

INTERVAL X	I(X) (-)	V(X) (10^{-8} M/SEC)	K-DARCV (10^{-10} M/SEC)
1	52.9	0.93	1.75
2	47.3	0.82	1.73
3	42.8	0.73	1.71
4	39.2	0.65	1.66
5	33.7	0.43	1.28
6	27.8	0.43	1.54
7	23.3	0.37	1.58
8	18.2	0.31	1.70
9	14.2	0.27	1.80
10	11.4	0.21	1.85
11	8.5	0.16	1.94
12	6.9	0.15	2.20

Een afvoerperiode van 200 dagen

bij $I(X) = 2$	geeft een <i>lekkage</i> van	8.0 mm/jaar
" 5	"	17.9 "
" 10	"	32.8 "
" 20	"	60.3 "
" 30	"	86.1 "



HERKOMST: B15/ZANDBENTONIETKLEI 1.1

START: 16 NOV 1987 (24 DAGEN)

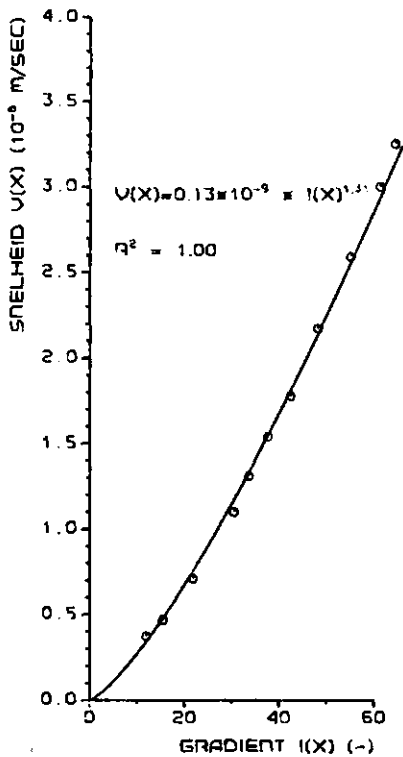
KENMERK: lutums=150 $VG_{200\text{dag}}=1.67$ demi-water

INTERVAL X	I(X) (-)	V(X) (10^{-8} M/SEC)	K-DARCV (10^{-10} M/SEC)
1	60.2	0.64	1.06
2	55.5	0.77	1.39
3	51.1	0.66	1.30
4	47.4	0.59	1.25
5	41.7	0.44	1.05
6	35.6	0.44	1.23
7	30.5	0.40	1.32
8	25.5	0.27	1.04
9	21.3	0.31	1.47
10	17.7	0.27	1.51
11	13.5	0.24	1.74
12	9.8	0.19	1.89

Een afvoerperiode van 200 dagen

bij $I(X) = 2$	geeft een <i>lekkage</i> van	8.9 mm/jaar
" 5	"	17.8 "
" 10	"	30.0 "
" 20	"	50.6 "
" 30	"	68.7 "

4-5



HERKOMST: B10/ZANDBENTONIETKLEI 2.2

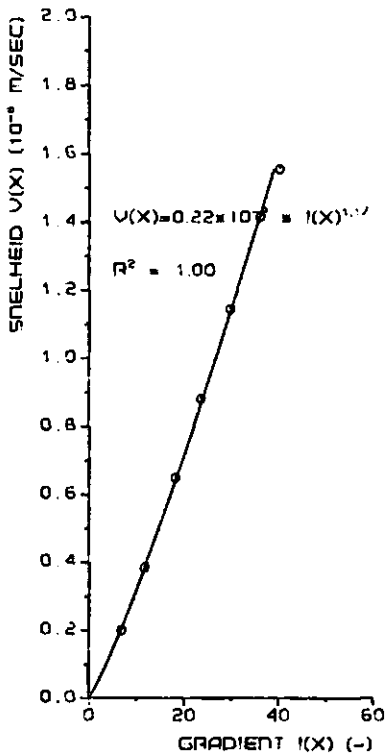
START: 19 JAN 1988 (9 DAGEN)

KENMERK: $\alpha_{\text{tuum}} = 10.0$ $\alpha_{\text{drop}} = 1.65$ VAM-percolaat

INTERVAL	$I(X)$	$V(X)$	K-DARCY
X	(-)	(10^{-8} M/SEC)	(10^{-10} M/SEC)
1	64.5	3.25	5.04
2	61.3	3.00	4.89
3	55.1	2.59	4.71
4	48.0	2.17	4.52
5	42.3	1.78	4.20
6	37.6	1.54	4.09
7	33.5	1.31	3.91
8	30.3	1.10	3.62
9	21.7	0.71	3.27
10	15.4	0.47	3.04
11	11.8	0.37	3.14

Een afvoerperiode van 200 dagen

bij $I(X) = 2$	geeft een <i>lekage</i> van	5.7 mm/jaar
" 5	"	18.9 "
" 10	"	47.0 "
" 20	"	116.7 "
" 30	"	198.7 "



HERKOMST: B15/ZANDBENTONIETKLEI 1.3

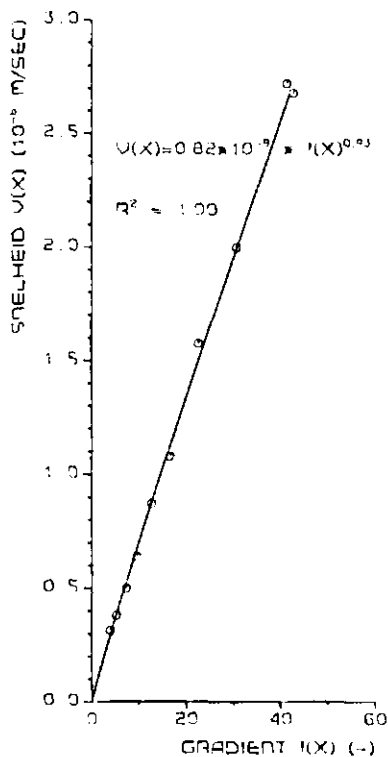
START: 1 FEB 1988 (10 DAGEN)

KENMERK: $\alpha_{\text{tuum}} = 15.0$ $\alpha_{\text{drop}} = 1.67$ VAM-percolaat

INTERVAL	$I(X)$	$V(X)$	K-DARCY
X	(-)	(10^{-8} M/SEC)	(10^{-10} M/SEC)
1	40.2	1.55	3.87
2	36.1	1.42	3.92
3	29.7	1.14	3.85
4	23.6	0.88	3.74
5	18.2	0.65	3.56
6	11.6	0.38	3.30
7	6.9	0.20	2.91

Een afvoerperiode van 200 dagen

bij $I(X) = 2$	geeft een <i>lekage</i> van	8.4 mm/jaar
" 5	"	24.4 "
" 10	"	54.9 "
" 20	"	123.1 "
" 30	"	197.6 "



HERKOMST: B12/BOORGRUIS 4.2

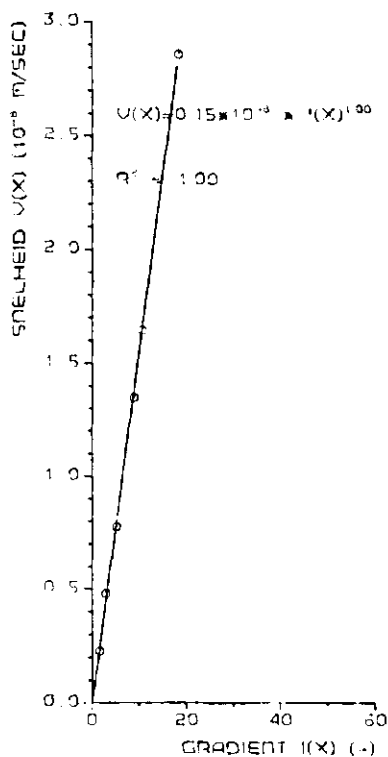
START: 3 MRT 1989 (5 DAGEN)

KENMERK: $VG_{\text{droog}} = 1.31$ $W = 0.36$ leidingwater

INTERVAL	$I(X)$	$V(X)$	K-DARCV
X	(-)	(10^{-8} M/SEC)	(10^{-13} M/SEC)
1	42.8	2.67	6.25
2	41.4	2.72	6.56
3	30.6	2.00	6.52
4	22.5	1.57	6.97
5	16.5	1.08	6.54
6	12.7	0.87	6.84
7	9.5	0.64	6.71
8	7.2	0.50	6.88
9	5.2	0.38	7.28
10	3.9	0.31	8.07

Een afvoerperiode van 200 dagen

of $I(X) = 2$ geeft een lekkage van	27.1 mm/jaar
" " " 5	63.6 "
" " " 10	121.3 "
" " " 20	231.2 "
" " " 30	337.1 "



HERKOMST: B12/BOORGRUIS 5.2

START: 20 MRT 1989 (3 DAGEN)

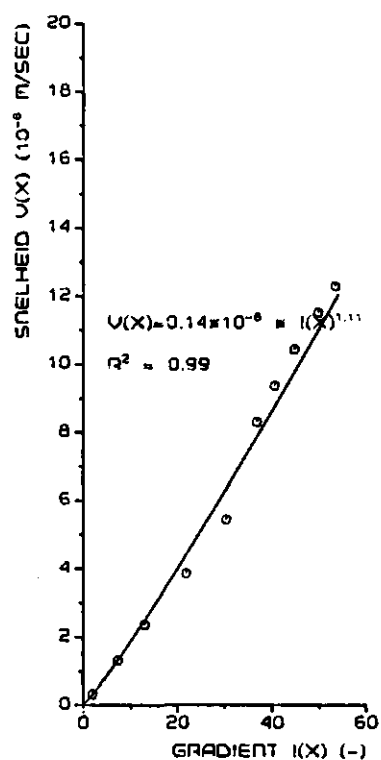
KENMERK: $VG_{\text{droog}} = 1.15$ $W = 0.47$ leidingwater

INTERVAL	$I(X)$	$V(X)$	K-DARCV
X	(-)	(10^{-8} M/SEC)	(10^{-13} M/SEC)
1	18.3	2.85	15.58
2	10.6	1.64	15.52
3	8.8	1.35	15.24
4	5.0	0.77	15.39
5	2.9	0.48	16.61
6	1.5	0.23	14.80

Een afvoerperiode van 200 dagen

of $I(X) = 2$ geeft een lekkage van	53.4 mm/jaar
" " " 5	134.0 "
" " " 10	268.5 "
" " " 20	350.0 "
" " " 30	350.0 "

4-7



HERKOMST: B12/BOORGRUIS 5.3

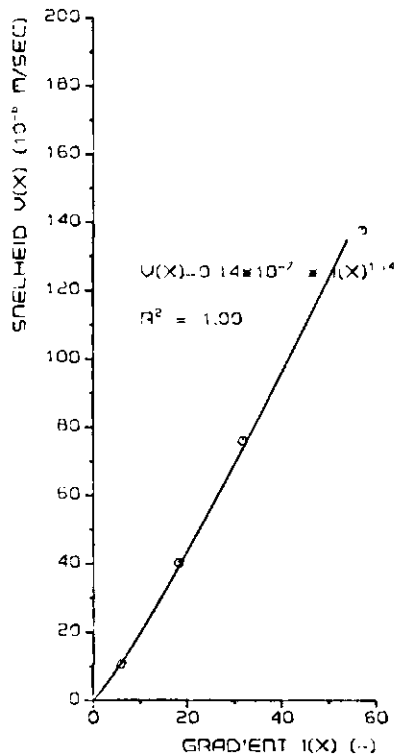
START: 21 JUN 1989 (3 DAGEN)

KENMERK: $VG_{d=200} = 1.15$ $W = 0.47$ leidingwater $T = 25$

INTERVAL X	I(X) (-)	V(X) (10^{-6} m/SEC)	K-DARCY (10^{-10} m/SEC)
1	53.3	12.28	23.03
2	49.7	11.49	23.15
3	44.6	10.42	23.34
4	40.5	9.36	23.12
5	36.8	8.30	22.56
6	30.3	5.43	17.93
7	21.8	3.05	17.63
8	13.0	2.35	18.07
9	7.4	1.31	17.83
10	1.9	0.31	16.40

Een afvoerperiode van 200 dagen

bij $I(X) = 2$	geeft een <i>lekage</i> van	53.3 mm/jaar
" 5 "	"	147.6 "
" 10 "	"	319.1 "
" 20 "	"	350.0 "
" 30 "	"	350.0 "



HERKOMST: 017/ZWARE BEEKKLEI 5.1

START: 15 DEC 1987 (1 DAG)

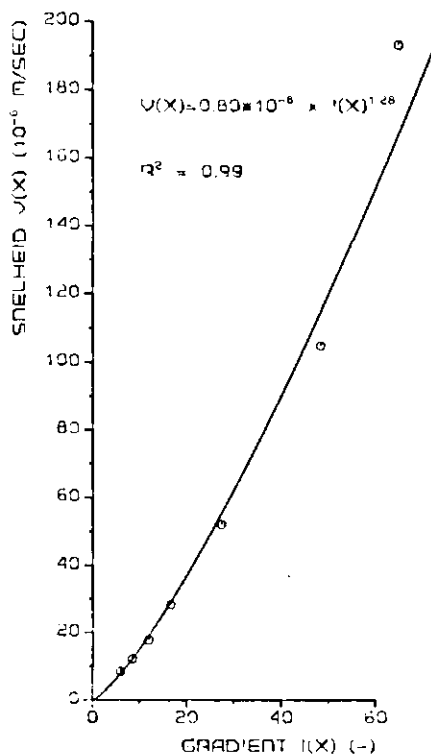
KENMERK: $\alpha_{\text{totaal}} = 33.8$ $UG_{\text{droeg}} = 1.36$ demi-water

INTERVAL X	I(X) (-)	V(X) (10^{-6} M/SEC)	K-DARCY (10^{-10} M/SEC)
1	56.9	132.63	241.84
2	31.7	76.00	239.87
3	18.2	40.27	221.43
4	5.9	10.60	179.13

Een afvoerperiode van 200 dagen

bij $I(X) = 2$ geeft een *lekage* van 350.0 mm/jaar

≈ 5	-	350.0	-
≈ 10	-	350.0	-
≈ 20	-	350.0	-
≈ 30	-	350.0	-



HERKOMST: 017/ZWARE BEEKKLEI 5.3

START: 22 DEC 1987 (1 DAG)

KENMERK: $\alpha_{\text{totaal}} = 33.8$ $UG_{\text{droeg}} = 1.36$ VAM-percolaat

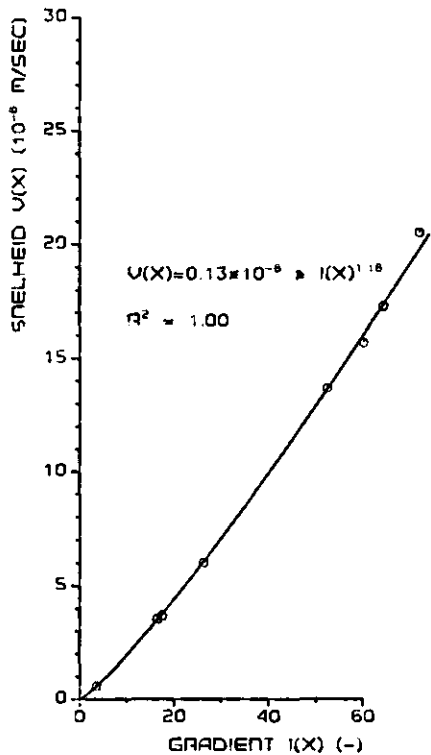
INTERVAL X	I(X) (-)	V(X) (10^{-6} M/SEC)	K-DARCY (10^{-10} M/SEC)
1	64.8	193.04	298.06
2	48.3	104.75	216.87
3	27.3	51.96	190.60
4	16.5	28.13	170.13
5	11.8	17.73	150.20
6	8.3	12.17	145.83
7	5.9	8.38	142.85

Een afvoerperiode van 200 dagen

bij $I(X) = 2$ geeft een *lekage* van 334.7 mm/jaar

≈ 5	-	350.0	-
≈ 10	-	350.0	-
≈ 20	-	350.0	-
≈ 30	-	350.0	-

4-9



HERKOMST: W22/ZWABE ZEEKLEI 4.1

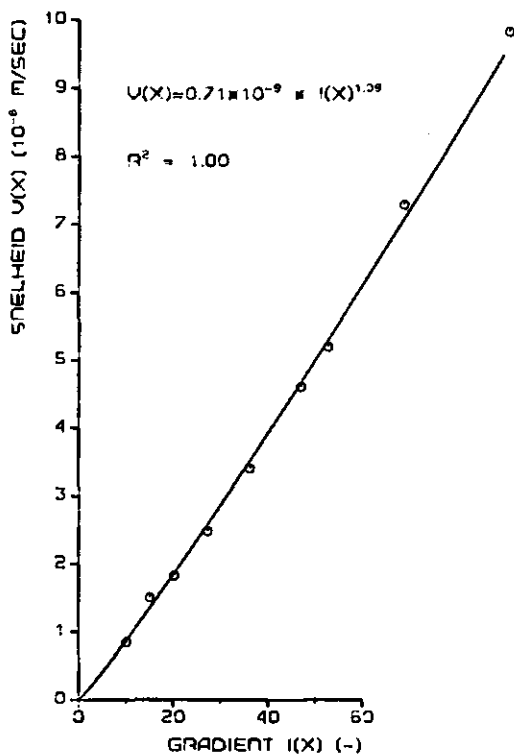
START: 23 DEC 1987 (4 DAGEN)

KENMERK: lutum=37.4 $VG_{droog}=1.69$ demi-water

INTERVAL X	I(X) (-)	U(X) (10^{-6} M/SEC)	K-DARCY (10^{-10} M/SEC)
1	71.9	20.51	28.55
2	64.3	17.26	26.85
3	60.1	15.65	26.06
4	52.4	13.66	26.08
5	26.3	5.99	22.78
6	17.5	3.66	20.86
7	16.5	3.53	21.38
8	3.5	0.56	16.19

Een afvoerperiode van 200 dagen

bij I(X) = 2	geeft een lekkage van	50.1 mm/jaar
" 5	"	147.7 "
" 10	"	334.3 "
" 20	"	350.0 "
" 30	"	350.0 "



HERKOMST: W22/ZWABE ZEEKLEI 4.3

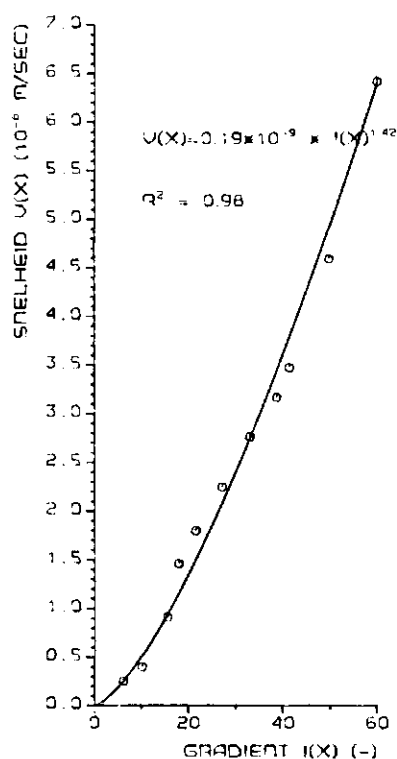
START: 11 JAN 1988 (5 DAGEN)

KENMERK: lutum=37.4 $VG_{droog}=1.69$ VAM-percolaat

INTERVAL X	I(X) (-)	U(X) (10^{-6} M/SEC)	K-DARCY (10^{-10} M/SEC)
1	91.1	9.82	10.77
2	68.8	7.29	10.59
3	52.7	5.19	9.85
4	47.0	4.60	9.80
5	36.2	3.40	9.40
6	27.2	2.48	9.09
7	20.1	1.82	9.05
8	15.0	1.50	9.97
9	10.1	0.85	8.40

Een afvoerperiode van 200 dagen

bij I(X) = 2	geeft een lekkage van	26.0 mm/jaar
" 5	"	70.4 "
" 10	"	149.8 "
" 20	"	310.4 "
" 30	"	350.0 "



HERKOMST: 011/LICHTE ZEEKEI 2.1

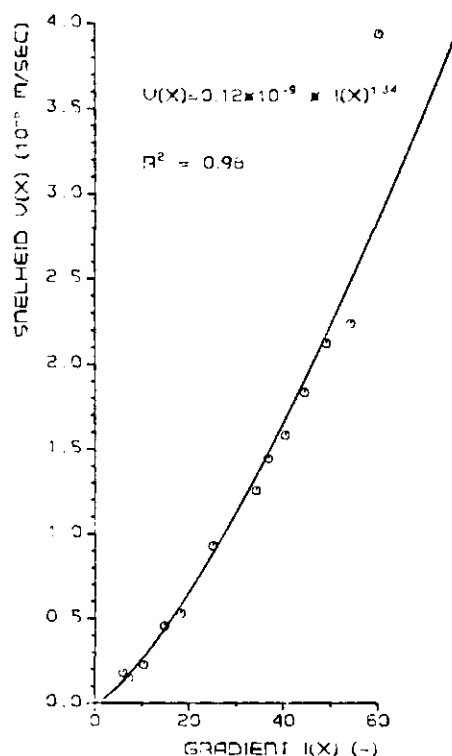
START: 23 NOV 1987 (10 DAGEN)

KENMERK: lutum₁=27.8 VG_{droog}=1.52 demi-water

INTERVAL	I(X)	U(X)	K-DARCY
X	(-)	(10 ⁻⁶ M/SEC)	(10 ⁻¹⁰ M/SEC)
1	59.9	6.41	10.71
2	49.7	4.59	9.22
3	41.4	3.47	8.39
4	38.7	3.16	8.18
5	32.9	2.76	8.37
6	27.1	2.24	8.27
7	21.5	1.80	8.35
8	17.9	1.46	8.17
9	15.5	0.91	5.87
10	10.1	0.40	3.95
11	6.1	0.26	4.17

Een afvoerperiode van 200 dagen

bij I(X) = 2 geeft een <i>lekkage</i> van	8.9 mm/jaar
~ 5	32.7
~ 10	87.3
~ 20	233.3
~ 30	350.0



HERKOMST: 011/LICHTE ZEEKEI 2.3

START: 9 FEB 1988 (17 DAGEN)

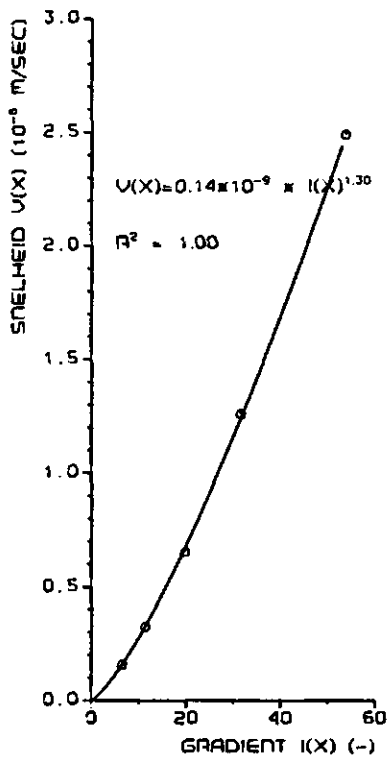
KENMERK: lutum₁=27.8 VG_{droog}=1.52 VAM-percolaat

INTERVAL	I(X)	U(X)	K-DARCY
X	(-)	(10 ⁻⁶ M/SEC)	(10 ⁻¹⁰ M/SEC)
1	60.2	3.94	6.54
2	54.2	2.24	4.12
3	49.0	2.12	4.32
4	44.5	1.83	4.12
5	40.4	1.58	3.91
6	36.7	1.44	3.92
7	34.1	1.25	3.67
8	25.0	0.93	3.70
9	18.2	0.53	2.90
10	14.7	0.45	3.08
11	10.4	0.23	2.17
12	7.2	0.15	2.02
13	6.0	0.18	2.99

Een afvoerperiode van 200 dagen

bij I(X) = 2 geeft een <i>lekkage</i> van	5.2 mm/jaar
~ 5	17.7
~ 10	44.8
~ 20	113.1
~ 30	194.4

4-11



HERKOMST: W21/LICHTE ZEEKLEI 1.2

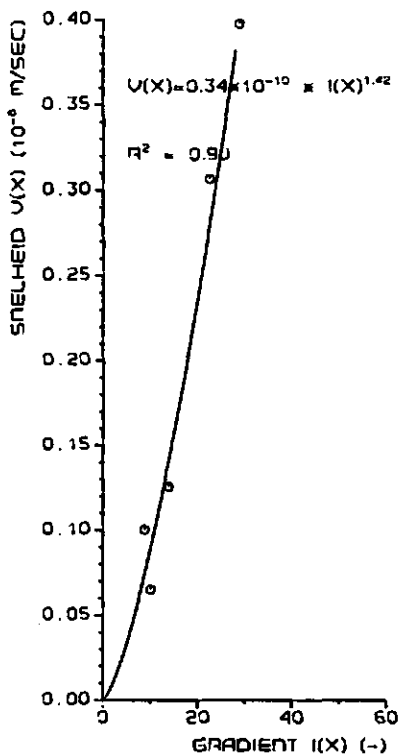
START: 30 DEC 1987 (9 DAGEN)

KENMERK: lutums=31.5 $VG_{drop}=1.59$ demi-water

INTERVAL X	I(X) (-)	V(X) (10^{-8} M/SEC)	K-DARCY (10^{-10} M/SEC)
1	53.7	2.49	4.63
2	31.5	1.26	3.99
3	19.7	0.65	3.30
4	11.3	0.32	2.87
5	6.4	0.16	2.44

Een afvoerperiode van 200 dagen

bij $I(X) = 2$	geeft een <i>lekage</i> van	5.9 mm/jaar
" 5	"	19.4 "
" 10	"	47.8 "
" 20	"	118.1 "
" 30	"	200.4 "



HERKOMST: W21/LICHTE ZEEKLEI 1.6

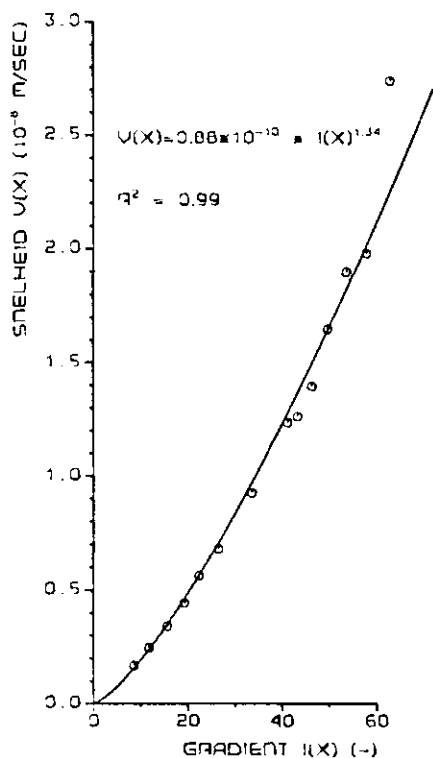
START: 11 FEB 1988 (15 DAGEN)

KENMERK: lutums=31.5 $VG_{drop}=1.59$ VAM-percolaat

INTERVAL X	I(X) (-)	V(X) (10^{-8} M/SEC)	K-DARCY (10^{-10} M/SEC)
1	28.7	0.40	1.38
2	22.4	0.31	1.37
3	13.7	0.13	0.91
4	10.1	0.07	0.65
5	8.7	0.10	1.16

Een afvoerperiode van 200 dagen

bij $I(X) = 2$	geeft een <i>lekage</i> van	1.6 mm/jaar
" 5	"	5.7 "
" 10	"	15.3 "
" 20	"	41.0 "
" 30	"	72.8 "



HERKOMST. TEGELSE KLEI 4.2

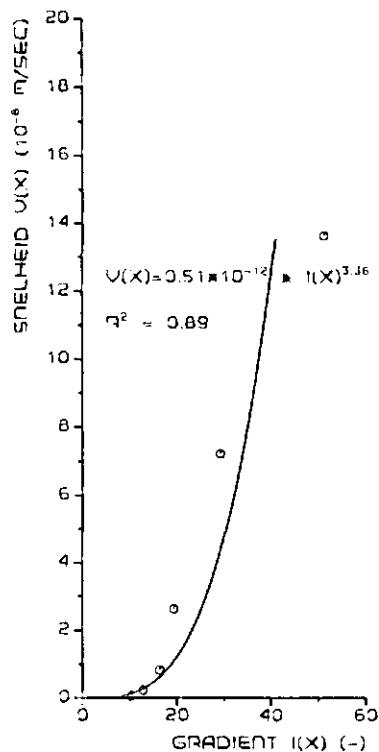
START: 24 NOV 1987 (21 DAGEN)

KENMERK: lutum=51.5 $VG_{droog}=1.89$ demi-water

INTERVAL X	I(X) (-)	V(X) (10^{-8} M/SEC)	K-DARCY (10^{-10} M/SEC)
1	62.8	2.74	4.36
2	57.7	1.98	3.42
3	53.5	1.90	3.54
4	49.6	1.65	3.32
5	46.3	1.39	3.01
6	43.3	1.26	2.92
7	41.1	1.23	3.00
8	33.5	0.92	2.76
9	26.4	0.68	2.57
10	22.3	0.56	2.52
11	19.3	0.44	2.30
12	15.6	0.34	2.18
13	11.7	0.25	2.10
14	8.5	0.17	1.96

Een afvoerperiode van 200 dagen

bij $I(X) = 2$	geeft een <i>lekage</i> van	3.8 mm/jaar
" 5	"	13.1 "
" 10	"	33.2 "
" 20	"	83.9 "
" 30	"	144.5 "



HERKOMST. TEGELSE KLEI 4.3

START: 9 FEB 1987 (10 DAGEN)

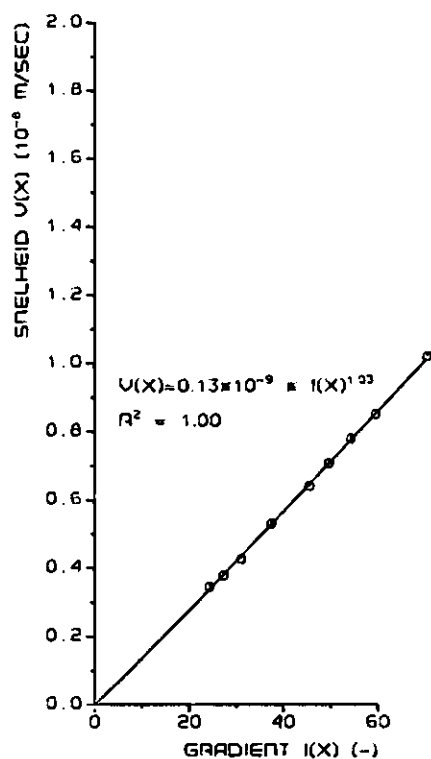
KENMERK: lutum=51.5 $VG_{droog}=1.89$ VAM-percolaat

INTERVAL X	I(X) (-)	V(X) (10^{-8} M/SEC)	K-DARCY (10^{-10} M/SEC)
1	51.1	13.63	26.66
2	29.2	7.21	24.71
3	19.3	2.62	13.55
4	16.3	0.82	5.03
5	12.8	0.23	1.78
6	10.5	0.06	0.59

Een afvoerperiode van 200 dagen

bij $I(X) = 2$	geeft een <i>lekage</i> van	0.1 mm/jaar
" 5	"	2.0 "
" 10	"	20.3 "
" 20	"	209.1 "
" 30	"	350.0 "

4-13



HERKOMST: REUVER KLEI 3.1

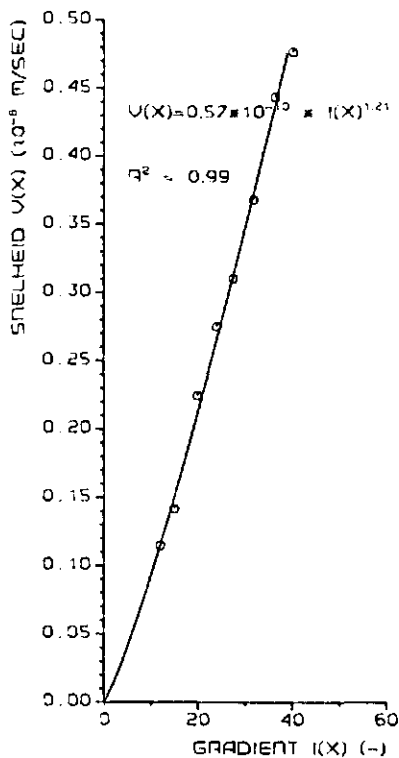
START: 12 FEB 1988 (14 DAGEN)

KENMERK: lutums=37.8 $VG_{droog}=1.48$ demi-water

INTERVAL	I(X)	V(X)	K-DARCY
X	(-)	(10^{-6} m/SEC)	(10^{-10} m/SEC)
1	70.4	1.02	1.45
2	59.5	0.85	1.43
3	54.2	0.78	1.44
4	49.5	0.71	1.43
5	45.5	0.64	1.41
6	37.4	0.53	1.42
7	31.0	0.43	1.37
8	27.2	0.38	1.38
9	24.2	0.34	1.42

Een afvoerperiode van 200 dagen

bij I(X) = 2	geeft een <i>lekkage</i> van	4.4	mm/jaar
~ 5		11.4	"
~ 10		23.3	"
~ 20		47.6	"
~ 30		72.6	"



HERKOMST: n29/ZWARE ZEEKLEI 3.3

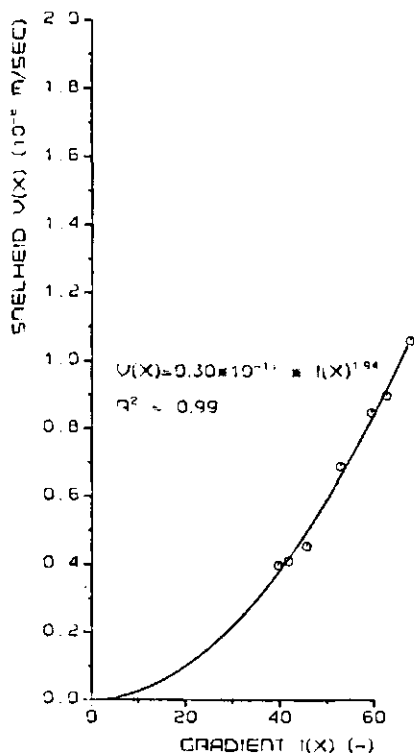
START: 5 JAN 1988 (23 DAGEN)

KENMERK: lutums=37.2 $V_{G_{drop}}=1.45$ demi-wafer

INTERVAL X	I(X) (-)	V(X) (10^{-8} M/SEC)	K-DARCY (10^{-10} M/SEC)
1	40.2	0.48	1.18
2	36.4	0.44	1.22
3	31.8	0.37	1.16
4	27.5	0.31	1.13
5	24.1	0.28	1.14
6	19.9	0.22	1.13
7	15.0	0.14	0.94
8	12.0	0.11	0.95

Een afvoerperiode van 200 dagen

bij $I(X) = 2$	geeft een <i>lekage</i> van	2.3 mm/jaar
" 5	"	6.9 "
" 10	"	15.9 "
" 20	"	36.7 "
" 30	"	59.9 "



HERKOMST: n29/ZWARE ZEEKLEI 3.5

START: 17 FEB 1988 (9 DAGEN)

KENMERK: lutums=37.2 $V_{G_{drop}}=1.45$ VAM-percolaat

INTERVAL X	I(X) (-)	V(X) (10^{-8} M/SEC)	K-DARCY (10^{-10} M/SEC)
1	67.6	1.06	1.57
2	62.5	0.90	1.44
3	59.3	0.85	1.43
4	52.8	0.69	1.30
5	45.6	0.45	1.00
6	41.7	0.41	0.98
7	39.5	0.40	1.01

Een afvoerperiode van 200 dagen

bij $I(X) = 2$	geeft een <i>lekage</i> van	0.2 mm/jaar
" 5	"	1.2 "
" 10	"	4.5 "
" 20	"	17.3 "
" 30	"	38.0 "