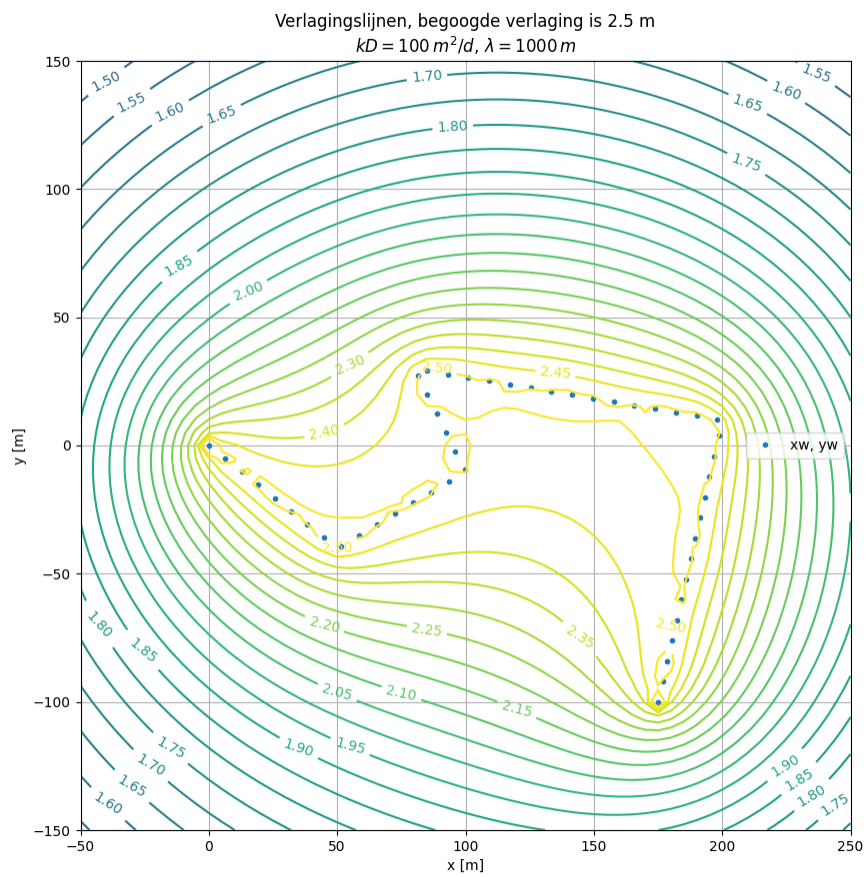


Voortoets ANB

Methodologische concepten inzake het thema grondwater

T.N. Olsthoorn

3 april 2025



Inhoudsopgave

I	Methodologische concepten onder de analytische berekeningen	4
1	Inleiding	4
2	Beschrijving van de effecten	4
II	Berekening van de wijziging van de grondwaterstand per type bron (primaire effect)	6
3	Puntbronnen	6
3.1	Vaste of variabele dikte van het freatische pakket	6
3.2	Formule van Verruijt: Dupuit + Neerslagoverschot	6
3.3	Schema van Blom: Verruijt + De Glee	7
3.4	Harde en zachte gebiedsovergang	9
3.4.1	Stationair versus niet-stationair	10
3.5	Oppervlaktebron- bouwput	11
4	Lijnbron, peilbeheer door middel van een „gracht” of sleuf	14
4.1	Lijnbron: Drainage d.m.v. een stelsel parallelle drains of een permanente gracht of stelsel van grachten	16
5	Lijnbronnen als puttenreeksen met uniforme verlaging	18
5.1	Stationair	19
5.2	Niet-stationair	19
6	Speciale oppervlaktebron: ont- of bebossing	21
7	Speciale oppervlaktebron: aanbrengen van verhardingen	21
8	Relatie oppervlaktewater en grondwater	23
III	Afleidingen en illustratie van de verschillende analytische formules	24
9	Intro, verantwoording	24
10	Formule van Verruijt versus die van Dupuit en de formule van Blom	25
10.1	Het idee achter de formules	25
10.1.1	Variabele pakketdikte h	25
10.1.2	Constante pakketdikte D	26
10.2	Blom axiaal-symmetrisch	27
10.2.1	Verlaging voor $r \leq R$, de grens tussen binnen- en buitengebied	27
10.2.2	Verlaging voor $r \geq R$ (De Glee (1930), zie [Verruijt (1982)], p21)	27
10.3	Koppeling van buiten- en binnengebied	28
11	De drainageweerstand (lekweerstand)	30
11.1	Afleiding van de drainageweerstand in een verticaal anisotroop pakket: $k_x \neq k_z$	30
11.2	Verwerking van verticale anisotropie in de drainageweerstand	31
12	Verlaging door puntonttrekking tijdsafhankelijk	33

13 Lineaire elementen, sleufbemaling of peilregulatie met sloten en grachten	35
13.1 Beperkte lengte van de sleuf	37
14 Bouwput tijdsafhankelijk, maar met vaste verlaging op de bouwputrand	37
15 Bruggeman's oplossing 370_01: Bron in semi-gespannen laag met sprong in de eigenschappen	38
References	39

Deel I

Methodologische concepten onder de analytische berekeningen

1 Inleiding

De Voortoets is een online instrument voor om vroegtijdig aanvragen voor een vergunning voor activiteiten die ingrijpen in het (grond)watersysteem te scheiden in zulke die wel en die geen wezenlijke invloed op gebieden met bijzondere beschermingsstatus hebben in het kader van Natura 2000, de zogenoemde speciale beschermingszones (SBZ's). De Voortoets kijkt hierbij uitsluitend naar beïnvloeding via verandering van de omstandigheden van het grondwater, en richt zich op de verandering, meestal de verlaging van grondwaterstanden in gebieden met bijzondere beschermingsstatus.

De online Voortoets past binnen de taak van de vergunningverlener om vooraf te beoordelen in hoeverre menselijke activiteiten met invloed op het grondwater de natuurlijke toestand of ontwikkeling binnen en rond Natura2000 gebieden verstoren.

Bronders et al. geven de inhoudelijke onderbouwing van de huidige Voortoets [Bronders et al. (2013)]. In het voorliggende rapport wordt deze onderbouwing en de daarin beschreven berekeningswijze tegen het licht gehouden, met het doel het fundament onder de Voortoets te verstevigen, zonder deze wezenlijke ingewikkelder te maken. Dit laatste impliceert ook dat in dit rapport geen gebruik wordt gemaakt van numerieke grondwatermodellen.

Met grondwater wordt het water bedoeld in de verzadigde zone, waarbinnen ingrepen een ruimtelijke uitstraling op de omgeving kunnen hebben. Bij ingrepen in de onverzadigde zone is er niet of nauwelijks sprake van ruimtelijke uitstraling.

Uitgangspunt is dat wijziging van de grondwaterstand en grondwaterstroming de belangrijkste oorzaak is van de gevolgen die ingrepen in het watersysteem kunnen hebben op de ecologie van Natura2000-gebieden. Achteruitgang van de ecologische toestand van natuurgebieden, zoals door eutrofiëring, verzuring, verzoeting, verzilting of verontreiniging zijn hier in de regel een secundair gevolg van. De aandacht in de Voortoets gaat daarom uit naar de wijziging van de grondwatersituatie als onderliggende (potentiële) oorzaak van de natuurlijke toestand van Natura2000 gebieden.

Bepaalde menselijke activiteiten grijpen niet direct in op het grondwatersysteem, maar beïnvloeden dat uiteindelijk toch een wijziging van de voeding van het grondwater, dat daar dan het gevolg van is. Voorbeelden zijn ontbossing of bebossing en verharding.

De ecologische toestand van de natuur kan ook achteruit gaan door directe of indirecte verontreiniging zoals via depositie of via infiltrerend oppervlaktewater. Indirecte beïnvloeding door menselijk handelen of door verontreiniging worden in de Voortoets niet meegenomen, omdat de effecten hiervan steeds een dieper gaande studie vereisen.

Een essentieel uitgangspunt van de Voortoets is om de de analyse te beperken tot freatisch grondwater (grondwater met een vrije waterspiegel). Deze keuze is gemaakt omdat de Voortoets is bedoeld voor het screenen van de meer eenvoudige ingrepen, die praktisch altijd betrekking hebben op of plaatsvinden in het freatische grondwater. Echter binnen de SBZ worden semi-gespannen grondwaterlagen, bij wijze van meest ongunstige situatie, wel meegenomen in de analyse.

Voor de beoordeling binnen de Voortoets zijn uiteraard de locatie, aard en duur en omvang van de ingreep van belang. Voor de screening zijn ook de opbouw van de ondergrond en de hydraulische eigenschappen van de relevante grondwatervoerende lagen essentieel, zoals de doorlatendheden, de laagdiktes, en bergingscoëfficiënten. Op basis van de coördinaten van de ingreep en de BSZ, worden deze binnen de Voortoets automatisch geselecteerd uit een ruimtelijke database.

2 Beschrijving van de effecten

De volgende ingrepen worden in de Voortoets onderscheiden ([Bronders et al. (2013)]):

- Bemalen van bouwputten.
- De wisselwerking tussen oppervlaktewater en grondwater (bijv. vermindering beekafvoeren door ont-trekking)
- Wijzigen van de topografie (bijv. afgraven).
- Onttrekken van grondwater (puntbronnen, putten).
- Veranderen van van het drainagesysteem (aanleg en demping van watergangen, drainage).
- Verharden van oppervlakken (minder grondwateraanvulling).
- Ont- en bebossen (minder of meer grondwateraanvulling)

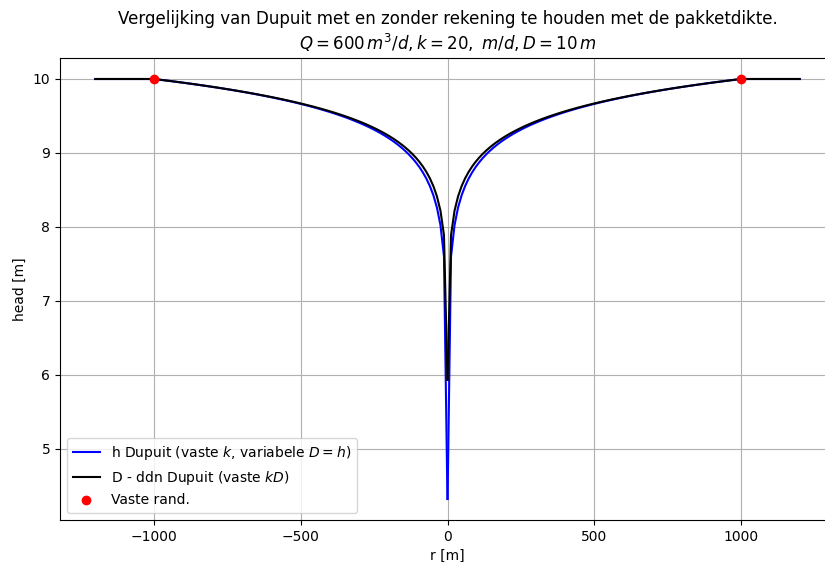
Deel II

Berekening van de wijziging van de grondwaterstand per type bron (primaire effect)

3 Puntbronnen

3.1 Vaste of variabele dikte van het freatische pakket

Er is grondwatertechnisch gezien geen verschil tussen de wijziging van de grondwaterstand door een puntbron of door een bemaling; voor afstanden buiten de bouwput speelt alleen de omvang van de onttrekking een rol. Evenmin speelt de vraag een rol of er in de berekening van de verlaging wel of niet rekening wordt gehouden met de afname van de verzadigde pakketdikte als gevolg van de verlaging van de grondwaterstand. Wanneer de afname van de pakketdikte minder is dan ca. 20% is het verschil te verwaarlozen. Dit is dus altijd het geval ter plaatse van de 5 cm verlagingcontour, waarop de beoordeling van de reikwijdte stoelt. Figuur 1 geeft de verlaging volgens Thiem-Dupuit bij onttrekking aan 10 m dik pakket met vaste rand om $R = 1000$ m. De zwarte lijn is berekend met vaste dikte $D = 10$ m en de blauwe lijn is berekend met inachtneming van de dikte die zelf afneemt door de verlaging. Het verschil heeft alleen relevantie in de buurt van de onttrekking en is derhalve irrelevant in de Voortoets, waar het in wezen gaat om de 5 cm verlagingcontour.

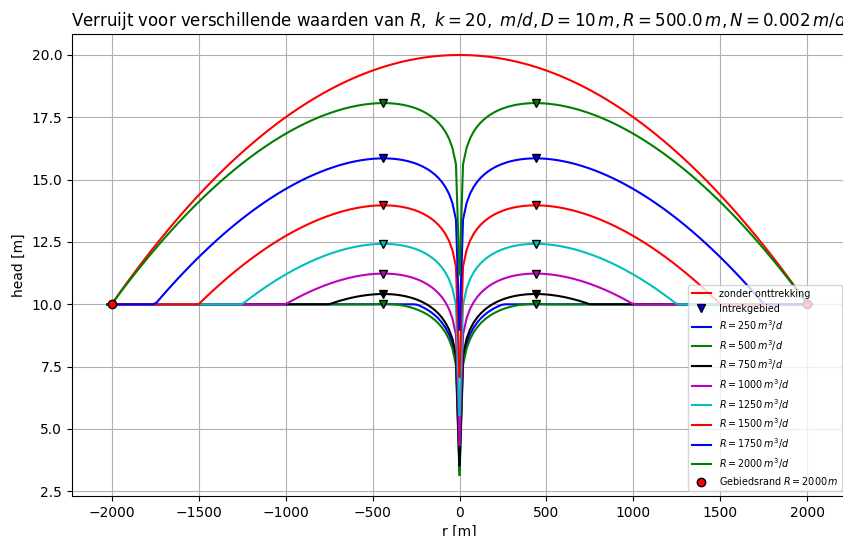


Figuur 1: Verlaging door een bron volgens Thiem-Dupuit, met en zonder variabele pakketdikte

3.2 Formule van Verruijt: Dupuit + Neerslagoverschot

In de Voortoets wordt de verlaging door een of meer puntbronnen berekend middels de Theim-Dupuit oplossing met neerslag. Deze oplossing staat ook bekend als de oplossing van Verruijt en wordt genoemd in de Leidraad Grondwatermodellering van [Natuur en Bos (2021)]. De formule is gemakkelijk af te leiden. Het idee daarachter is dat de grondwaterstand niet verandert in een cirkelvormig gebied met straal R , en dat daarbinnen het grondwater alleen stroomt als gevolg van de onttrekking in het centrum en een uniform neerslagoverschot (voeding). Bij voldoende grote gebiedsradius R , is de totale neerslag op het gebied groter dan de onttrekking. Er ontstaat dan een intrekgebied van de bron binnen de gebiedsradius, waarbinnen a het

neerslagoverschot in de richting van de bron stroomt, en waarbuiten al het neerslagoverschot in de richting van de gebiedsrand stroomt.



Figuur 2: Verloop van de grondwaterstand volgens Verruijt (Dupuit + Neerslagoverschot)

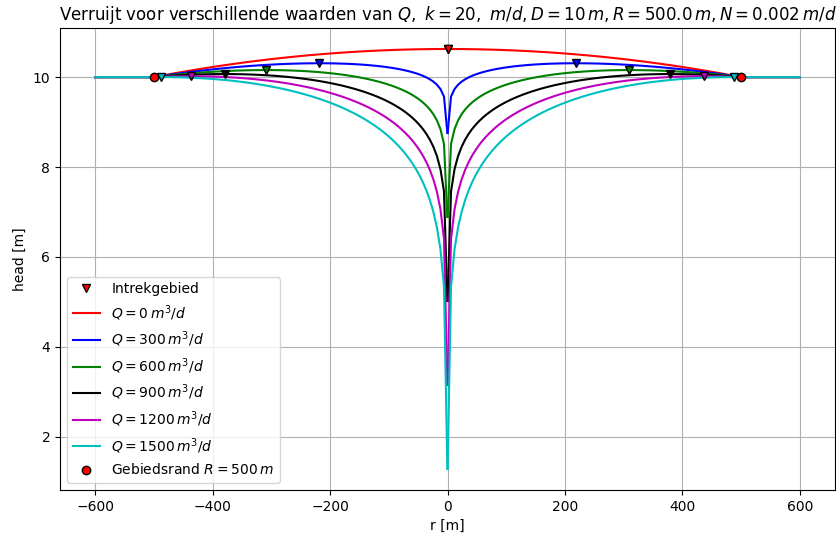
Figuur 2 laat zien wat de formule van Verruijt uitrekent bij toename van de gebiedsradius R . Bij voldoende grote R is er altijd een intrekgebied binnen het gebied dat in de figuur is aangegeven op de punt waar het grondwaterverloop horizontaal is (waterscheiding). Dit interne intrekgebied is altijd hetzelfde, want voldoet aan de waterbalans $\pi r^2 = Q$. Dit intrek gebied heeft dus niets te maken met de gebiedsradius en evenmin met de verlaging die de onttrekking veroorzaakt. De verlaging is het verschil tussen de rode lijn die de situatie aangeeft zonder onttrekking en de groene daaronder, die het grondwaterverloop aangeeft bij dezelfde gebiedsradius. De verlaging is het verschil tussen de rode en een groen lijn en geldt voor de betreffende gebiedsradius. Voor elke andere radius kan zo de verlaging worden gevisualiseerd. De verlaging in de formule van Verruijt loopt altijd door tot aan de vaste rand van het gebied. Verbindt men de markers met de waterscheiding met elkaar dan is de ruimte eronder het intrekgebied van de bron. Deze is alleen relevant als men wel weten of verontreiniging naar de bron stroomt of naar de gebiedsrand.

Figuur 3 geeft het grondwaterverloop voor vaste gebiedsradius en verschillende groottes van de onttrekking Q . We zien hier dat het intrek gebied pas ontstaat wanneer de onttrekking minder is dan het totale neerslagoverschot op het cirkelvormige gebied. Daarbij neemt de grondwaterstand toe maar wordt de intrekkegel kleiner. De verlaging reikt altijd tot aan de gebiedsrand en is het verschil tussen de lijn met onttrekking en de rode boog zonder onttrekking.

Het is echter een vergissing om deze intrekgrans te beschouwen als grens invloedsgrans van de ingreep. De laatste is en blijft de gebiedsradius zelf want deze is onafhankelijk van de hoeveelheid neerslag en de grootte van de onttrekking. Als het erom gaat om de invloed van de onttrekking op de grondwaterstand te berekenen, dan speelt het neerslagoverschot geen enkele rol, omdat de neerslag niet wordt beïnvloed door de onttrekking zelf; omdat er tussen de onttrekking en de neerslag geen terugkoppeling bestaat.

3.3 Schema van Blom: Verruijt + De Glee

Er zijn echter uitzonderingen op deze regel, waarin de formule van Verruijt wel een zinvol uitgangspunt is, of, liever dan Verruijt zelf, het idee achter het schema van Blom [Blom (1973)]. Blom behandelde verlaging



Figuur 3: Verruijt bij vaste gebiedsradius en verschillende groottes van de onttrekking

in gebieden met vrije afwatering, maar het schema kan ook als volgt worden samengevat. In een vlak gebied met veel drainagemiddelen, zoals sloten, grachten en of drains, voeren deze drainagemiddelen gemiddeld het totale neerslagoverschot lokaal af. Wordt in zo'n gebied een onttrekking geplaatst, dan veroorzaakt zijn verlaging een afname van de afvoer naar de drainagemiddelen. Deze afname komt dus ten goede aan het grondwater, want er is in deze situatie wel een terugkoppeling tussen de verlaging van de grondwaterstand en de voeding van het grondwater. Aan deze extra voeding door vermindering van de drainage zit echter een maximum, namelijk het neerslagoverschot zelf. Is de verlaging groter dan het punt waarop de afvoer gelijk aan nul wordt, dan blijft de extra voeding van het grondwater gelijk aan dit maximum, dat gelijk is aan het neerslagoverschot. Dit is precies wat de formule van Verruijt en vooral het schema van Blom zegt.

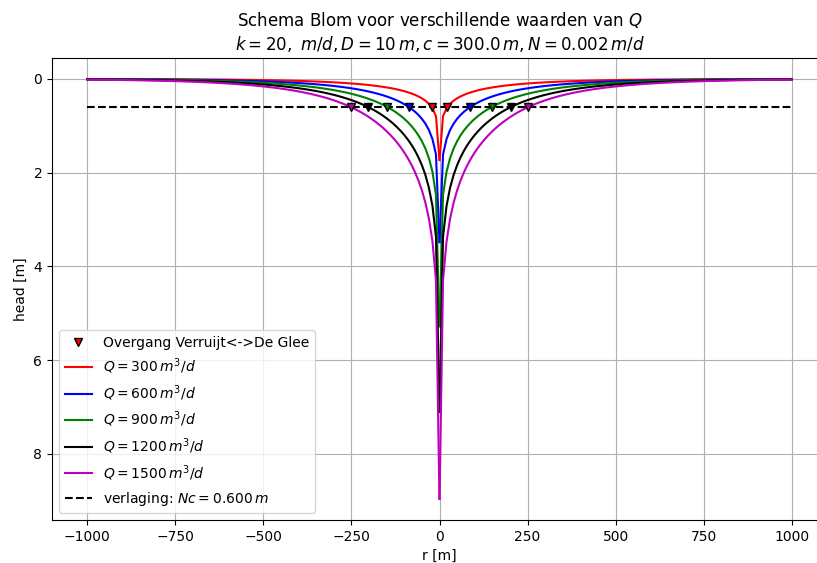
Echter buiten deze zone waarbinnen de drainage stopt door de onttrekking, is de verlaging minder dan tot het punt waarop de afvoer geheel wegvalt. De extra voeding is dan slechts een deel van het neerslagoverschot en is evenredig met de verlaging zelf. Het grondwater en de verlaging van de grondwaterstand in deze zone gedragen zich als in een semi-gespannen pakket, waarin de voeding eveneens evenredig is aan de verlaging. In deze zone is derhalve de formule van De Glee van toepassing, die geldt voor de stationaire verlaging door onttrekking aan een semi-gespannen watervoerend pakket [De Glee (1930)]. In plaats van de weerstand van een afdekkende laag, waarvan De Glee uitging, hebben we nu de drainageweerstand. Dit is een vervangende weerstand die in de plaats komt van een dicht netwerk aan drainagemiddelen. Hierbij is „dicht” te verstaan op de subregionale schaal, een schaal waarop de individuele sloten en drains niet meer individueel zichtbaar zijn of een rol spelen. De drainageweerstand is dan per definitie de gemiddelde grondwaterstand boven het drainageniveau (bijv. het polderpeil) gedeeld door het neerslagoverschot. Deze is te berekenen maar ook goed in het veld te bepalen aan de hand van grondwaterstanden, sloot- en drainagepeilen en het neerslagoverschot.

Deze twee zones bij elkaar, dus Verruijt voor het binnengebied en De Glee daarbuiten, is het schema van Blom. De vraag hierbij is waar de grens tussen beide zones ligt. Deze grens wordt bepaald door de afstand van de bron waarop de verlaging gelijk is aan Nc , de voeding N maal de drainageweerstand c . De voeding kan hierbij worden opgevat als het neerslagoverschot, maar kan eventueel worden vermeerderd met de gebiedskwel, wanneer deze een rol speelt. De essentie van het schema van Blom is dus, dat de voeding toeneemt door de onttrekking tot een maximum dat bereikt wordt op het punt waar de afvoer naar de drainagemiddelen stopt.

Omdat van tevoren bekend is bij welke verlaging dit punt ligt, kan deze grens ook direct worden berekend en kan een continue verlagingsslijn worden getekend tussen de bron en oneindig, de afstand waarop volgens De Glee de verlaging theoretisch nul blijft. De zo gecombineerde formules van Verruijt en De Glee (samen Blom)

zijn toepasbaar waar het zinvol is om met een drainageweerstand te werken in plaats van met afzonderlijke rivieren, beken, kanalen, grachten, sloten en drains. Dit is het geval in natte (lage) intensief gedraineerde gebieden met gemiddeld ondiepe grondwaterstanden, zoals polders. Waar dit niet het geval is, mag geen rekening worden gehouden met een toename van de voeding door de onttrekking en reikt de verlaging tot aan de „vaste” rand van het beschouwde gebied, ongeacht hoe ver die van de bron ligt.

Figuur 4 illustreert de verlaging volgens Blom. Waar de verlaging kleiner is dan Nc (streepjeslijn) geldt de verlaging volgens De Glee met drainageweerstand c en waar de verlaging groter is dan Nc geldt de formule van Verruijt. Bij Blom ontstaat nooit een waterscheiding binnen en bepaalde gebiedsgrootte. De reden is dat het neerslagoverschot buiten de gebiedsovergang geheel of gedeeltelijk door sloten wordt afgevoerd waardoor er geen verhoging van de grondwaterstand kan ontstaan. De verlaging reikt nu, net als bij De Glee voor een semi-ge-spannen pakket theoretisch tot aan $r \rightarrow \infty$. Het begrip gebiedsgrootte is nu niet meer relevant.



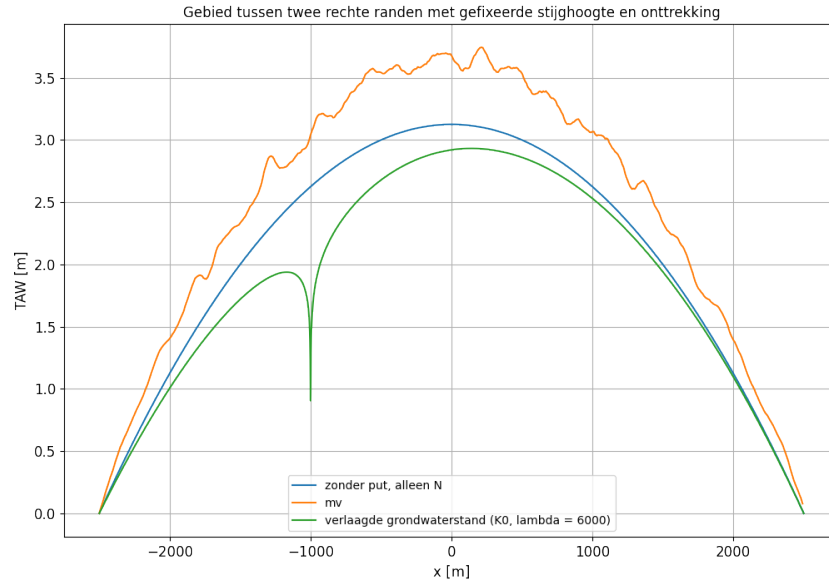
Figuur 4: Verlaging volgens Blom (De Glee in het buitengebied en Verruijt in het binnengebied)

3.4 Harde en zachte gebiedsovergang

Frequent treft men overgangsgebieden aan, waarin een hoog gebied met diepe grondwaterstanden en met nauwelijks drainerende wateren overgaat in een laag gebied met ondiepe grondwaterstanden met veel drainagemiddelen. Vaak bevindt zich op de overgang tussen deze gebieden een stevige watergang of kanaal om het peil te beheren en de kwel uit het hoge gebied af te vangen. Een onttrekking in een dergelijk gebied veroorzaakt verlagingen top op de gebiedsgrens aan beide zijden, zoals weergegeven in figuur 5.

Waar er geen diepe watergang het hoge gebied scheidt van het lage, hebben we te maken met een zachte overgang van hoog naar laag. Deze lage gebieden worden doorgaans gekenmerkt door veel kwel omdat een groot deel van het grondwater uit het hoge gebied over een beperkte afstand achter de gebiedsovergang via kwel uitstroomt. Dit natte, lage en goed gedraineerde gebied kan evenals het voorgaande voorbeeld worden gezien als een gebied met drainageweerstand. Grondwatertechnisch betekent dit, dat het hoge gebied zonder drainage op „zachte wijze”, overgaat in een gebied met drainage waardoor deze rand in de berekening niet als harde rand met vaste stijghoogte mag worden beschouwd. Dit impliceert ook dat de invloed van een onttrekking in het hoge gebied doorwerkt tot in het lage gebied, dat dikwijls samenvalt met het natte natuurgebied, dat een SBZ status kan hebben.

Figuur 6 illustreert het verschil tussen de gebieden. De groene lijn is de grondwaterstand bij harde



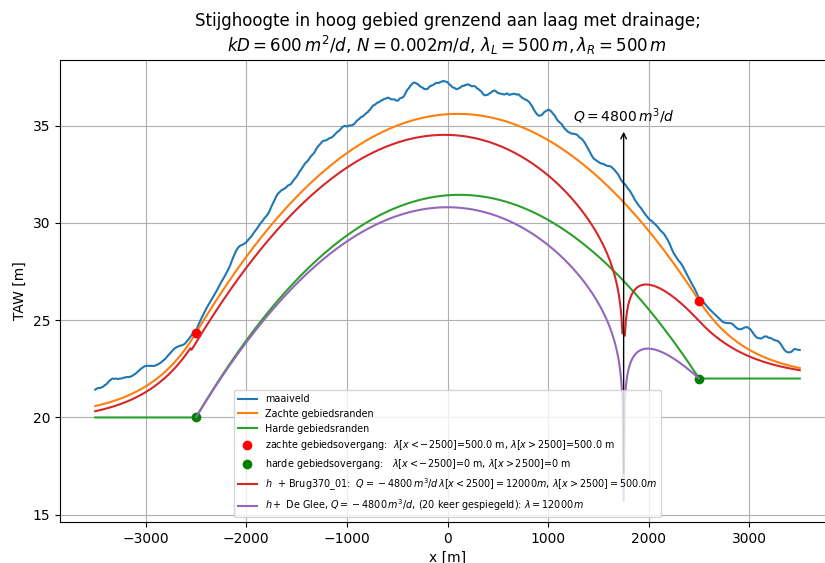
Figuur 5: Bron in een gebied tussen twee evenwijdige vaste randen. De verlaging reikt tot aan de deze vaste (harde) randen

overgang (op plek van de groene markers) van het gebied tussen twee sloten naar dat erbuiten, waar de verlaging dus nul is. De oranje lijn geeft het verloop van de grondwaterstand wanneer het middengebied zonder vaste randen (op plek van de rode markers) overgaat in een buitengebied met veel drainerende waterlopen die gezamenlijk vlakdekkend als drainageweerstand kunnen worden geschematiseerd. Doordat het neerslagoverschot uit het middengebied nu via de drainageweerstand in de buitengebieden moet worden afgevoerd, gaat daar de grondwaterstand daar flink omhoog. In de figuur gaat de groene punt over in de rode. In het buitengebied neemt de stijghoogte vervolgens exponentieel af tot de drainagebasis (in figuur 6: links +20m, rechts +22 m). Echter ook een onttrekking in het middengebied veroorzaakt bij zachte gebiedsovergang een verlaging die doorwerkt in het buitengebied. Dit is wat de rode lijn aangeeft. De verlaging is het verschil tussen oranje lijn en de rode lijn. Het is dus van belang om bij een dergelijke gebiedsovergang rekening te houden met de verlaging in het buitengebied en die niet af te kappen op de gebiedsrand.

Er zijn niet veel analytische oplossingen die met deze situatie rekening houden, maar het kan deels wel. Het is eenvoudig om een doorsnede te beschouwen waarin deze overgang zit. Bruggeman geeft een analytische oplossing voor de onttrekking in een semi-ge-spannen pakket waarin op $x = 0$ de eigenschappen kD en c verspringen [Bruggeman (1999)]. Hiermee kan de besproken situatie worden berekend door de kD niet te laten verspringen maar de (drainage)weerstand in het hoge gebied een zeer grote waarde te geven en voor het lage gebied een kleine waarde toe te passen die overeenkomt met de drainageweerstand. De oplossing van Bruggeman is hier toegepast om de verlaging te berekenen en deze van de oranje lijn af te trekken, wat de rode oplevert. De paarse lijn is verkregen door de put 30 keer te spiegelen rond de harde gebiedsovergang en het resultaat daarvan af te trekken van de groene lijn. Dit levert een verlaging van nul op ter plaatse van de harde gebiedsranden.

3.4.1 Stationair versus niet-stationair

De hiervoor besproken analytische oplossingen zijn alleen geldig voor een stationaire, dus permanente situatie. De vraag is echter wanneer het voldoende is om met een stationaire berekening te volstaan en wanneer een tijdsafhankelijke berekening essentieel moet worden geacht. Kortdurende onttrekkingen veroorzaken evident tijdsafhankelijke verlagingen, maar bij langdurende of permanente onttrekkingen is de noodzaak van een



Figuur 6: Grondwaterverloop in gebied tussen evenwijdige randen met op de randen een harde en een zachte gebiedsovergang. Zie tekst voor uitleg.

tijdsafhankelijke benadering in eerste aanleg minder vanzelfsprekend.

Hoge, grote gebieden met nauwelijks drainerend oppervlaktewater hebben echter een groot tijdsgeheugen, waarin het in de tijd fluctuerende neerslagoverschot uit voorgaande jaren zijn sporen nog lang kan nalaten. Lage, natte gebieden met veel drainagemiddelen bestaan uit een mozaïek van subgebieden, waarin het grondwater op veel kleinere ruimtelijke schaal werkt en daardoor nauwelijks tijdsgeheugen heeft. In zulke lage gebieden kan het zinvol zijn om stationaire berekeningen te maken, althans in tijden met gemiddeld een neerslagoverschot, dus in de natte perioden (of bij permanente kwel). In tijden met gemiddeld een neerslagtekort, zakken de grondwaterstanden, en dit vaak tot beneden de slootbodems, waarbij sloten ook droogvallen. In zulke droge perioden bieden de sloten dan geen houvast voor het grondwater; de randvoorwaarden vallen dan weg en de verlaging zal zich dan fundamenteel tijdsafhankelijk gedragen. Met andere woorden, een verlaging die in een nat gebied in natte perioden als stationair mag worden beschouwd, kan in droge perioden gemakkelijk tijdsafhankelijk worden. In de zomer breidt zo'n verlaging zich radiaal uit zodra de sloten droogvallen, waarna, in de late herfst, wanneer de dan weer stijgende grondwaterstanden de slootbodems bereiken, de verlagingcontouren zich weer terugtrekken tot hun min of meer stationaire wintersituatie. De verlagingcontouren „ademen” in zulke gebieden tussen hun zomer- en winteromvang.

Wanneer het erom gaat de verlaging van een onttrekking te berekenen, zal het naast de stationaire situatie zinvol en vaak noodzakelijk zijn om deze voor de zomerperiode dynamisch te berekenen, zonder vaste randen. De duur van deze zomersituatie moet daarbij worden geschat, maar kan 3 tot 6 maanden zijn. De beoordeling in de Voortoets zou dan het beste kunnen worden gebaseerd op de grootste verlaging, dus die aan het einde van de zomer. Deze niet-stationaire berekening wordt hierna besproken in het kader van de bouwput, maar geldt evenzeer voor putbronnen en zeker voor onttrekkingen voor irrigatie.

3.5 Oppervlaktebron- bouwput

Een homogene en vlakke bouwput in een freatische watervoerende laag kan, voor punten buiten de bouwput, grondwatertechnisch worden beschouwd als een puntonttrekking in het centrum van de bouwput. Voor de berekende stationaire verlaging buiten de bouwput is alleen de totale onttrekking binnen de bouwput van belang. Voor de tijdsafhankelijke verlaging is er aanvankelijk een klein verschil omdat de verlaging binnen de bouwput bij schematisering tot een enkele centrale bron groter is dan de vlakke verlaging die binnen ontstaat wanneer de onttrekking plaats vindt met bronnen langs de omtrek van de bouwput. Maar naarmate de tijd voortschrijdt, neemt het verschil af. In feite is het verschil in de praktijk steeds verwaarloosbaar. Voorts

geldt voor de bouwput hetzelfde als wat hiervoor is gezegd over de brononttrekking: grondwatertechnisch en wat betreft de te gebruiken formules geen verschil met een brononttrekking.

Er is wel een verschil in die zin dat de duur van de bouwputbemaling in de regel beperkt is tot weken of maanden, zelden langer. Bij onttrekking gedurende de natte periode, in een gebied met veel drainagemiddelen zou kunnen worden volstaan met een berekening volgens het schema van Blom, dat hiervoor is uitgelegd. Bij onttrekking in een groot gebied of met name in de zomer in een nat gebied, is het essentieel om voor een juiste beoordeling een tijdsafhankelijke berekening te maken, met weglating van alle randvoorwaarden die alleen in de natte periode een rol spelen.

Bronders et al. geven een op het oog stationaire formule voor het berekenen van de permanente verlaging door de bouwput, en bepalen de reikwijdte op basis van de vereenvoudigde tijdsafhankelijke oplossing volgens Theis [Bronders et al. (2013)]. Dit lijkt op het hinken op twee gedachten, maar hun kan geheel worden opgevat als tijdsafhankelijk. Dit wordt nu uitgelegd. De vereenvoudigde verlagingsformule volgens Theis luidt

$$s = \frac{Q}{4\pi kD} \ln \left(\frac{2.25kDt}{r^2 S} \right)$$

waaruit de invloedsgrens volgt door verlaging $s = 0$ te stellen. Dat impliceert dat het argument van de logaritme gelijk is aan $\frac{2.25kDt}{r^2 S} = 1$. Direct volgt hieruit de bekende formule voor de dynamische grootte van de invloedssraal R

$$R = \sqrt{\frac{2.25kDt}{S}}$$

De dynamische verlagingsformule kan nu als volgt worden geschreven

$$s = \frac{Q}{2\pi kD} \ln \left(\frac{R}{r} \right)$$

met $R = \sqrt{\frac{2.25kDt}{S}}$, de invloedssraal. De resulterende formule is dus gelijk aan die voor stationaire verlaging volgens Dupuit, wanneer voor R de (tijdsafhankelijke) invloedssraal wordt ingevuld. De formule die Bronders et al. voorstellen is de volgende

$$H^2 - h^2 = \frac{Q}{\pi k} \ln \left(\frac{R}{r} \right)$$

Deze is gelijk aan de voorgaande wanneer de verlaging s klein is ten opzichte van de pakketdikte H , immers

$$H^2 - h^2 = (H + h)(H - s) \approx 2Ds$$

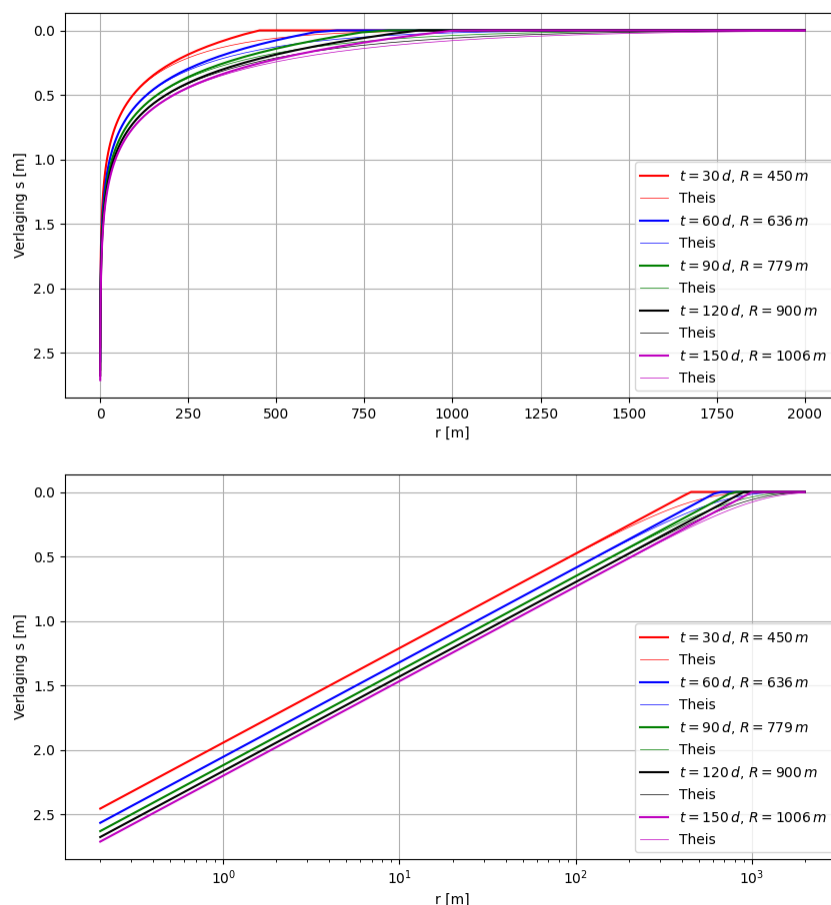
Dit ingevuld levert de eerder gegeven formule voor de verlaging bij constante pakketdikte.

Zoals eerder betoogd, heeft het in de praktijk nauwelijks zin om rekening te houden met de vermindering van de pakketdikte als gevolg van de verlaging; in nagenoeg alle situaties kan evengoed met een vaste pakketdikte worden gerekend.

Figuur 7 toont de verlaging door een (bouw)put voor verschillende tijden na de start van de bemaling op lineaire en logaritmische tijdschaal. Zowel de verlaging volgens de vereenvoudigde formule van Theis als volgens de exacte formule van Theis worden getoond. De vereenvoudigde formule van Theis geeft op logaritmische tijdschaal lineaire verlagingslijnen die in de tijd naar evenwijdig naar rechts opschuiven, waarbij het snijpunt met de lijn voor verlaging nul de radius invloedssraal weergeeft. Op deze punten is de verlaging volgens de exacte formule van Theis niet nul, maar wel bijna en daarmee verwaarloosbaar in de praktijk ten gunste van een eenvoudige formule om de invloedssraal te berekenen.

Met andere woorden, zonder het expliciet zo te noemen, berekenen Bronders et al. de verlaging door de bouwput tijdsafhankelijk voor een constante onttrekking. Bij een bouwput is echter niet zozeer de onttrekking constant, maar de verlaging op de rand van de bouwput. De tijdsafhankelijke onttrekking die bij deze vaste verlaging hoort kan met de bovenstaande eenvoudige formule met voldoende nauwkeurigheid analytisch

Tijdsafhankelijke verlaging door put, bijv. gedurende een droge periode zonder randvoorwaarden.
 $kD = 600.0 \text{ m}^2/\text{d}$, $S = 0.2$



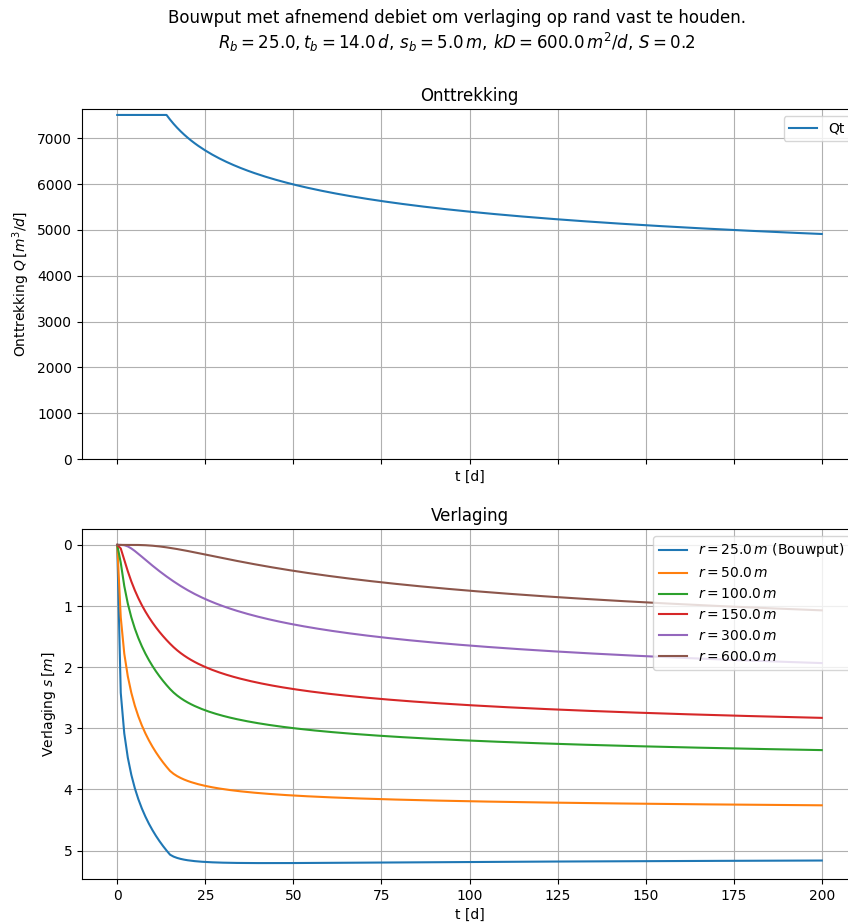
Figuur 7: Tijdsafhankelijke verlaging door een (bouw)put op lineaire en op logaritmische tijdschaal.

worden berekend. De verlaging op andere afstanden dan de radius van de bouwput kan vervolgens met dit tijdsafhankelijke debiet worden berekend met behulp van convolutie, wat op zichzelf een eenvoudige procedure is. Hiermee is dan bekend waar de 5 cm contour komt te liggen na een gekozen duur van de bemaling.

Convolutie is niets anders dan een voortschrijdend gemiddelde berekenen waarbij de onttrekking in het verleden gewogen wordt met de blokrespons, zijnde het gevolg van een eenheidsonttrekking gedurende een tijdstap, met de duur van bijvoorbeeld een dag. Zie verderop.

De onttrekking door een bouwput met constante verlaging op zijn rand kan worden geschat door het debiet te nemen dat volgens Theis nodig is om met een gewone put die op $t = 0$ start op elk moment de gewenste verlenging te bereiken op de straal van de bouwput. Dit is niet exact maar het scheelt niet veel. Berekening van dit debiet is eenvoudig. Reken met een vast debiet van $1 \text{ m}^3/\text{d}$ de verlaging op de bouwputrand uit als functie van de tijd. Neem vervolgens de verhouding tussen de daar gewenste en berekende verlaging (met $1 \text{ m}^3/\text{d}$) als het debiet. Reken vervolgens met dit tijdsafhankelijke debiet met convolutie de verlaging op willekeurige afstanden uit als functie van de tijd. De precieze afleiding en werkwijze zijn beschreven in de betreffende sectie van dit rapport. Figuur 7 geeft het zo berekende verloop van het onttrekkingsdebiet van een bouwput die de gewenste verlaging van 5 m op $r = 25 \text{ m}$ in 14 dagen wil halen en daarna constant wil

houden. De onderste grafieken geven de verlaging als functie van de tijd voor verschillende afstanden. Te zien is dat de verlaging op $r = 25$ m, de zogezegde bouwputrand, iets groter is dan de beoogde 5 m, maar verder constant in de tijd. De exacte berekening is analytisch complex en niet nodig voor de praktijk.



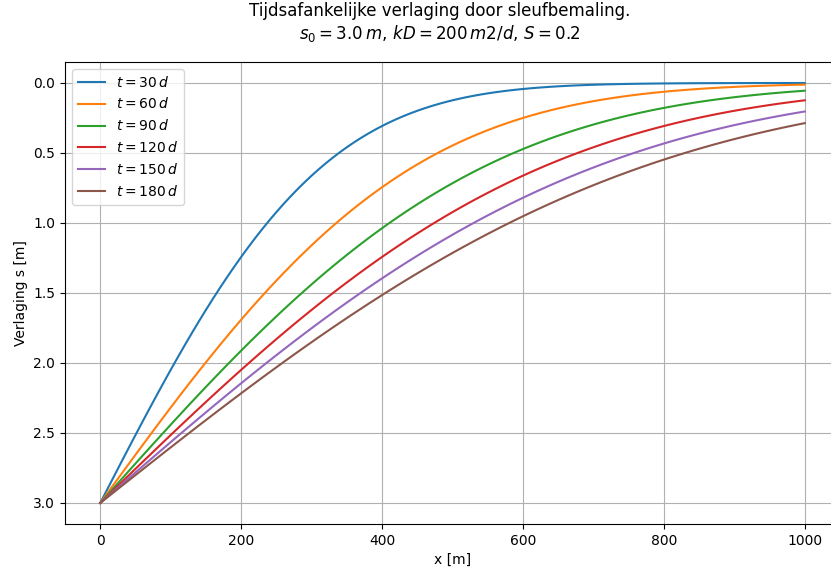
Figuur 8: Verlagingen (onder) en in de tijd dalend onttrekkingsdebiet (boven) van een bouwput nodig om de verlaging op $r = 25$ m in de tijd constant te houden op 5 m.

4 Lijnbron, peilbeheer door middel van een „gracht” of sleuf

In Vlaanderen is een gracht een waterloop, een beek of een sloot, bedoeld voor de af- en aanvoer of het tijdelijk ophouden van oppervlaktewater. Dit is anders dan in Nederland, denk aan de Amsterdamse Grachten. Vlaamse grachten zijn kleinere watergangen dieper dan 0.5 m en en hoogsten 3 m breed. De Vlaamse definitie sluit nauw aan bij de voorgaande sectie die handelde over lijnbronnen en sleufbemaling. Bij drainage denken we doorgaans aan meerdere drains of sloten in een langs een terrein, die gezamenlijk het grondwaterpeil binnen het terrein beheersen.

De door Bronders et al. beschreven berekening van de verlaging door een lijnvormige onttrekking gaat ervan uit dat deze wordt opgewekt door een plotselinge verlaging van het peil in een gracht of sleuf (figuur 9) [Bronders et al. (2013)]. Het omgekeerde, een verhoging, werkt hetzelfde maar dan andersom, waarbij dan eerder rekening moet worden gehouden met een significante intredeweerstand, die bij onttrekking niet

aan de orde is. Deze aanpak is adequaat, omdat, zowel bij peilregeling als bij sleufbemaling, het doel steeds is om een bepaald peil in de watergang de sleuf te bereiken, terwijl het tijdsafhankelijke onttrekkingsdebiet daarvan het gevolg is, net zoals dat ook bij bouwputten het geval is.



Figuur 9: Verlaging van de grondwaterstand bij plotselinge verlaging van het peil in de sleuf op $x = 0$.

De analytische formule de verlaging van het grondwater beschrijft na een plotselinge verandering van het peil in een gracht of sleuf, is als volgt

$$h(x, t) = h_0 \operatorname{erfc}(u), \text{ waar } u = \sqrt{\frac{x^2 S}{4kDt}}$$

waarin $\operatorname{erfc}()$ de complementaire errorfunctie is. Met deze formule kan voor elk tijdstip worden berekend waar de 5 cm verlagingen zich bevindt

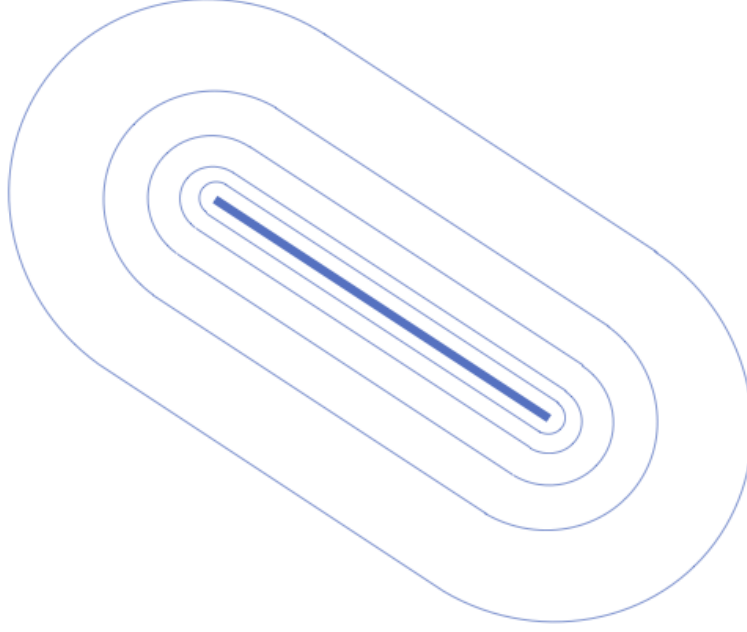
$$x = \sqrt{\frac{4kDt}{S}} \operatorname{erfc}^{-1}\left(\frac{h_{5\text{cm}}}{h_0}\right)$$

Hierin is $\operatorname{erfc}^{-1}()$ de inverse is van de $\operatorname{erfc}()$ functie, die gemakkelijk te berekenen is.

Net als met de invloedsstraal het geval was, breidt de invloedsafstand zich uit volgens de wortel van de tijd en is hij zowel evenredig met het doorlaatvermogen kD als omgekeerd evenredig met de bergingscoëfficiënt S .

Deze aanpak houdt geen rekening met de feitelijke, eindige lengte van de sleuf. Nabij de uiteinden neemt, bij gelijke verlaging, de onttrekking per m sleuflengte toe. De verlaginglijnen zijn daar niet langer evenwijdig aan de sleuf, maar buigen naar elkaar toe en sluiten voor het uiteinde op elkaar aan, daarbij min of meer langgerekte ellipsen om de sleuf vormend. Wat de analyse betreft hoeft hier daar niet per se rekening mee te worden gehouden. Men kan eenvoudig uitgaan van de verlaginglijnen evenwijdig aan de sleuf en die rondom de uiteinden met halve cirkels met elkaar verbinden. Deze procedure is eenvoudig en is in feite een lichte overschatting van de verlaging, en is daarmee acceptabel voor de Voortoets.

Men kan de lijnbron ook berekenen als een lange reeks putjes, aangesloten op een zuigsysteem, zoals in de praktijk gebruikelijk is voor sleufbemalingen zoals voor de aanleg van een riolering. Dit biedt rekentechnisch echter geen enkel voordeel, omdat dan het onbekende tijdsafhankelijke debiet van de putjes moet worden opgegeven, dat nodig is om de gewenste verlaging in de sleuf te bewerkstelligen en te handhaven. De aanpak via de oneindig lange lijnbronnen ligt in het kader van de Voortoets eerder voor de hand.



Figuur 10: Een dimensionale verlagingcontouren sleuf, aan de uiteinden verbonden met cirkels.

De door Bronders et al. gevolgde aanpak is een tijdsafhankelijke grondwaterverlaging door de lijnonttrekking [Bronders et al. (2013)]. Dit is gebaseerd op de in de regel beperkte duur van een bemaling. Maar peilbeheer kan zowel tijdelijk als permanent zijn. Bovendien, meer grachten of watergangen op beperkte afstand van de lijnbemaling zorgen in natte perioden eerder voor een meer permanente verlaging. Er moet dus een keuze gemaakt worden ten aanzien van welke aanpak, tijdsafhankelijk of stationair, het meest geschikt is, waarbij voor het droge seizoen de tijdsafhankelijke het meest zinvol is. Het niet meerekenen van sloten in de zomer is verantwoord door het feit dat sloten veel gemakkelijker draineren dan infiltreren bij een sliblaag op de bodem, waardoor zij in de winter het peil goed kunnen beheersen maar in de zomer niet.

4.1 Lijnbron: Drainage d.m.v. een stelsel parallelle drains of een permanente gracht of stelsel van grachten

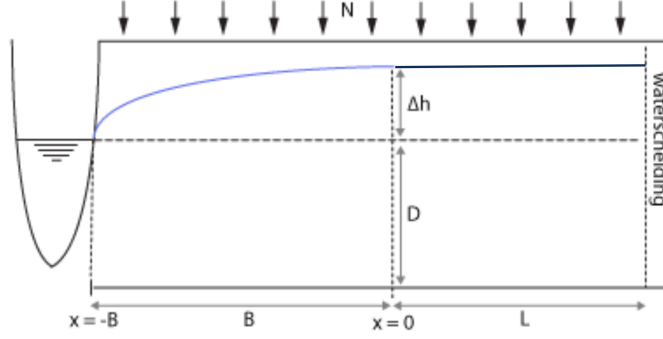
Met drainage wordt bedoeld dat het grondwaterniveau over een bepaald oppervlak, zoals een akker of een voetbalveld, permanent wordt verlaagd of op een bepaald niveau wordt gehouden.

De Voortoets is echter alleen geïnteresseerd in hoe ver de invloed van de drainage buiten het gedraineerde terrein reikt. Figuur 11 uit Bronders et al. geeft een doorsnede met links een gracht en rechts een gebied waarin over een afstand b de grondwaterstand is verlaagd als gevolg van het peil in de gracht [Bronders et al. (2013)].

Verder naar rechts over een afstand L en reikend tot aan de ingetekende waterscheiding toont de figuur het deel van hetzelfde gebied waarin de grondwaterstand niet wordt beïnvloed door de gracht. [Bronders et al. (2013)] geven wel een formule voor de afstand b wordt berekend, maar zonder afleiding:

$$B = \sqrt{L^2 + \frac{kD\Delta h + k\Delta h^2}{N}} - L$$

Omdat de herkomst van deze formule onduidelijk is, volgt nu een afleiding, waarbij de x -coördinaat loopt vanaf de gracht naar rechts en wordt verondersteld dat de afvoer $Q(x)$ voor $x = B$ gelijk aan nul is, want rechts daarvan is er geen verlaging of grondwatergradiënt aangegeven in de figuur. Onder deze uitgangspunten is de afvoer als functie van x bij afwezigheid van kwel gelijk aan



Figuur 11: [Bronders et al. (2013)], p31

$$Q(x) = -N(B - x)$$

Dus geldt voor de afvoer bij de gracht $Q(x = 0) = -NB$; het volledige neerslagoverschot over $0 < x < B$ stroomt naar de gracht. Voorts geldt voor de afvoer op het punt $x = b$, dat $Q(x = B) = 0$. Uitgaande van freatisch grondwater met variërende laagdikte geldt dan voor de grondwaterstand de volgende gewone differentiaalvergelijking

$$-kh \frac{dh}{dx} = -N(B - x)$$

Na integratie krijgen we een uitdrukking voor het verloop van de grondwaterstand h

$$h^2 = \frac{2N}{k} \left(Bx - \frac{x^2}{2} \right) + C$$

De integratieconstante C volgt uit het feit dat bij $x = 0$ de gegeven waterstand $h = h_0$ bij de gracht geldt. Hieruit volgt $C = h_0^2$ en dus

$$h_x^2 = h_0^2 + \frac{2N}{k} \left(Bx - \frac{x^2}{2} \right)$$

Voor $x = b$ volgt dan

$$h_b^2 = h_0^2 + \frac{NB^2}{k}$$

De verlaging Δh volgt dan uit

$$\begin{aligned} h_b^2 - h_0^2 &= \frac{NB^2}{k} \\ (h_b - h_0)(h_b + h_0) &\approx \Delta h 2D = \frac{NB^2}{k} \end{aligned}$$

zodat

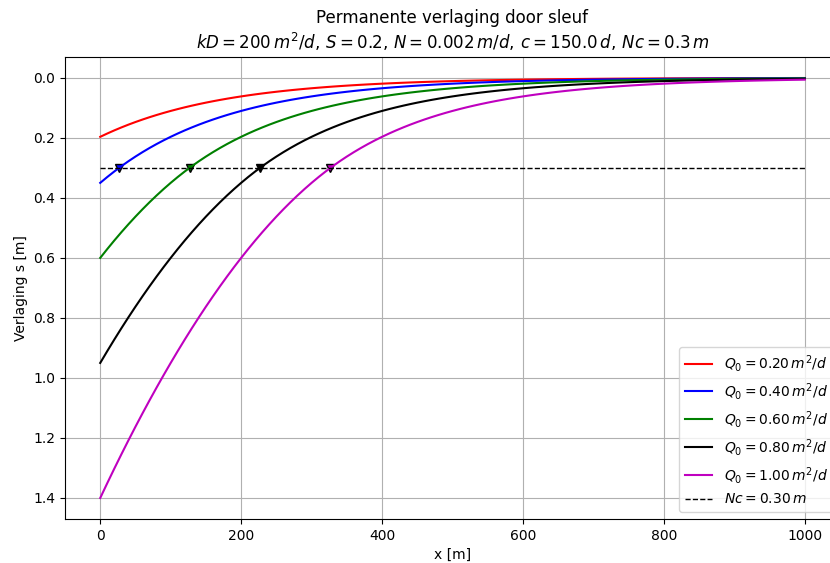
$$\Delta h \approx \frac{NB^2}{2kD} \rightarrow B \approx \sqrt{\frac{2kD\Delta h}{N}}$$

Het teken \approx komt omdat $h_b^2 - h_0^2 \approx 2\Delta h D$.

Het is niet duidelijk waar de term $k\Delta h^2$ onder de wortel van de formule uit Bronders et al. vandaan komt. Dat geldt evenzeer voor de L in de formule. Aangezien over de afstand L in de figuur geen grondwaterstroming plaats vindt, speelt dat deel van het gebied dus geen rol in de afleiding, en dus evenmin in figuur 4.

De formule impliceert dat b naar oneindig loopt wanneer N naar nul gaat. Dit komt omdat de verlaging afhankelijk is gemaakt van het neerslagoverschot. Deze afhankelijkheid is er echter alleen wanneer de drainage als gevolg van de verlaging van het peil in de gracht over het traject $0 < x < B$ vermindert. Dit zal zo zijn, wanneer dit gebied nat is en voorzien van veel drainagemiddelen, zodanig dat al die middelen op de schaal van B tot een vlakdekkende drainageweerstand kunnen worden geschematiseerd, net zoals dat in het schema van Blom het geval is. Dit is niet aan de orde in de schematisatie volgens de genoemde figuur 4. In het schema van Blom wordt dan de verlaging nooit nul op afstand. Ook in figuur 4 zal de verlaging niet nul zijn op $x = B$, want zonder terugkoppeling reikt de verlaging tot de eerstvolgende gracht, die rechts moet liggen van de in figuur 4 aangegeven waterscheiding. Dus, bij een permanente verlaging reikt deze tot aan de eerstvolgende randvoorwaarde (volgende waterloop), en bij een tijdelijke verlaging is deze tijdsafhankelijk. In het algemeen zal de verlaging niets te maken hebben met het neerslagoverschot, omdat beide niet naar elkaar terugkoppelen, tenzij het oppervlaktewater binnen het beschouwde gebied kan worden geschematiseerd tot een uniforme drainageweerstand.

Met deze drainageweerstand kan de situatie vanaf de gracht worden geformuleerd als een gebied waarin de sloten droogvallen zodra de verlaging groter is dan het product van neerslagoverschot en drainageweerstand en als semi-gespannen daarbuiten, waar de sloten nog steeds een deel van het neerslagoverschot afvoeren. In dit schema komt de vermindering van de drainage (vermindering van de afvoer van de sloten) ten goed aan de voeding van het grondwater. Bij verlaging groter dan Nc is deze „extra voeding” gelijk aan het gehele neerslagoverschot en bij geringere verlaging is deze „extra voeding” een deel ervan, evenredig met de lokale verlaging, net als dat bij sem-spanningswater het geval is. De formules zijn in het betreffende deel van dit rapport afgeleid. Een voorbeeld is gegeven in figuur 12. Bij deze benadering is er geen vaste rand B en is het grondwaterverloop continu en consistent met de slootafvoer en het neerslagoverschot.



Figuur 12: Schema Blom bij permanente verlaging op $x = 0$. Voeding is gelijk aan het N waar de verlaging groter is dan Nc en evenredig met de verlaging waar de verlaging kleiner is. De gebiedsovergang is aangegeven samen met de streepjeslijn die een verlaging Nc aangeeft.

5 Lijnbronnen als puttenreeksen met uniforme verlaging

Wanneer de lijnbron is opgebouwd als een reeks individuele onttrekkingen op rij met bekend debiet, dan is de berekening dezelfde als die welke wordt toegepast bij meerdere puntbronnen, namelijk superpositie. Bij een standaard-bemaling van sleuven, zoals voor rioolaanleg, worden ook individuele bronnen toegepast, zij

het op geringe onderlinge afstand, die per groep zijn aangesloten op een vacuümpomp. De onttrekking per bron is dan onbekend. Bij eenzelfde verlaging per bron neemt het debiet van de bronnen naar de uiteinden van de lijnbron of bemalingssleuf toe, zodat het echte debiet per bron niet nauwkeurig bekend is. Dit debiet per bron kan wel worden berekend middels optimalisatie met als doel dat de verlaging tussen elk paar naast elkaar gelegen bronnen gelijk is aan de beoogde uniforme verlaging.

5.1 Stationair

Hierna wordt een voorbeeld uitgewerkt voor stationaire verlaging bij semi-spanningswater, zodat de verlaging s_j op punt j door alle bronnen tezamen wordt gegeven door

$$s_j = \sum_{i=1}^n \left[\frac{Q_i}{2\pi k D} \sum_{j=1}^m K_0 \left(\frac{r_{ji}}{\lambda} \right) \right], \quad \lambda = \sqrt{k D c}$$

waarin Q_i de onttrekking door bron i voorstelt en r_{ji} de afstand van bron i tot punt j . De bodemgegevens staan in de kop van figuur 14.

Figuur 13 geeft een serie van 50 bronnen op onderling gelijke afstand opgesteld langs een vijftal rechte lijnen die tezamen de lijnbron vormen. Het doel is om de onttrekkingen van deze bronnen zodanig in te stellen dat de verlaging tussen elk paar naast elkaar gelegen paar bronnen gelijk is aan de beoogde 2.5 m.

Wanneer alle bronnen dezelfde onttrekking hebben is de verlaging in de richting van het zwaartepunt van het geheel van bronnen het grootst. Dit laat figuur 14 zien, die de onttrekking van de bronnen weergeeft met op de horizontale as hun positie gemeten langs de uit rechte stukken samengestelde lijnbron, die een gezamenlijke lengte heeft van 400 m. De bovenste figuur geeft de verlaging. De sterk variërende grafiek is de verlaging wanneer elke bron hetzelfde debiet heeft. De verlaging wordt dan groter in de richting van het zwaartepunt van de onttrekking. De nauwelijks variërende grafiek in het bovenste plaatje geeft de verlaging zoals berekend met de geoptimaliseerde brondebieten. De geoptimaliseerde brondebieten variëren aanzienlijk om de verlaging zo uniform mogelijk te kunnen maken dit is te zien aan de sterk variërende grafiek in het onderste plaatje van de figuur. Met name aan de uiteinden neemt de onttrekking per bron sterk toe, tot circa vijfmaal de onttrekking van de bronnen meer in het midden.

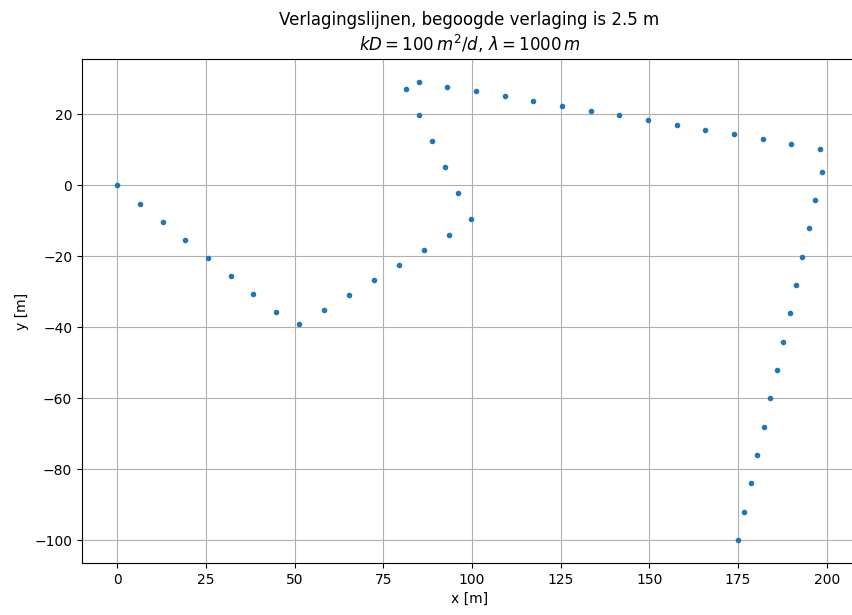
De optimalisatie werkt als volgt. Op basis van 4 steunpunten per lijnstuk wordt een cubic-spline-interpolatie opgezet. Hiermee kan voor elke bron het debiet worden berekend door interpolatie tussen de steunpunten. Met deze geïnterpoleerde debietverdeling over de bronnen wordt de onttrekking op de steunpunten geoptimaliseerd, zodanig dat de verlaging op alle tussenpunten zo dicht mogelijk bij de doelverlaging ligt. Dit is het geoptimaliseerde verdeling die is weergegeven in het onderste plaatje van figuur 14.

Met deze nieuwe brondebieten kan vervolgens de verlaging worden berekend op alle tussenpunten, waarmee de kwaliteit van de optimalisatie kan worden geverifieerd. Het resultaat staat in het bovenste plaatje van figuur 14. De sterk variërende grafiek in het bovenste plaatje is berekend door de verlaging langs de lijnbron te berekenen wanneer de bronnen allemaal hetzelfde gemiddelde debiet hebben. Dat gemiddelde debiet is in ook het onderste plaatje weergegeven.

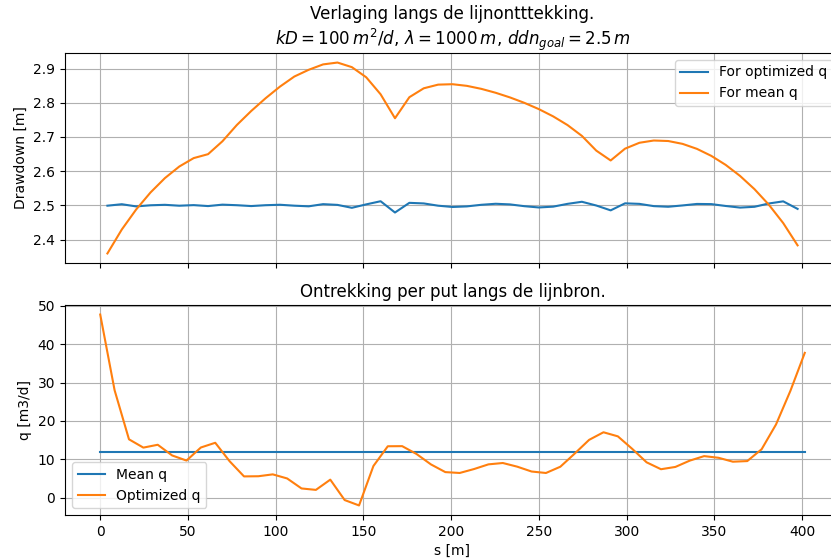
Met de nu bekende debieten van de afzonderlijke bronnen kan een hoogtelijnenkaart worden gemaakt. Daarvoor wordt de verlaging als gevolg van alle bronnen berekend op de knooppunten punten van een regelmatig raster, en worden tenslotte de isolijnen van de verlaging berekend. Het resultaat is te zien in figuur 15. De verlagingcontouren zijn daarin om de 5 cm getekend. Het is goed te zien dat de verlaging langs de lijnbron voldoet aan de eis van 2.5 m.

5.2 Niet-stationair

De verdeling van het brondebiet over de lijnbron kan zowel stationair als niet-stationair worden berekend. Daar zit echter wel een „maar” aan vast. Bij een permanent beoogde uniforme verlaging langs de lijnbron verandert de verdeling van het debiet over de bronnen naarmate de tijd verstrijkt. Bij een vacuümbemaling stelt zich deze verdeling vanzelf in, en ook in een numeriek grondwatermodel kan de gewenste verlaging worden opgelegd langs de lijnbron waarna het model de verdeling van het debiet over de bronnen automatisch



Figuur 13: Serie lijnbronnen waarvan de onttrekking moet worden geoptimaliseerd om de doelverlaging van 2.5 m te realiseren.



Figuur 14: Boven: Verlaging wanneer alle bronnen hetzelfde debiet onttrekken, en de verlaging wanneer het debiet via optimalisatie over de bronnen is verdeeld. Onder: Het gemiddelde debiet waarbij de sterk variërende verlaging hoort en het variërende geoptimaliseerde debiet waarbij de praktisch constante verlaging hoort. De horizontale as is gemeten langs de lijnbron. De totale lengte is 400 m.

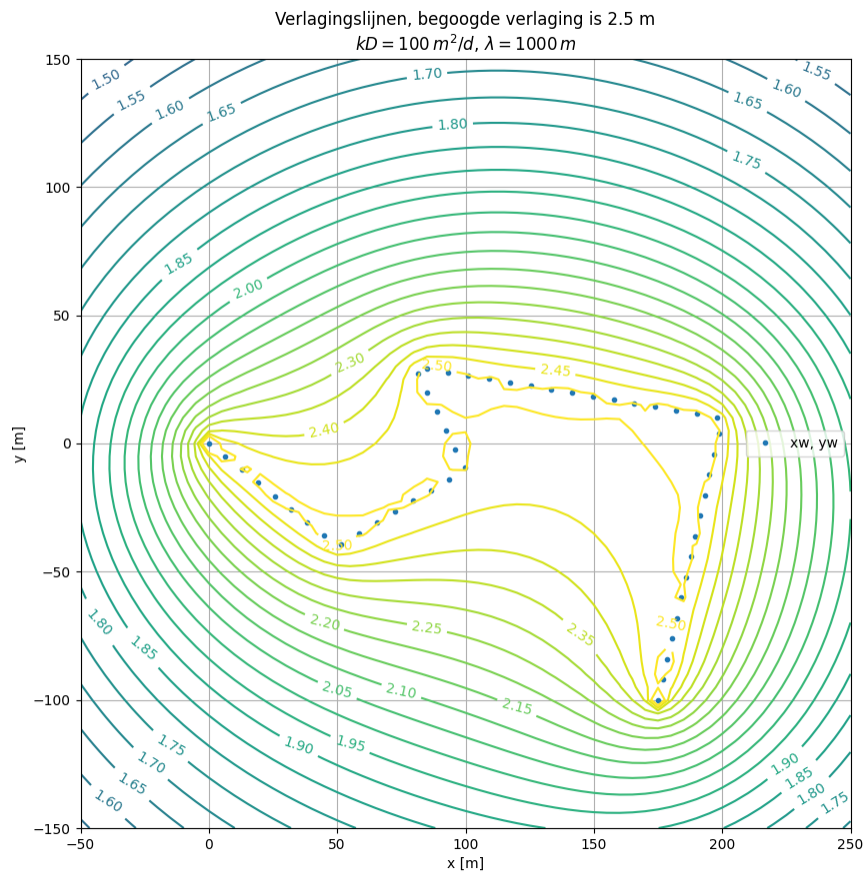
becijfert, maar een analytische berekening vergt wat meer. Op dezelfde manier als hiervoor is gedaan, kan voor elk moment worden berekend wat de verdeling van het debiet over de bronnen vanaf $t = 0$ zou moeten zijn om de bemoogde vaste verlaging op dat moment te realiseren. Maar dat berekent wel, dat de verdeling over de bronnen op elk ander moment daarvan afwijkt. Om de verlaging over de gehele tijdsperiode waarin de grondwaterstanden nog veranderen op een vaste waarde te houden, moet de verdeling over de bronnen vanaf $t = 0$ dus meeveranderen. Hiervoor bestaat geen analytische oplossing, maar mogelijk gaat het wel via een Laplace-transformatie gevolgd door numerieke terugtransformatie vanuit het Laplace-domein. De reden dat een Laplace-transformatie wel zal werken is omdat de Laplace-transformatie de tijd elimineert, waarna we het boven opgeloste probleem terug hebben, zij het in het Laplace-domein. Hoewel dit dus wel mogelijk is, en het TTIM programma van Mark Bakker dit ook zo doet, gaat dit veel te ver voor de eenvoudig bedoelde Voortoets.

6 Speciale oppervlaktebron: ont- of bebossing

Aanleg of rooien van een bos verandert het neerslagoverschot. Het verschil tussen de hoeveelheid water die en bos of een landbouwgewas verdampt is altijd slechts een deel van het neerslagoverschot. Een goede schatting hiervoor is ca. 100 mm/j [Bronders et al. (2013)]. In vergelijking tot een even groot verhard oppervlak is dit rond de helft daarvan, ervan uitgaande dat de verharding het gehele neerslagoverschot afvoert. Met de conclusie van hetgeen bij verhardingen is gezegd, impliceert het dag ont- of bebossing met en oppervlak tot 2 ha als verwaarloosbaar mag worden beschouwd.

7 Speciale oppervlaktebron: aanbrengen van verhardingen

De neerslag die op de verharding valt, wordt doorgaans via riolen opgevangen en afgevoerd en komt dan in mindering op de voeding van het grondwater. Dit kan als een onttrekking worden opgevat waarvan het effect als zodanig kan worden berekend zoals dat voor puntbronnen en lijnbronnen gebeurt.



Figuur 15: Verlagingscontouren door de onttrekking door de reeks bronnen bij debiet dat is geoptimaliseerd om zo uniform mogelijk een verlaging van 2.5 m te realiseren tussen elk paar naast elkaar gelegen bronnen.

Een verharding van hoogstens 1 ha geeft bij 200 mm neerslagoverschot een 2000 m³/j, ruim 5.5 m³/d, en wordt als verwaarloosbaar beschouwd.

8 Relatie oppervlaktewater en grondwater

Na toepassing van een rekenregel moet worden nagegaan of er een mogelijk effect op de relatie tussen oppervlaktewater en grondwater aanwezig kan zijn. Als het gaat om bijvoorbeeld vennen is dit hoofdzakelijk een GIS-operatie waarbij het als bovengens van het effect het peil van het ven wordt verlaagd gelijk aan de verlaging van de grondwaterstand. Los hiervan heeft het onttrekking van grondwater altijd tot gevolg dat er oppervlaktewater minder gaat afvoeren en soms droog kan vallen of dat eerder in het jaar zal doen. Vooral kleine waterlopen zijn kwetsbaar, met name in hun bovenlopen. In de regel zal een precieze duiding hiervan een nadere analyse vereisen.

Deel III

Afleidingen en illustratie van de verschillende analytische formules

9 Intro, verantwoording

Het is omwille van toekomstige verantwoording goed om de gebruikte formules af te leiden. Om ze in perspectief te zetten en te vergelijken is het bovendien goed om ze te illustreren. Een aantal illustraties is hiervoor reeds in de tekst opgenomen.

Voor een zinvolle analyse van een fysische ingreep in het grondwatersysteem, zoals een nieuwe puntonttrekking, bemaling of verandering van de loop of het niveau van oppervlaktewater, is een beeld nodig van de opbouw van de ondergrond en van de drainage in het gebied (de randvoorwaarden). In de situaties die in de Voortoets een rol spelen zijn de gegevens van de ondergrond beperkt tot doorlatendheid k , effectieve dikte van het freatische pakket D (eventueel het doorlaatvermogen kD en, voor zover sprake is van tijdsafhankelijke stroming, de freatische bergingscoëfficiënt S (vaak aangeduid met S_y , wat staat voor „specific yield”). Deze eigenschappen worden in de berekeningen constant verondersteld binnen het beschouwde gebied. Een uitzondering is de effectieve dikte van het freatisch pakket, die in verschillende formules ook kan afnemen door de verlaging. Als randvoorwaarden gelden in de formules gefixeerde stijghoogten (verlaging nul) op een gegeven afstand van de onttrekking, de bouwput of de sleuf. We voegen hieraan toe dat een freatisch pakket in de praktijk vaak zal overgaan in een quasi-halfgespannen pakket, namelijk in die gevallen waarin de onttrekking leidt tot vermindering van afvoer in een netwerk van drainages en sloten dat gebiedsdekkend kan worden geschematiseerd tot een drainageweerstand. In zulke situaties komt de reductie van de afvoeren goede aan de voeding van het grondwater en is er een terugkoppeling tussen onttrekking en grondwatervoeding. Daar zit echter een maximum aan, gegeven door de verlaging waarbij de afvoer naar het lokale slotenstelsel net nul wordt.

Bij bouwputten en sleufbemalingen of peilregeling met watergangen is het niet de onttrekking die wordt geregeld, maar het gewenste peil. De onttrekking volgt hieruit, en die vermindert gedurende de duur van de bemaling. Bouwputten en sleufbemalingen worden tijdsafhankelijk berekend omdat de ligging van de randen vaak onduidelijk is, met name in de zomer, en omdat de duur van bemalingen beperkt is. Ook verlagingen door brononttrekkingen verdienen vaak een tijdsafhankelijke berekening om de ruimtelijke uitbreiding van de verlaging te vatten die in de zomer optreedt naarmate er in een gebied meer sloten droogvallen.

Deze drie vormen van informatie zijn gebonden aan beschikbare kaarten zoals die van de habitatgebieden, het oppervlaktewater en de bodemlagen. De laatste twee zijn aanwezig in de kaarten waarop het grondwatermodel van Vlaanderen is gebaseerd. Deze kaarten bevatten ook de benodigde informatie over de waarden van de bodemconstanten, zoals laagdikten, doorlaatvermogen, weerstand tussen lagen en bergingscoëfficiënten. Mogelijk kunnen op basis van de beschikbare laagverbreidingskaarten ook complexere situaties worden gesignaleerd, zoals breuken en andere scherpere overgangen tussen gebieden, die niet met eenvoudige formules kunnen worden geanalyseerd, of waarvoor een aangepaste berekening kan worden voorgesteld of voorgeschreven. Het uit kaarten halen van de randvoorwaarden voor een berekening is vermoedelijk het meest complex of daar valt in de praktijk het meest op af te dingen. Uiteraard kunnen randvoorwaarden worden voorgeschreven, zoals een invloedsradius of duur van de onttrekking waarmee moet worden gerekend, zoals dat nu reeds in de Voortoets het geval is.

Voor de benodigde onderliggende gegevens moet er in de Voortoets toegreep zijn tot het Vlaamse grondwatermodel, of althans de kaarten waar dit op gebaseerd is, zodat deze kaarten als een ruimtelijke database kunnen worden beschouwd en worden bevraagd op bodemconstanten die voor een gegeven locatie moeten worden gebruikt.

Door op een dergelijke manier de voor elke vraag benodigde informatie op te halen, kan de onderliggende machinerie van de Voortoets steeds gemakkelijk worden aangepast en verbeterd naar nieuwe inzichten.

Het resultaat van de Voortoets zal op deze wijze ook steeds in lijn zijn met de eventueel naderhand uit te voeren bredere analyse. Daar komt zonnodig een ruimtelijk grondwatermodel aan te pas, dat immers op dezelfde gegevens is gebaseerd. Een kernpunt zou dus moeten zijn dat de gegevens die gebruikt worden in

de Voortoets dezelfde zijn als die in het ruimtelijke model van Vlaanderen worden toegepast, waarbij de voortoetsberekeningen zich zullen baseren op de ondergrondgegevens ter plaatse van de ingreep, die in de formules als uniform worden beschouwd, terwijl een ruimtelijk grondwatermode bij nadere analyse rekening houdt de ruimtelijke variatie van de ondergrondgegevens.

De info-vraag van de Voortoets zal altijd zeer beperkt zijn, zodat de ICT-belasting navenant laag blijft en de informatie dus real-time over het internet (via een URL) moet kunnen worden opgevraagd en worden opgezocht op de ruimtelijke kaarten.

10 Formule van Verruijt versus die van Dupuit en de formule van Blom

10.1 Het idee achter de formules

Verruijt beschouwt stationaire grondwaterstroming in een freatisch watervoerend pakket met een permanente Q in het centrum van een cirkelvormig gebied met vaste stijghoogte op radius R , dat gevoed wordt met een constant en uniform neerslagoverschot N . Het stroombeeld is hiermee bepaald.

De situatie is dezelfde als volgens Dupuit, maar nu met neerslag waar Dupuit geen rekening mee hield.

10.1.1 Variabele pakketdikte h

De formule van Verruijt voor axiale stroming naar een put gaat er ook van uit dat het onttrokken water afkomstig is uit het neerslagoverschot N [m/d] en mogelijk tevens uit instroming over de gebiedsrand. De stroming is bij Verruijt volledig bepaald door de onttrekking Q [m³/d], het neerslagoverschot N en de radius R van het beschouwde cirkelvormige gebied met bron in het centrum. Bij een onttrekking Q is de stroming in de richting van de put over een cirkel met radius r gelijk aan

$$Q_r = Q - \pi r^2 N$$

$$2\pi r k h \frac{dh}{dr} = Q - \pi r^2 N$$

De variabele effectieve pakketdikte h kan onder het d -teken worden geplaatst

$$\pi r k \frac{dh^2}{dr} = Q - \pi r^2 N$$

Dit geeft de op te lossen gewone differentiaalvergelijking

$$\frac{dh^2}{dr} = \frac{Q_0}{\pi k r} - \frac{r N}{k}$$

Integratie levert

$$h^2 = \frac{Q_0}{\pi k} \ln r - \frac{N}{2k} r^2 + C$$

De integratieconstante invullen voor $r = R$ geeft

$$h_R^2 = \frac{Q}{\pi k} \ln R - \frac{N}{2k} R^2 + C$$

Beide vergelijkingen van elkaar aftrekken elimineert deze integratieconstante

$$h^2 - h_R^2 = -\frac{Q}{\pi k} \ln \frac{R}{r} + \frac{N}{2k} (R^2 - r^2)$$

waarmee de formule van Verruijt is verkregen.

Deze formule impliceert dat het intrekgebied van de bron met radius R_i zich bij voldoende grote gebieds-radius R geheel binnen het gebied ligt, zodat dan $R_i < R$. De radius R_i van de intrekzone volgt uit de waterbalans

$$Q = \pi R_i^2 N \rightarrow R_i = \sqrt{\frac{Q}{\pi N}}$$

De afgeleide is voor deze r moet op deze radius gelijk aan nul zijn. Differentiëren van de vergelijking met h^2 naar r geeft

$$2h \frac{dh}{dr} = -\frac{Q}{\pi k} \frac{r}{R} \left(\frac{-R}{r^2} \right) - \frac{2rN}{2k}$$

ofwel

$$\frac{dh}{dr} = +\frac{Q}{2\pi k h} \frac{1}{r} - \frac{rN}{2kh}$$

De radius van het intrekgebied, R_i , dus met afgeleide van h gelijk aan 0, is dus

$$R_i = \sqrt{\frac{Q}{\pi N}}$$

zoals ook direct volgde uit de waterbalans.

10.1.2 Constante pakketdikte D

Voor een constante pakketdikte D , met $h^2 - h_R^2 = (h - h_R) 2D$ en $h - h_R = -s$, wordt de verlaging s als volgt

$$s = \frac{Q_0}{2\pi k D} \ln \frac{R}{r} - \frac{N}{4kD} (R^2 - r^2)$$

Ook hier geldt dat het intrekgebied volgt uit de waterbalans

$$Q = \pi R_i^2 N \rightarrow R_i = \sqrt{\frac{Q}{\pi N}}$$

De afgeleide ds/dr voor $r = R_i$ is

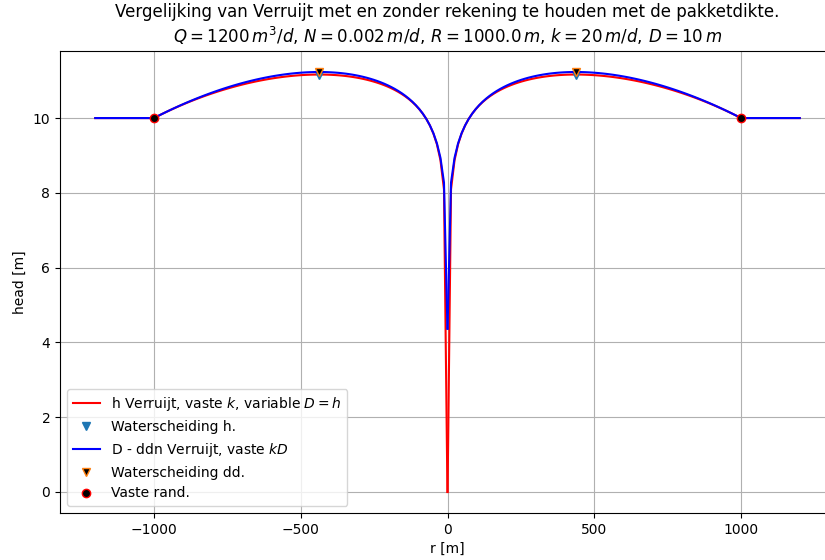
$$\frac{ds}{dr}|_{R_i} = -\frac{Q}{2\pi k D} \frac{1}{R_i} + \frac{NR_i}{2kD}$$

zodat de radius van het intrekgebied, waar de afgeleide van s naar r gelijk aan nul is, wordt nu

$$R_i = \sqrt{\frac{Q}{\pi N}}$$

Dit volgde natuurlijk al direct uit de waterbalans. Dit is ook de reden dat de ligging van de waterscheiding voor variabele en constante pakketdikte dezelfde is.

Figuur 16 geeft het verloop van de grondwaterstand volgens Verruijt, zowel berekend met constante als variabele pakketdikte. Het verschil is voor de praktijk verwaarloosbaar. De markers voor de waterscheiding laten zien dat die voor beide formules dezelfde is. Bij een voldoende groot debiet zoals in dit voorbeeld het geval, ontstaat er een intrekgebied binnen de cirkelvormige gebiedsrand. Het grondwater binnen dit gebied stroomt naar de bron, het grondwater erbuiten stroomt naar de gebiedsrand. De kegel binnen het intrekgebied beneden de waterscheiding heeft niets te maken met de verlaging. Voor de verlaging moet men de berekende situatie aftrekken van die met neerslag maar zonder onttrekking.



Figuur 16: Verloop van de grondwaterstand volgens Verruijt berekend met variabele en met constante pakketdikte.

10.2 BLOM axiaal-symmetrisch

De situatie die Verruijt voor ogen had is dezelfde als die van Blom, met uitzondering van wat er gebeurt buiten een nader te bepalen radius R . Bij Verruijt is radius R een vaste rand met verlaging nul, waarbinnen de situatie kan worden opgevat als een gebied zonder drainerende sloten. Daarbinnen wordt het neerslagoverschot in de richting van de bron afgevoerd en mogelijk deels naar de gebiedsrand, wanneer het totale neerslagoverschot zijnde $\pi R^2 N$ groter is dan de onttrekking van de put, Q .

Bij Blom markeert de radius R ook het gebied zonder sloten of sloten zonder afvoer, maar vormt deze radius R de grens tussen het binnengebied met drooggevallen sloten en het buitengebied, waar de sloten nog wel een deel van het neerslagoverschot afvoeren. De voeding van het grondwater in het buitengebied is gelijk aan de reductie van de afvoer die door de verlaging optreedt, en is dus evenredig met de verlaging. Wanneer we de watergangen in dit buitengebied regionaal kunnen schematiseren tot een drainageweerstand, is de situatie gelijk aan die bij De Glee, dat wil zeggen bij onttrekking aan een semi-gespannen pakket afgedekt door een laag met gegeven weerstand.

Bij afwezigheid van kwel ligt de grens tussen het binnengebied volgens Verruijt en het buitengebied volgens De Glee daar waar de verlaging gelijk is aan het Nc het project van het neerslagoverschot en de drainageweerstand. Dit is gelijk aan de gemiddelde grondwaterstand boven de slootpeilen voorafgaand aan de onttrekking. In een gebied met kwel zou de kwel bij het neerslagoverschot moeten worden opgeteld. Op de grens tussen binnen- en buitengebied zijn zowel de stijghoogte als de afvoer via het watervoerende pakket continu. Dit schema van binnengebied volgens Verruijt en buitengebied volgens De Glee is het schema van Blom en is van toepassing bij onttrekking aan een put in een (nat) gebied met veel sloten, waarin alle sloten bij elkaar kunnen worden geschematiseerd tot een uniforme drainageweerstand.

10.2.1 Verlaging voor $r \leq R$, de grens tussen binnen- en buitengebied

De verlaging voor $r \leq R$ is dezelfde als die bij Verruijt met dien verstande dat de verlaging op $r = R$ niet nul is maar $s_R = Nc$.

10.2.2 Verlaging voor $r \geq R$ (De Glee (1930), zie [Verruijt (1982)], p21)

Bij Blom vallen de sloten droog binnen een straal gelijk aan R . De stroom Q_R op $r = R$ volgt uit de waterbalans en is gelijk aan $Q_r = Q_0 - \pi R^2 N$. Het gebied voor $r > R$ fungeert als een semi-gespannen

aquifer, die gevoed wordt uit verminderde drainage door de sloten. Deze voeding is overal gelijk aan de verlaging s gedeeld door de drainageweerstand c . Van toepassing op het buitengebied is de wiskundige oplossing voor permanente onttrekking aan een semi-gespannen pakket volgens De Glee (1930); zij bestaat alleen voor constante pakketdikte:

$$s_{r>R} = \frac{Q_R}{2\pi kD} \frac{K_0\left(\frac{r}{\lambda}\right)}{\frac{R}{\lambda} K_1\left(\frac{R}{\lambda}\right)}$$

Voor $r = R$

$$s(r = R) = \frac{Q_R}{2\pi kD} \frac{K_0\left(\frac{R}{\lambda}\right)}{\frac{R}{\lambda} K_1\left(\frac{R}{\lambda}\right)}$$

10.3 Koppeling van buiten- en binnengebied

De verlaging op $r = R$ is ook gelijk aan $s_R = Nc$ omdat daar de verminderde drainage juist de resterende drainage nul maakt. Hiermee hebben we een vergelijking waarmee de radius kan worden berekend waarbinnen de sloten droog vallen

$$\begin{aligned} Nc &= \frac{Q_R}{2\pi kD} \cdot \frac{K_0\left(\frac{R}{\lambda}\right)}{\frac{R}{\lambda} K_1\left(\frac{R}{\lambda}\right)} \\ &= \frac{Q_0 - \pi R^2 N}{2\pi kD} \cdot \frac{K_0\left(\frac{R}{\lambda}\right)}{\frac{R}{\lambda} K_1\left(\frac{R}{\lambda}\right)} \end{aligned}$$

We kunnen R alleen iteratief berekenen, bijvoorbeeld met de Newton-methode. Deze methode maakt van bovenstaande expressie een functie van $y(R)$ waarvan R het nulpunt is dat moet worden gevonden.

$$y(R) = -Nc + \frac{Q_0 - \pi R^2 N}{2\pi kD} \cdot \frac{K_0\left(\frac{R}{\lambda}\right)}{\frac{R}{\lambda} K_1\left(\frac{R}{\lambda}\right)}$$

De Newton-methode vindt het nulpunt iteratief als volgt

$$R_{n+1} = R_n - \frac{y(R)}{y'(R)}$$

Hierin is $y'(R)$ de afgeleide is van $y(R)$ naar R en n de betreffende iteratie.

Deze Newton-methode is eenvoudig, maar vergt wel de afgeleide van $y(R)$. Deze kan zowel numeriek met de functie $y(R)$ worden berekend als analytisch. Voor dit laatste moeten we $y(R)$ differentiëren naar R .

Voor de afgeleide van y naar R hebben we de afgeleide van de factor met de besselfuncties nodig.

Gebruik makend van $\frac{dK_0(z)}{dz} = -K_1(z)$ en van $\frac{d(zK_1(z))}{dz} = -zK_0(z)$ volgt na enige uitwerking

$$\frac{d}{dr} \left(\frac{K_0\left(\frac{R}{\lambda}\right)}{\frac{R}{\lambda} K_1\left(\frac{R}{\lambda}\right)} \right) = \frac{1}{R} \left(\frac{K_0^2\left(\frac{R}{\lambda}\right)}{K_1^2\left(\frac{R}{\lambda}\right)} - 1 \right)$$

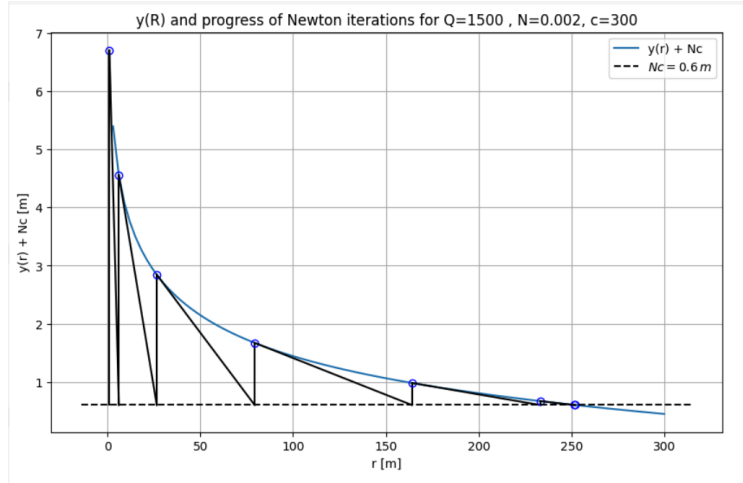
Uiteindelijk, na invoegen in de gehele uitdrukking voor $dy(R)/dr$, het volgende resultaat verkregen

$$\frac{dy(R)}{dr} = -\frac{\lambda N}{kD} \cdot \frac{K_0\left(\frac{R}{\lambda}\right)}{K_1\left(\frac{R}{\lambda}\right)} - \left(\frac{Q_0/R}{2\pi kD} - \frac{NR}{2kD} \right) \cdot \left(1 - \frac{K_0^2\left(\frac{R}{\lambda}\right)}{K_1^2\left(\frac{R}{\lambda}\right)} \right)$$

De functies $y(R)$ en $dy(R)/dR = y'(R)$ zijn eenvoudig te implementeren en te gebruiken in de Newton methode om R te bepalen. De afleiding van $y'(R)$ kan worden gecontroleerd door deze ook numeriek uit te rekenen:

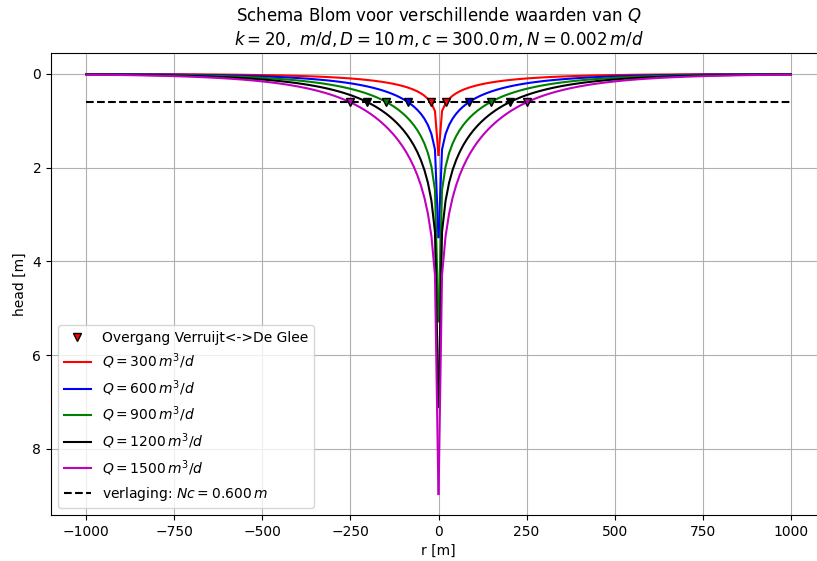
$$y' \approx \frac{y(R + \delta r) - y(R - \delta r)}{2\delta r}$$

Na implementatie van de Newton methode is verlaging volgens het schema van Blom op dezelfde wijze te berekenen als de verlaging van Dupuit, Verruijt of De Glee.



Figuur 17: Newton-iteraties ter bepaling van de gebiedsovergang, daar waar de verlaging gelijk is aan Nc .

Figuur 17 laat zien hoe de Newton-iteraties verlopen. Steeds wordt met de raaklijn een volgend punt bepaald totdat het snijpunt van $y(R) + Nc$ met de lijn Nc is gevonden. Dit proces verloopt snel.



Figuur 18: Voorbeeld resultaat berekening verlaging volgens Blom.

Figuur 18 geeft het resultaat van de berekening volgens Blom. De overgang tussen het binnengebied volgens Verruijt en het buitengebied volgens De Glee is met markers aangegeven en ligt daar waar de verlaging gelijk is aan Nc .

11 De drainageweerstand (lekweerstand)

De drainageweerstand is een concept, dat de weerstand van het oppervlaktewatersysteem in een intensief gedraineerd gebied als een polder, met al zijn sloten, watergangen en drainages samenvat tot een enkele afvoerweerstand. Dit is toepasbaar op de regionale of subregionale schaal, waar individuele sloten niet meer herkenbaar zijn op het patroon van het grondwater. Dat is bijvoorbeeld het geval in polders met sloten op onderlinge afstanden in de orde van 100 m. Ook voor andere natte, intensief gedraineerde gebieden, met inbegrip van natte natuurgebieden, is dit concept toepasbaar.

De drainageweerstand c [d] kan analytisch worden afgeleid en berekend, zoals hierna wordt gedaan. Zij kan ook in het veld worden bepaald als de gemiddelde grondwaterstand Δh [m] boven de drainagebasis (de waterstand in de sloten) gedeeld door het neerslagoverschot N [m/d], overeenkomend met de relatie $\Delta h = Nc$. Bram Bot maakt in zijn Grondwaterzakboekje onderscheid tussen drainageweerstand en lekweerstand, waarbij de drainageweerstand is gebaseerd op de hoogste grondwaterstand en de lekweerstand op de gemiddelde grondwaterstand [Bot (2016)]. Hier gebruiken we de gemiddelde grondwaterstand.

De drainageweerstand is het gevolg van weerstand die het water ondervindt van het punt van infiltratie van het neerslagoverschot op de freatisch vlak tot in de drainerende sloten. We gaan hier ervan uit dat kwel mag worden verwaarloosd. De weerstand die het geïnfiltreerde neerslagwater ondervindt is nu opgebouwd uit die door de verticale stroming vanaf de watertafel, die door de horizontale stroming en die door de contractie van stroomlijnen die optreedt bij het naderen van de sloot, waarvan de natte omtrek meestal veel kleiner is dan die pakketdikte. De bodemweerstand van de sloot kan worden verwaarloosd bij uittredend grondwater, wat hier centraal staat.

11.1 Afleiding van de drainageweerstand in een verticaal anisotroop pakket:

$$k_x \neq k_z$$

Voor een watervoerend pakket met dikte D tussen volledig penetrerende sloten op onderlinge afstand $L = 2b$ is, met de gebruikelijke verwaarlozing van verticale stroming het verloop van de grondwaterstand geheel onafhankelijk van z en volgt

$$s = \phi - \phi_b = \frac{N}{2k_x D} (b^2 - x^2)$$

De gemiddelde grondwaterstand boven de sloten veroorzaakt door de horizontale stroming is dan

$$\overline{s_h} = \frac{1}{3} \frac{Nb^2}{k_x D} = \frac{1}{12} \frac{NL^2}{k_x D}$$

De contractie van de stroomlijnen naar de sloot, die veel ondieper is dan de dikte van het watervoerende pakket, geeft een extra verhoging van de grondwaterstand gelijk aan

$$\Delta s = \frac{NL}{\pi k} \ln \left(\frac{D}{\Omega} \right)$$

waarin Ω de lengte van de contactzone (in de doorsnede) is tussen de sloot en het watervoerende pakket.

In de contractie zone is er wel sprake van verticale stroming zodat hier de anisotropie in moet worden meegenomen. Dit wordt verderop gedaan.

Door de weerstand die de neergaande verticale stroming ondervindt tussen de watertafel bij $z = H$ en de pakketbasis op $z = 0$ is de stijghoogte van de watertafel hoger dan die aan de basis van het freatische pakket. Deze term zullen we bij de drainageweerstand optellen. De verticale stroming in het freatische pakket verloopt lineair van $q_v = N$ aan de watertafel waar $z = H$ en 0 aan de basis van het pakket waar $z = 0$. Aldus geldt

$$q_v = -k_z \frac{\partial \phi}{\partial z} = -N \frac{z}{H}$$

Hierin is k_z gebruikt omdat deze stroming geheel onafhankelijk is van de horizontale doorlatendheid. Na integratie volgt

$$\phi = \frac{N}{2k_z H} z^2 + C$$

De integratieconstante C volgt uit $\phi = \phi_{z=H}$ voor $z = H$

$$\phi_{z=H} = \frac{NH}{2k_z} + C$$

De laatste vergelijking afgetrokken van de voorlaatste geeft het stijghoogteverloop langs elke verticaal in het freatische pakket buiten de zone met de contractie van stroomlijnen:

$$\phi_H - \phi = \frac{N}{2k_z H} (H^2 - z^2)$$

Het stijghoogteverschil tussen top en basis is $\Delta s_v = \phi_{z=H} - \phi_{z=0}$. Deze verkrijgen we door $z = 0$ in te vullen

$$\Delta s_v = \phi_H - \phi_0 = \frac{NH}{2k_z}$$

Voor de hoogte van het freatisch vlak mogen we de waarde Δs_v optellen bij de gemiddelde grondwaterstand boven de sloten. Dit mag niet voor de grondwaterstijghoogte die wordt gemeten in een waarnemingsfilter op een aantal meters beneden het freatisch vlak. Hier doen we het wel, omdat vooral de hoogte van het freatisch vlak van belang is voor de beoordeling in de Voortoets. Hiermee hebben we de volgende uitdrukking voor de drainageweerstand

$$c = \frac{L^2}{12k_x D} + \frac{L}{\pi k} \ln \left(\frac{D}{\Omega} \right) + \frac{H}{2k_z}$$

Resteert nog om voor de middelste term de anisotropie in rekening te brengen, dat wil zeggen, de verhouding tussen de horizontale en de verticale doorlatendheid.

11.2 Verwerking van verticale anisotropie in de drainageweerstand

De partiële differentiaal vergelijking die de grondwater in het verticale vlak beschrijft is als volgt

$$k_x \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + k_z \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = S_s \frac{\partial \phi}{\partial t} - q = R$$

Hierin staan berging en andere opgelegde stromen aan de rechterzijde van het isgelijktteken. Het rechter lid wordt verder gemakshalve samengevat in de term R .

Vermenigvuldig de termen links met $\frac{k}{k}$

$$\frac{k_x}{k} k \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{k_z}{k} k \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = R$$

waarna we de x - en de y -coördinaat kunnen verscalen en de volgende differentiaalvergelijking wordt verkregen

$$k \frac{\partial^2 \phi}{\partial \left(\sqrt{\frac{k}{k_x}} x \right)^2} + k \frac{\partial^2 \phi}{\partial \left(\sqrt{\frac{k}{k_z}} z \right)^2} = R$$

Deze is te schrijven met coördinaten \bar{x} en \bar{z} , waardoor de vergelijking van een anisotroop pakket overgaat in die van een isotroop watervoerende pakket met k

$$k \frac{\partial^2 \phi}{\partial \bar{x}^2} + k \frac{\partial^2 \phi}{\partial \bar{z}^2} = R$$

Voor de nieuwe coördinaten geldt $\bar{x} = x \sqrt{\frac{k}{k_x}}$ en $\bar{z} = z \sqrt{\frac{k}{k_z}}$. De keuze van doorlatendheid k is geheel vrij. De verscaling maakt bovendien niets uit voor het rechterlid, dus de voeding, de berging en de onttrekking blijven gelijk. Dit geldt voor alle debieten.

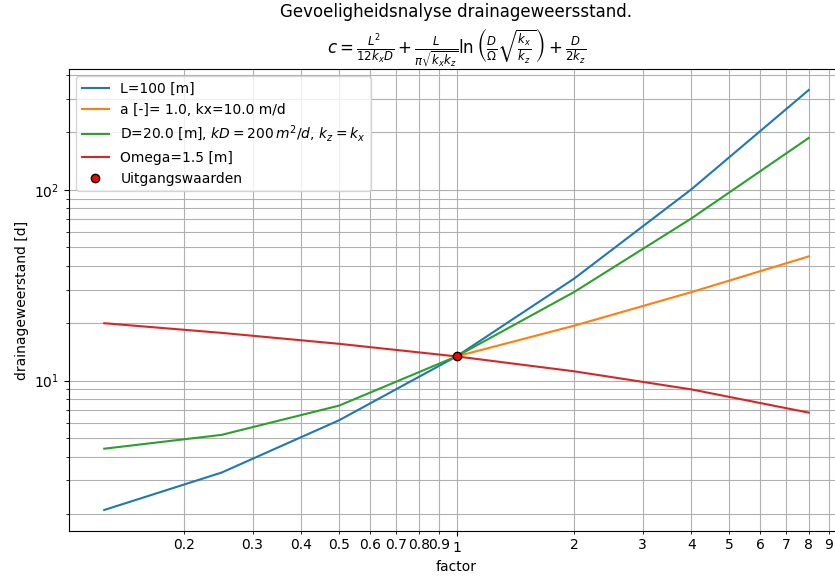
Het is gebruikelijk $k = \sqrt{k_x k_z}$ te kiezen, de verschaling die het dichtst bij de oorspronkelijke doorsnede blijft. Dit betekent dat wanneer we in ons oorspronkelijke pakket x naar \bar{x} en z naar \bar{z} verschalen, we dezelfde stroming en afvoer krijgen, maar dan wel met stijghoogte- en stroomlijnen in een isotroop watervoerend pakket, waarin zij loodrecht op elkaar staan. We kunnen nu de tweede term verschalen, waarin L niet wordt meegenomen omdat die afkomstig was van NL zijnde de totale afvoer van de sloot. Deze blijft ongewijzigd aangezien anders het debiet verandert. Wanneer we accepteren dat de slootbreedte in de praktijk veel groter is dan de slootdiepte, geldt zodat $\Omega \approx b_{\text{sloot}}$, een horizontale lijn, die dus verschaalt wordt met de factor $\sqrt{\frac{k}{k_x}}$, terwijl de verticale pakketdikte D verschaalt wordt met de factor $\sqrt{\frac{k}{k_z}}$. De tweede term in de uitdrukking van de drainageweerstand wordt dan

$$\frac{1}{\pi \sqrt{k_x k_z}} \ln \left(\frac{D_a \sqrt{\frac{k}{k_z}}}{\Omega \sqrt{\frac{k}{k_x}}} \right) = \frac{1}{\pi \sqrt{k_x k_z}} \ln \left(\frac{D}{\Omega} \sqrt{\frac{k_x}{k_z}} \right)$$

De uiteindelijke drainageweerstand wordt hiermee

$$c_a = \frac{L^2}{12k_x D} + \frac{L}{\pi \sqrt{k_x k_z}} \ln \left(\frac{D}{\Omega} \sqrt{\frac{k_x}{k_z}} \right) + \frac{D}{2k_z}$$

Figuur 19 is de weergave van een gevoeligheid van de drainageweerstand voor de factoren die hem bepalen. De dikke rode punt is het resultaat van de uitgangswaarden zoals die in de legenda zijn genoemd: De afstand tussen de sloten $L = 100$ m, verticale anisotropie $a = k_x/k_z = 1$, pakketdikte $D = 20$ m en de de lengte van het contactvlak tussen sloot en watervoerend pakket in de doorsnede $\Omega = 1.5$ m. De lijnen geven aan wat er met de drainageweerstand gebeurt wanneer steeds een van de factoren verandert met een factor die op de horizontale as is weergegeven. Omdat de verticale anisotropie in de praktijk altijd groter is dan 1, loopt de oranje lijn alleen naar rechts. Verder is bij het veranderen van de pakketdikte het doorlaatvermogen, kD , constant gehouden, waardoor de horizontale doorlatendheid, k_x , afneemt. Hierbij is de verticale doorlatendheid steeds gelijk gehouden aan de horizontale, $k_z = k_x$. De keuze van de uitgangswaarden is wat arbitrair, maar zij zijn redelijk in overeenstemming met wat men in de praktijk aantreft. De figuur laat een uitgangswaarde voor de drainageweerstand zien van ca. 13 d, en laat voorts zien dat de drainageweerstand gemakkelijk tussen enkele dagen en enkele honderden dagen kan variëren. Met name de afstand tussen de sloten en de pakketdikte zijn van belang. Hoe groter de pakketdikte, des te meer werkt de contractie van stroomlijnen nabij de sloten door in de totale weerstand. De weerstand door de verticale stroming tussen het freatisch vlak en de basis van het pakket is in de uitgangssituatie $D/(2k_z) = 20/10 = 2$ d, maar bij een verticale anisotropie van $a = 10$ is dit al 20 d, en bij een vijfmaal grotere pakketdikte van 100 m en een vijfmaal kleinere verticale doorlatendheid van 2 m/d heeft deze term een waarde van 50 d, en dat is beslist niet te verwaarlozen. Voor de uitgangswaarden zijn de totale drainage weerstand en de afzonderlijke termen als volgt Voor de uitgangswaarden zijn de waarden van de afzonderlijke termen als volgt $c_{dr} = 13.4 d$, $c_{hor} = 4.2 d$, $c_{rad} = 8.2 d$, $c_{ver} = 1.0 d$. De radiale weerstand is het grootst en neemt sterk toe bij verticale anisotropie, terwijl de horizontale weerstand daarbij constant blijft. Door de dominantie van de radiale weerstand is de grondwaterstand in de praktijk tamelijk vlak tussen de sloten, om sterk te dalen in de buurt daarvan.



Figuur 19: Gevoeligheidsanalyse van de drainageweersstand. Zie tekst voor uitleg. Voor de uitgangswaarden zijn de waarden van de afzonderlijke termen als volgt $c_{dr} = 13.4 d$, $c_{hor} = 4.2 d$, $c_{rad} = 8.2 d$, $c_{ver} = 1.0 d$.

12 Verlaging door puntonttrekking tijdsafhankelijk

Zowel bij irrigatie als bij permanente onttrekkingen in de zomer zal de verlaging tijdsafhankelijk zijn, omdat sloten dan deels of geheel ophouden met het afvoeren van neerslaoverschot. Van belang is daarbij over welke periode de afvoer van de sloten stagneert. Deze periode zal per sloot verschillen. We bovendien een beginsituatie nodig. Daarvoor zouden we kunnen uitgaan van die aan het begin van de zomer, gebaseerd op het schema van Blom. Blom beschouwt alleen permanente stroming, waarbij de ruimtelijke overgang van het binnengebied zonder slootafvoer en het buitengebied met slootafvoer ligt op de cirkel met een verlaging gelijk aan het product van neerslagoverschot en drainageweersstand Nc . Het is duidelijk dat door het droogvallen sloten de radius die het gebied omsluit zonder sloten gedurende de zomer groeit en daarmee ook de verlaging. Met de stijgende grondwaterstanden in de natte herfst trekken de sloten weer bij en stelt zich opnieuw de min of meer permanente wintersituatie is.

Het is niet mogelijk om de stationaire en de tijdsafhankelijke verlaging bij elkaar op te tellen, omdat de onderlinge differentiaalvergelijkingen verschillen. Wat wel kan is de permanente verlaging vergelijken met de tijdsafhankelijke verlaging gedurende de zomer en dan de grootste van de twee als maatstaf te nemen. Deze tijdsafhankelijke verlaging kan met Theis worden berekend om de vereenvoudigde formule van Theis:

$$s \approx \frac{Q}{4\pi k D} \ln \left(\frac{2.25 k D t}{r^2 S} \right)$$

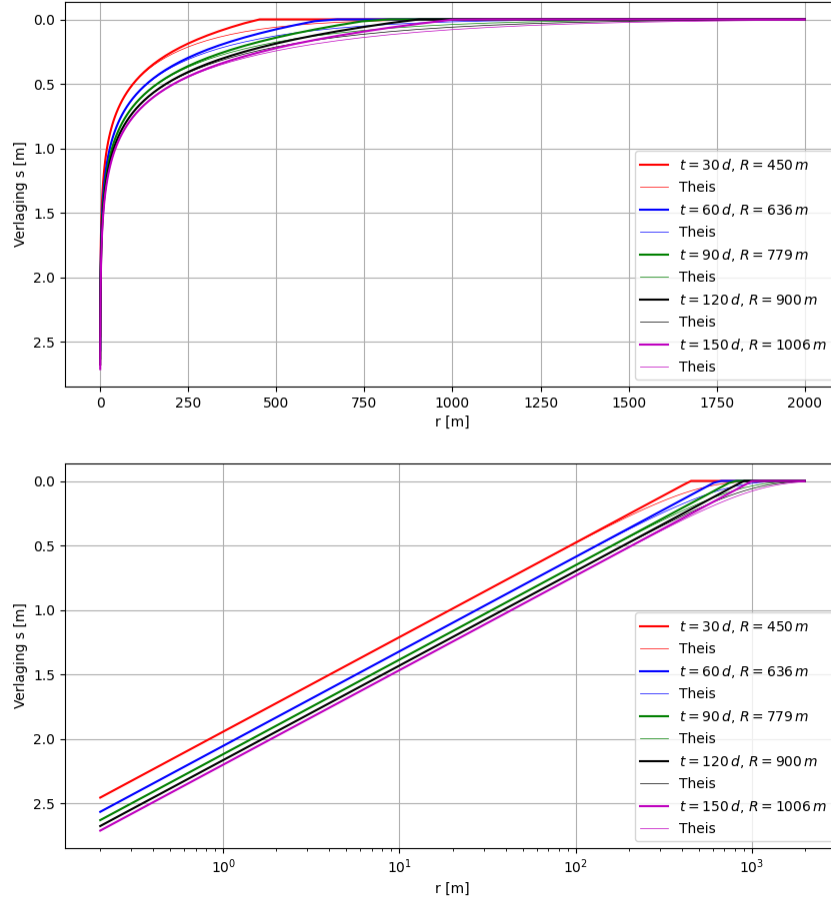
Uitgewerkt wordt dit

$$s \approx \frac{Q}{2\pi k D} \ln \left(\frac{R}{r} \right), \text{ met invloedsstraal } R = \sqrt{\frac{2.25 k D t}{S}} \text{ en } r \leq R$$

Dit lijkt op de stationaire verlaging volgens Dupuit, maar is in feite niet-stationair omdat de invloedsstraal R van t afhangt.

Voor toepassing in de praktijk moet een beslissing worden genomen over de periode t waarover de verlaging zich ontwikkelt. Dit zal een deel van het zomerhalfjaar tot het hele zomerhalfjaar zijn. Vergelijking tussen de grootte van een permanente verlaging volgens Dupuit en de tijdsafhankelijke verlaging volgens Theis,

Tijdsafhankelijke verlaging door put, bijv. gedurende een droge periode zonder randvoorwaarden.
 $kD = 600.0 \text{ m}^2/\text{d}$, $S = 0.2$



Figuur 20: Niet stationaire verlaging en zijn reikwijdte of invloedsstraal op lineaire en logaritmische tijdschaal.

kan dus gemakkelijk door vergelijking van de invloedsstraal. Deze is bij permanente verlaging gelijk aan de gebiedsradius en bij tijdsafhankelijke verlaging gelijk aan de dynamische invloedsstraal.

De verlagingen in figuur 20 zijn zowel uitgezet tegen de tijd op lineaire als op logaritmische schaal. De verlagingenlijnen in de grafiek met de logaritmische tijdas verschuiven in de tijd evenwijdig naar rechts. Het punt waar de verlagingenlijnen de lijn met verlaging nul snijdt is de invloedsstraal. Bij gebruik van de exacte formule van Theis, corresponderende lijnen zijn aangegeven met halve lijndikte in dezelfde kleur, is de verlaging op de invloedsstraal wel groter dan nul, maar voldoende klein om de invloedsstraal als invloedsgrans te gebruiken in de beoordeling van de verlaging.

Bij een gegeven gebiedsstraal R volgt de tijd waarin de tijdsafhankelijke verlaging groter wordt dan de permanente verlaging uit

$$t = \frac{R^2 S}{2.25 k D}$$

Voor de waarden uit het voorbeeld $kD = 600 \text{ m}^2/\text{d}$, $S = 0.2$ en bijvoorbeeld $R = 500 \text{ m}$ volgt $t = 37 \text{ d}$. Dus al binnen een maand. Dit betekent in de praktijk dat de tijdsafhankelijke verlaging in een zomer een

aanzienlijke radius kan bereiken.

13 Lineaire elementen, sleufbemaling of peilregulatie met sloten en grachten

Bij sleufbemaling of peilbeheersing met sloten of grachten (ook drainage) is niet het debiet maar de verlaging het doel, net zoals dat bij bouwputten het geval is. De verlaging $s(u)$ of $s(x, t)$ die optreedt naast een oneindig lange sleuf wanneer in de sleuf plotseling een verlaging s_0 wordt opgelegd, wordt gegeven door

$$s = s_0 \operatorname{erfc}(u), \text{ met } u = \sqrt{\frac{x^2 S}{4kDt}}$$

met $\operatorname{erfc}()$ de complementaire Error functie:

$$\operatorname{erfc}(u) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_u^{\infty} e^{-y^2} dy$$

Met stroming in het pakket gelijk aan

$$\begin{aligned} Q(x, t) &= -kD \frac{\partial s}{\partial x} \\ &= -kDs_0 \frac{2}{\sqrt{\pi}} (-) e^{-u^2} \sqrt{\frac{S}{4kDt}} \end{aligned}$$

zodat

$$Q(x, t) = s_0 \sqrt{\frac{kDS}{\pi t}} e^{-u^2}$$

en het onttrekkingsdebiet gelijk is aan

$$Q(x, t) = s_0 \sqrt{\frac{kDS}{\pi t}}$$

De onttrekking van de sleufbemaling neemt dus af volgens de inverse wortel van de tijd. Maar de verlaging blijft toenemen op elke afstand, met als eindwaarde op opgelegde verlaging s_0 voor elke x . Uiteraard gaat dit draineren op grote afstand van de sleuf uiterst langzaam. Bovendien zullen op grotere afstanden en over de seizoenen heen watergangen aanwezig zijn die het verder uitzakken van het grondwater zullen verhinderen.

Net als voor de analyse van bouwputten is een tijdsafhankelijke berekening zinvol mits de duur wordt beperkt tot hoogstens het zomerhalfjaar.

Natuurlijk heeft de bemaling van een sleuf ook enige aanlooptijd nodig voordat de gewenste verlaging wordt bereikt, maar die periode is altijd kort ten opzichte van de duur van de bemaling en het effect daarvan is verwaarloosbaar voor de verlaging enige tijd na het begin van de bemaling of van de peilverandering.

Een sleufbemaling in een gebied met veel drainagemiddelen zal in een natte periode tot een quasi-permanente verlaging leiden, waar binnen een zekere afstand tot de sleuf de sloten droogvallen en daarbuiten nog enige afvoer van neerslagoverschot over is. Deze situatie kan op dezelfde wijze worden berekend als in het schema van Blom voor radiale stroming. Ook hier wordt gebruik gemaakt van de drainageweerstand en zal de verlaging zich op grotere afstanden gedragen als in een semi-gespannen pakket. De grens tussen het gebied met droge sloten en met nog afvoerende sloten ligt daar waar de verlaging gelijk is aan Nc met N het neerslagoverschot (eventueel te vermeerderen met permanente kwel) en c de drainageweerstand.

De horizontale stroming met afvoer Q in $[m^2/d]$ in plaats van $[m^3/d]$, is als volgt, met Q_0 de (eenzijdige) onttrekking, de toestroming ter plaats van de sleuf

$$Q_x = kD \frac{ds}{dx} = -Q_0 + Nx$$

Na integratie vinden we de verandering van de grondwaterstand, die nog afhangt van een integratieconstante C

$$s = -\frac{Q_0}{kD}x + \frac{N}{2kD}x^2 + C$$

Met $s = Nc$ voor $x = L$ gaat de vergelijking over in

$$Nc = -\frac{Q_0}{kD}L + \frac{N}{2kD}L^2 + C$$

Vergelijking 2 aftrekken van vergelijking 1 elimineert de integratieconstante met als resultaat

$$s_{x < L} - Nc = \frac{Q_0}{kD}(L - x) - \frac{N}{2kD}(L^2 - x^2)$$

Voor afstanden groter dan L is de verlaging minder dan Nc en gedraagt het grondwater zich als semi-ge-spannen met een drainageweerstand. Deze stroming voldoet aan

$$s_{x \geq L} = Nc e^{-\frac{x-L}{\lambda}}$$

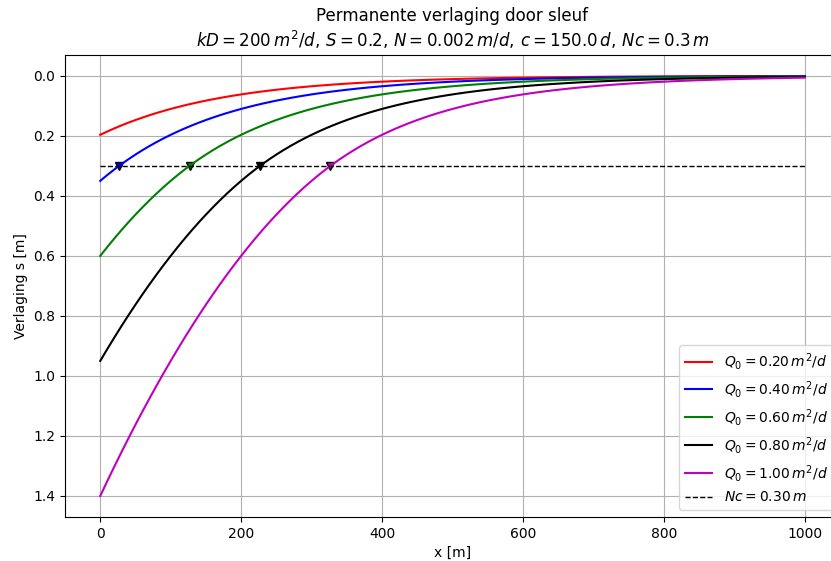
Op de overgang $x = L$ moet de stroming continu zijn zodat

$$-Q_0 + NL = -kD \frac{Nc}{\lambda}$$

Hieruit volgt de gezochte afstand L waar het binnengebied overgaat in het buitengebied en de verlaging gelijk is aan Nc

$$L = \frac{Q_0}{N} - \lambda$$

Hiermee is het grondwaterverloop volledig bepaald.



Figuur 21: Permanente verlaging door onttrekking (of peilregeling) op $x = 0$ zoals bij een sleufbemaling, bij gebruik van de drainageweerstand. In het binnengebied, waar de verlaging groter is dan Nc zijn de sloten droog en daarbuiten voeren zij nog een deel van het neerslagoverschot af. De gebiedsovergang is aangegeven met markers.

Figuur 21 illustreert de beschreven situatie voor verschillend grote onttrekkingen. Waar de verlaging groter is dan Nc zijn de sloten droog. Daarbuiten voeren is hun afvoer van het neerslagoverschot gereduceerd in overeenstemming met de verlaging.

13.1 Beperkte lengte van de sleuf

In de praktijk is de lengte van de bemalen sleuf beperkt tot het traject waarover werkzaamheden zoals de aanleg van een riool aan de gang zijn. De locatie van de sleuf zal met de werkzaamheden mee verschuiven. In elk geval is de lengte beperkt en zullen de verlaginglijnen naar de uiteinden van de sleuf niet meer evenwijdig aan de sleuf zijn, maar om de uiteinden heen buigen om aan de sluiten om de corresponderende verlaginglijnen aan de andere zijde van de sleuf. Het nauwkeurig berekenen kan door de sleuf te berekenen met een lange serie bronnetjes op korte onderlinge afstand, maar ook dat is minder eenvoudig omdat de onttrekking van de bronnen tegen de uiteinden van de sleuf moet toenemen om daar de gewenste verlaging te bereiken. Het berekenen van het debiet van de bronnen dat langs de sleuf niet hetzelfde is maakt ditodeloos complex. Het is gemakkelijker en volstrekt acceptabel om de verlaginglijnen parallel aan de sleuf te houden en aan de uiteinden met halve cirkels met elkaar te verbinden (figuur 10, pagina 16).

14 Bouwput tijdsafhankelijk, maar met vaste verlaging op de bouwputrand

In de tijdsafhankelijke situatie kan de verlaging die door een bemalen bouwput wordt veroorzaakt worden geanalyseerd op basis van de formule van Theis, die ervan uitgaat dat er geen randvoorwaarden zijn die het grondwater vasthouden en geen afdekkende of onderliggende laag waaruit lek wordt opgewekt door de verlaging. Al het onttrokken water komt in deze situatie uit de (freatisch) berging en er is geen stationaire eindsituatie mogelijk. In de praktijk van de lage landen is dat natuurlijk niet het geval, uiteindelijk zullen watergangen de verlaging beperken, met name in de natte jaargetijden, waarin de grondwaterstanden oplopen, slootbodems bereiken en watergangen het overschot afvoeren. Maar voor de droge jaargetijden is de tijdsafhankelijk benadering zinvol en zelfs essentieel om de beïnvloeding van het grondwater door een bemaling te analyseren.

De bemaling van een bouwput zal allereerst het grondwaterniveau binnen de bouwput moeten verlagen tot het gewenste niveau, dat vervolgens moet worden vastgehouden. Om het verlagningsniveau vast te houden, moet de onttrekking vanaf het behalen van het gewenste niveau geleidelijk afnemen omdat de verlaging bij constant debiet voortdurend blijft oplopen. Dit tijdsafhankelijke verloop van de onttrekking heeft ook zijn weerslag op de verlaging verder van de bouwput, maar nauwelijks op de grootte van de invloedsstraal, omdat die onafhankelijk van het onttrekkingsdebiet is.

Een exacte berekening van de afname van de onttrekking van de bouwput om de verlaging op zijn rand constant te houden blijkt ingewikkeld; [Bruggeman (1999)] geeft een analytische oplossing hiervoor, maar die blijkt numeriek bijzonder lastig en vergt ofwel integratie van uitdrukkingen met besselfuncties over meer dan 60 logcycli, dan wel numerieke terugtransformatie van de Laplace getransformeerde uitdrukking.

In plaats hiervan is een voor de praktijk uitstekende benadering mogelijk, namelijk door voor het tijdsafhankelijke debiet op elk moment de waarde te nemen die nodig is om vanaf het begin van de bemaling op datzelfde moment de gewenste verlaging te halen. Dit debiet is de verhouding tussen de gewenste verlaging op de bouwputrand en verlaging die daar tijdsafhankelijk met Theis wordt berekend voor een vast onttrekkingsdebiet van $Q = 1 \text{ m}^3/\text{d}$.

$$s_{t,b,Q=1} = \frac{Q=1}{4\pi kD} W(u) \rightarrow Q_t \approx \frac{s_b}{s_{t,b,Q=1}}$$

Het debiet over de aanlooptijd t_b zetten we constant gelijk aan Q_{t_b} , zodat aan het eind van de aanlooptijd de gewenste verlaging is bereikt. Het met deze formule verkregen tijdsafhankelijke debiet is iets te groot, maar het verschil met de echte waarde is in de praktijk te verwaarlozen.

Met het verkregen tijdsafhankelijke is vervolgens invoer voor de berekening van de tijdsafhankelijke verlaging voor gekozen afstand en de gehele tijdsperiode. Deze verlaging wordt berekend door gebruik te maken van de blokrespons van de Theis formule. De blokrespons is het resultaat van een eenheidsonttrekking

$Q = 1 \text{ m}^3/\text{d}$ gedurende een tijdstap (1 dag). De blokrespons B_R wordt verkregen door de staprespons vanaf $t = 1$ te verminderen met die vanaf $t = 0$. De staprespons is de formule van Theis voor $Q = 1$:

$$B_R = \frac{1}{4\pi k D} \{W(u_{t \geq 0}) - W(u_{t - \Delta t \geq 0})\}$$

waarin Δt de tijdstap in de tijdreeks is (meestal 1 dag). De verlaging van de grondwaterstand op een willekeurige plek en tijd wordt nu verkregen door convolutie. Dat wil niets anders zeggen dan berekend middels een voortschrijdend gemiddelde over de onttrekking in het verleden, gewogen met de in de tijd omgekeerde blokrespons. Python heeft hiervoor een standaard functie ‘lfilter’ in de wetenschappelijke module ‘scipy.signal’. De aanroep

$$s = \text{lfilter}(B_R, 1, Q_t)$$

is alles wat nodig is om de tijdsafhankelijke verlaging daadwerkelijk uit te rekenen voor en gekozen afstand ($u = \frac{r^2 S}{4k D t}$) en de volledige tijdreeks. Door voor de afstand de radius van de bouwput te kiezen, kan worden gecontroleerd in hoe nauwkeurig en constant de verlaging op de bouwput rand op de gewenste waarde wordt gehouden bij deze tijdsafhankelijke onttrekking.

Figuur 22 geeft het resultaat van deze berekening met boven het na de aanloopperiode van 14 dagen afnemende onttrekkingsdebiet en beneden de tijdsafhankelijke verlaging op de bouwputrand $r = 25 \text{ m}$ en een aantal andere afstanden. De verlaging op de bouwputrand is door de vereenvoudigde berekeningswijze iets groter dan het doel van 5 m, maar het scheelt weinig en de verlaging op de bouwputrand wordt in de tijd goed constant gehouden.

Het is van belang op te merken dat de verlaging in deze op Theis gebaseerde berekeningswijze blijft toenemen. Het is dus van belang de duur te beperken tot de actuele bemalingsduur of tot de duur van de zomer wanneer de sloten worden verondersteld geen contact meer met het grondwater te hebben.

15 Bruggeman’s oplossing 370_01: Bron in semi-gespannen laag met sprong in de eigenschappen

Bruggeman geeft een analytische oplossing (Nr. 370_01) van belang kan zijn voor het berekenen van de verlaging wanneer we te maken hebben met een overgangsgebied, zoals waar een hoog gebied zonder drainage overgaat in een laag en nat gebied met veel drainage [Bruggeman (1999)]. De oplossing van Bruggeman is voor de verlaging door een bron in een semi-gespannen watervoerend pakket waarvan het doorlaatvermogen en de weerstand van de afdekkende laag op $x = 0$ verspringen. Het genoemde voorbeeld kunnen we hiermee uitrekenen door voor het hoge gebied een grote weerstand te kiezen en voor het aangrenzende lage gebied de drainageweerstand, terwijl het doorlaatvermogen in beide gebieden hetzelfde is.

De oplossing zelf lijkt complex, maar is goed te implementeren en dan gewoon als elke putformule te hanteren.

Voor $x < 0$ is de stijghoogte gelijk aan $\phi_1(x, y)$

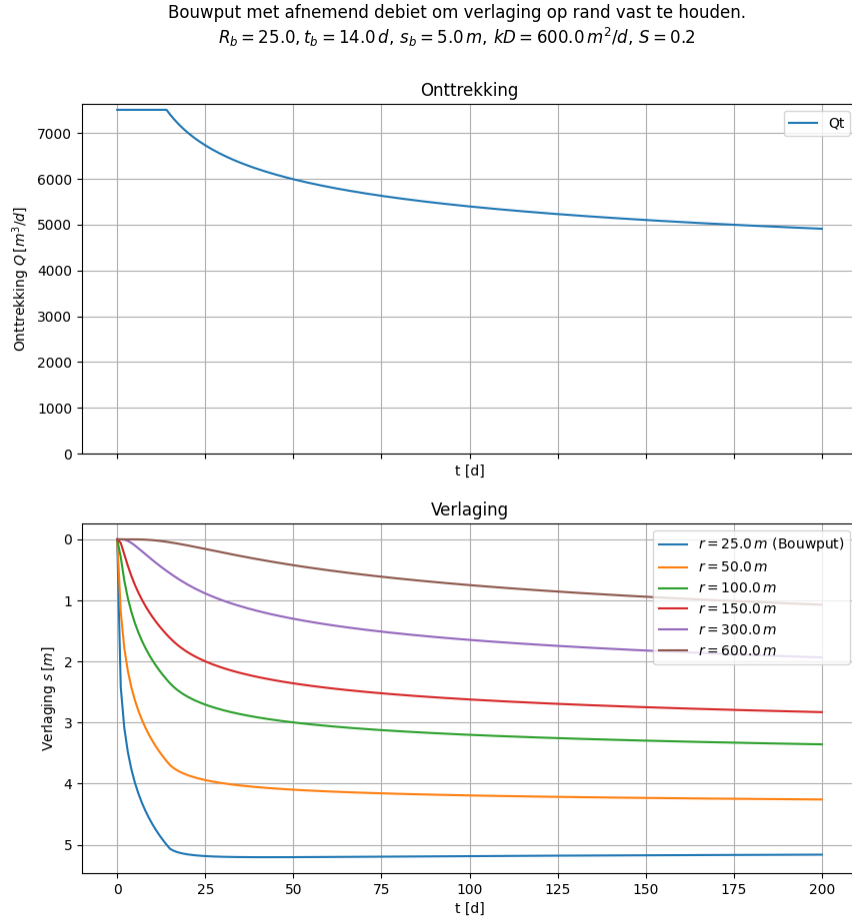
$$\phi_1(x, y) = \frac{Q}{\pi} \int_0^\infty A(\zeta) \exp\left(x \sqrt{\zeta^2 + \frac{1}{\lambda_1^2}}\right) \cos(y\zeta) d\zeta$$

en voor $x \geq 0$ is de stijghoogte gelijk aan $\phi_2(x, y)$

$$\phi_2(x, y) = \frac{Q}{2\pi k_2 D_2} \left[K_0 \left\{ \frac{\sqrt{(x - x_w)^2 + y^2}}{\lambda_2} \right\} - K_0 \left\{ \frac{\sqrt{(x + x_w)^2 + y^2}}{\lambda_2} \right\} \right]$$

De functie $A(\zeta)$ is

$$A(\zeta) = \frac{\exp\left(-x_w \sqrt{\zeta^2 + \frac{1}{\lambda_2^2}}\right)}{k_1 D_1 \sqrt{\zeta^2 + \frac{1}{\lambda_1^2}} + k_2 D_2 \sqrt{\zeta^2 + \frac{1}{\lambda_2^2}}}$$



Figuur 22: Bouwput met afnemend debiet om de verlaging op de bouwputrand ($r = 20$ m) constant te houden op 5 m.

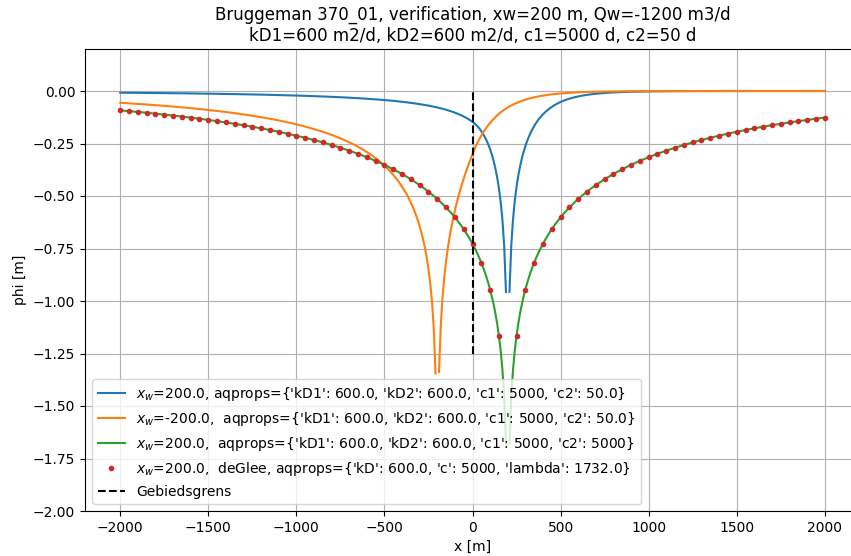
met

$$\lambda_1 = \sqrt{k_1 D_1 c_1} \text{ en } \lambda_2 = \sqrt{k_2 D_2 c_2}$$

en $x_w \geq 0$ is de x -coördinaat van de bron.

Berekenen van de verlaging voor $x < 0$ kan eenvoudig door de gebiedsparameters te verwisselen en x door $-x$ in de berekening te vervangen. In de implementatie gebeurt dit automatisch wanneer de put-coördinaat negatief is.

Figuur 23 illustreert de toepassing van oplossing 370_01 van Bruggeman voor een sprong in de weerstand boven de semi-ge-spannen aquifer [Bruggeman (1999)]. In de figuur is de weerstand rechts van de gebiedsgrens ($x > 0$) veel kleiner ($c = 50$ d) dan links ($c = 5000$ d) terwijl het doorlaatvermogen aan beide zijden hetzelfde is. Het verschil in weerstand komt tot uiting in een veel steilere helling in de verlaging wanneer de put zich rechts van de gebiedsgrens bevindt (blauwe lijn) dan wanneer deze er links van staat (oranje lijn). Wanneer behalve het doorlaatvermogen ook de weerstand aan beide zijden van de gebiedsgrens hetzelfde is, moet de oplossing van Bruggeman gelijk zijn aan die volgens De Glee. De groen lijn en de lijn van rode puntjes laten zien dat dit inderdaad het geval is. De berekening voor de put die links van de gebiedsgrens staat is gedaan door de gebiedseigenschappen te verwisselen en het teken van de x -coördinaten om te draaien.



Figuur 23: Toepassing oplossing 370_01 uit [Bruggeman (1999)]. Toelichting zie tekst.

Referenties

- [Blom (1973)] Blom, J. (1973). Verlagenen van het freatisch vlak bij grondwateronttrekking in een gebied met vrije afwatering. RID mededeling 74-7. Rijkswaterstaat Instituut Drinkwatervoorziening, Den Haag.
- [Bot (2016)] Bot, B (2016) Grondwaterzakboekje. Gzw 2016. ISBN-EAN 978-90-817869-1-1. 456pp.
- [Bruggeman (1999)] Bruggeman GA (1999) Analytical solutions of geohydrological problems. Nr. 46 in the series Developments in Water Science. Elsevier and RIVM. ISBN 0-444-81829-4. 959pp.
- [Bronders et al. (2013)] Bronders J, Patyn J, Van Keer I, Desmet N, Vos J, Peelaerts Q, Decorte L, Gobin A. (2013) Voortoets, Module 3 - Inhoudelijke uitwerking van module 3 in de online toepassing van de voortoets: het bepalen van de reikwijdte van effecten voor de indirecte effectgroepen - Thema grondwater. Studie uitgevoerd in opdracht van ANB, 2013/RMA/R/120. VITO NV, Mol, B. 84pp.
- [De Glee (1930)] De Glee, C. (1930). De invloed van grondwateronttrekkingen op de grondwaterstand. Proefschrift, Universiteit van Amsterdam.
- [Natuur en Bos (2021)] Natuur en Bos (2021) Leidraad Grondwatermodellering. https://pww.natuurenbos.be/sites/default/files/2021-09/bijlage_leidraad_grondwatermodellering_0_0.pdf. Beschrijft de formules van Verruijt.
- [Verruijt (1982)] Verruijt A (1982) Groundwater Flow. 2nd Edition. ISBN 0-333-32958-7. 144pp.