



Berekeningsgrondslagen achter de beschermingszones van drinkwaterwinningen

Een best modelling practice voor
verblijftijdenmodellering

BTO 2013.028
Mei 2013

Berekeningsgrondslagen achter de beschermingszones van drinkwaterwinningen

Een best modelling practice voor
verblijftijdenmodellering

BTO 2013.028
Mei 2013

© 2013 KWR

Alle rechten voorbehouden.

Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand, of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen, of enig andere manier, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de uitgever.

Colofon

Titel

Berekeningsgrondslagen achter de beschermingszones van drinkwaterwinningen: een best modelling practice voor verblijftijdenmodellering

Opdrachtnummer

B111797

Rapportnummer

BTO 2013.028

Onderzoeksprogramma

Onderzoeksprogramma

Projectmanager

Jan Willem Kooiman

Opdrachtgever

CvO

Kwaliteitsborgers

Willem Jan Zaadnoordijk (KWR)

Ben van der Wal (Royal Haskoning DHV)

Auteurs

Carolien Steinweg (Royal Haskoning DHV), Cors van den Brink (Royal Haskoning DHV), Martin van der Schans (KWR) en Arnaut van Loon (KWR)

Verzonden aan

Martin de Jonge (Vitens), Roger Hoofs (WML), Mark Eck (Brabant Water), Pieter Dammers (Dunea)

Dit rapport is verspreid onder BTO-participanten en is openbaar.

Samenvatting

Verblijftijdmodelleringen vormen de basis van zowel de planologische grenzen van beschermingszones als voor de risicobeoordeling van kwetsbare winningen. De betrouwbaarheid van verblijftijdmodelleringen is echter vaak onbekend en de definities van verschillende beschermingszones passen niet noodzakelijkerwijs bij de fysische werkelijkheid. Hierdoor zijn de drinkwaterbedrijven in een aantal gevallen onzeker over de doelmatigheid van beschermingszones. Beschermingszones omvatten bijvoorbeeld niet altijd de kwetsbare gebiedsdelen van intrekgebieden. Aan de andere kant wordt maatschappelijk draagvlak voor beschermingsgebieden ondermijnd wanneer hiervoor aan te grote gebieden ruimtelijke beperkingen worden opgelegd.

Met dit rapport wordt beoogd om bij te dragen aan het handelingsperspectief van drinkwaterbedrijven wat betreft de risicobeheersing in dergelijke situaties. Hiertoe wordt eerst een overzicht gegeven van de definities van verschillende beschermingszones zoals die door verschillende provincies worden gehanteerd. Vervolgens worden de technische uitgangspunten die toegepast worden voor het berekenen van verblijftijdzoneringen op hoofdlijnen geïnventariseerd en beschouwd. Tenslotte wordt een advies geformuleerd ten behoeve van het vergroten van het handelingsperspectief van de drinkwaterbedrijven met betrekking tot het vaststellen van verblijftijdzoneringen.

De 12 Nederlandse provincies hanteren onderling sterk verschillende definities voor de beschikbare beschermingszones waar activiteiten omwille van de bescherming van drinkwaterbronnen beperkt zijn. Deze verschillen zijn zowel de bepalende verblijftijdendrempel, als de voorgeschreven diepte waarop de verblijftijd moet worden berekend. Zo hanteert de Provincie Limburg voor het grondwaterbeschermingsgebied een verblijftijdendrempel van 25 jaar voor het bepompte pakket, terwijl de Provincie Zuid-Holland hiervoor een verblijftijdendrempel van 50 jaar vanaf de grondwaterspiegel hanteert. Daarnaast zijn er verschillen in het aantal beschermingszones dat gehanteerd wordt. Zo heeft de Provincie Overijssel rond elke kwetsbare winning een waterwingebied, een grondwaterbeschermingsgebied, een boringsvrije zone en een intrekgebied gedefinieerd. De achtergronden van deze verschillen zijn waarschijnlijk van fysisch-chemische maar ook beleidsmatige aard, maar zijn anno 2013 niet meer in alle gevallen te achterhalen.

Vanwege de verwevenheid van 'een goed model' en 'het doel van de modellering' hoeft een model niet altijd het aller beste model te zijn dat er te maken is. Wel moet duidelijk zijn waarom het model goed of tenminste goed genoeg is. Op basis van een beknopte analyse van relevante literatuur en het houden van interviews met experts is een overzicht gemaakt van stappen die onderdeel zijn van het maken van 'een goed model' of anders gezegd, die invulling geven aan een 'Good Modelling Practice'. De resultaten van deze analyse zijn verwerkt tot een samenvattende tabel. De tabel met daarin de Best Modelling Practice is opgebouwd via twee assen. De eerste as (verticale as) geeft aan welke stappen er doorlopen moeten worden en de tweede as (horizontale as) geeft aan hoe die stappen ingevuld kunnen worden. De stappen die doorlopen worden zijn (1) bestuurlijke uitgangspunten, (2) conceptueel model, (3) opzetten model, (4) kalibratie, (5) validatie, (6) gebruik van het model, (7) interpretatie van resultaten, (8) oplevering en verslaglegging. De voorgestelde best modelling practice verhoogt de inhoudelijke kwaliteit van de verblijftijdmodellering en maakt de onderbouwing en borging van de berekening expliciet en reproduceerbaar. Dit draagt bij aan een verbeterde doelmatigheid van beschermingszones en ondersteunt de risicobeoordeling.

Inhoud

Samenvatting	1
Inhoud	2
1 Inleiding	5
2 Methode	6
2.1 Inventarisatie van de definities van beschermingszones	6
2.2 Inventarisatie en beschouwing van de technische uitgangspunten van verblijftijdenmodelleringen	6
2.2.1 Overzicht	6
2.2.2 Literatuuronderzoek	6
2.2.3 Interviews met experts	7
3 Definities van beschermingszones	9
3.1 Overzicht	9
3.2 Waterwingebied	11
3.3 Grondwaterbeschermingsgebied	11
3.4 Boringsvrije zone	13
3.5 100-jaarsaandachtsgebied/ intrekgebied	13
3.6 Overige beschermingszones	14
3.6.1 50-jaarszone	14
3.6.2 Strategische zoetwatervoorraad	14
3.7 Casus: Grondwaterbescherming op de Venloschol	14
4 Best modelling practice voor verblijftijdberekeningen	17
4.1 Huidige praktijk	17
4.2 Inleiding	17
4.3 Bestuurlijke uitgangspunten	18
4.4 Een goed model	18
4.4.1 Conceptueel model	19
4.4.2 Opzetten model	19
4.5 Kalibratie	21
4.6 Validatie	22
4.7 Gebruik van het model	23
4.8 Interpretatie resultaten	23
4.9 Oplevering / Verslaglegging	23
5 Conclusie en aanbeveling	24
5.1 Conclusies	24

5.2	Aanbeveling	24
I	Resultaten van de interviews	26
II	Best modelling practice	38
III	Voorbeeld van een conceptueel model	43

1 Inleiding

De bescherming van de kwaliteit van grondwater dat bestemd is voor drinkwaterproductie is sinds de jaren 1960 in ontwikkeling. Hiertoe werden vanaf deze periode, en in eerste instantie in autonome provinciale milieuverordeningen, diverse beschermingszones rond de winmiddelen vastgesteld (Paalman en Van Loon, 2012). Anno 2013 is de grondwaterbescherming geborgd door middel van provinciale verordeningen (Wet Milieubeheer). Deze verordeningen zijn vaak geënt op vier beschermingszones met uiteenlopende beschermingsniveaus, namelijk het waterwingebied, het grondwaterbeschermingsgebied, de boringsvrije zone en het intrekgebied. Deze beschermingszones liggen als schillen om de winmiddelen heen en de bijbehorende planologische grenzen zijn hoofdzakelijk geënt op verblijftijdzoneringen. De doelmatigheid van de beschermingszones is hierdoor enerzijds afhankelijk van de beleidsmatige berekeningsgrondslagen die aan het vaststellen van de zones ten grondslag heeft gelegen. Anderzijds is deze doelmatigheid afhankelijk van de technische uitvoering van de berekening van verblijftijdzoneringen.

Verblijftijdmodelleringen vormen de basis van de planologische grenzen van beschermingszones. Daarnaast vormen ze een belangrijk onderdeel van de risicobeoordeling van kwetsbare winningen. Herberekeningen van verblijftijden leveren vaak resultaten op die afwijken van de resultaten van eerdere berekeningen, ook als aan de uitgangspunten voor de berekening niets veranderd is. Bovendien is validatie van de verblijftijdberekeningen slechts beperkt mogelijk. Planologische grenzen wijken dan ook in de praktijk vaak af van de fysische werkelijkheid. Hierdoor is de doelmatigheid van de planologische grenzen in veel gevallen onzeker. Omdat dit voor de drinkwaterbedrijven een ongewenste situatie is, is de sector op zoek naar mogelijkheden om hun handelingsperspectief hierop te vergroten. Een van de mogelijkheden is het opstellen van richtlijnen voor de modellering van verblijftijden, zodat de onzekerheid over berekende verblijftijden enigszins beperkt wordt en inzichtelijk worden gemaakt.

Het doel van dit project is om bij te dragen aan het verbeteren van het handelingsperspectief van drinkwaterbedrijven wat betreft de risicobeheersing. Hierbij staat de onzekerheid in de doelmatigheid van de beschermingszones als gevolg van de beleidsmatige uitgangspunten en de technische uitvoering van verblijftijdberekeningen centraal. Eerst wordt een overzicht gegeven van de definities van verschillende beschermingszones zoals die door verschillende provincies worden gehanteerd. Vervolgens worden de technische uitgangspunten die in de praktijk worden toegepast voor het berekenen van verblijftijdzoneringen op hoofdlijnen geïnventariseerd en beschouwd. Tenslotte wordt een advies geformuleerd ten behoeve van het vergroten van het handelingsperspectief van de drinkwaterbedrijven met betrekking tot het vaststellen van verblijftijdzoneringen.

2 Methode

2.1 Inventarisatie van de definities van beschermingszones

De definities van verschillende beschermingszones zoals die door verschillende provincies worden gehanteerd zijn geïnventariseerd op basis van literatuuronderzoek. De geraadpleegde literatuur bestaat exclusief uit openbare bronnen die beschikbaar zijn via internet. Dit zijn vooral de provinciale milieuverordeningen. Per provincie zijn de volgende kenmerken geïnventariseerd:

- Type beschermingszones; welke zones worden beschermd door provinciaal milieubeleid¹ of ruimtelijk beleid²?
- Verblijftijdrempel; wat is de maximale reistijd van deeltjes vanaf de rand van de beschermzone naar de drinkwaterwinning?
- Diepte; vanaf welke diepte of voor welke geohydrologische eenheden is de verblijftijd bepaald?
- Overige grondslagen; hanteert de provincie naast verblijftijd en diepte nog andere eenheden voor ruimtelijke afbakening van beschermingszones?
- Onderscheid tussen type beschermingszones; wanneer wordt een grondwaterbeschermingszone gehanteerd en wanneer een boringsvrije zone?

2.2 Inventarisatie en beschouwing van de technische uitgangspunten van verblijftijdenmodelleringen

2.2.1 Overzicht

De gehanteerde technische uitgangspunten van verblijftijdmodelleringen zijn geïnventariseerd door middel van een literatuuronderzoek en een interviewronde langs een aantal experts. Het literatuuronderzoek en de interviews met experts is parallel uitgevoerd. De volgende aspecten zijn geïnventariseerd:

- 1) de wijze waarop onzekerheden over het onderliggende grondwatermodel, die doorwerken op de modellering van verblijftijden, zijn ingeperkt of inzichtelijk zijn gemaakt;
- 2) de simulatieprogramma's die zijn toegepast en de beperkingen die dat met zich meebrengt;
- 3) gehanteerde modelschematisaties, zoals criteria voor het beëindigen (bv instellingen voor weak sinks/strong sinks), forward/backward tracking, het beginpunt van de stroombanen;
- 4) de aspecten die samenhangen met de schematisatie van de interactie tussen grondwater en oppervlaktewater;
- 5) De wijze waarop verblijftijden in de onverzadigde zone zijn meegenomen;
- 6) De databronnen waarop modelparameters (bv porositeit) zijn gebaseerd;
- 7) De wijze waarop verblijftijdmodellen zijn gevalideerd;
- 8) de wijze waarop met onzekerheden over de resultaten is omgegaan.

2.2.2 Literatuuronderzoek

Het literatuur onderzoek heeft als doel om de huidige praktijk van verblijftijdzone modellering in beeld te brengen en de huidige discussies over de onzekerheden in verblijftijdmodellering te bundelen. Het in beeld brengen van de huidige praktijk is uitgevoerd door bij provincies, waterbedrijven en adviesbureaus rapporten op te vragen over verblijftijdmodelleringen die naar mening van de geïnterviewde een adequaat beeld geven van de huidige praktijk.

Het literatuuronderzoek valt uiteen in drie delen. Ten eerste is gebruikt gemaakt van vakliteratuur. Deze vakliteratuur is samengesteld door het uitvoerende projectteam. Dit team heeft ook de te interviewen

¹ Milieubeleid is verankerd in de Provinciale Milieu Verordening of Omgevingsverordening

² Ruimtelijk beleid voor grondwaterbescherming is verankerd in een structuurvisie of beleidsplannen

experts geselecteerd. Hierbij is een getrapte werkwijze gehanteerd. Dat wil zeggen dat na enkele interviews de tussenresultaten zijn geëvalueerd om op basis daarvan de nadere invulling van het project bij te sturen.

Na de interviews met de experts is een aanvullend literatuuronderzoek uitgevoerd en is een lijst met experts opgesteld. In het tweede deel van het literatuuronderzoek is gebruikt gemaakt van rapportages van modelleringen die een representatief beeld geven van de huidige praktijk. Hiervoor zijn die rapportages gebruikt, waarvan de experts hebben aangegeven dat ze een representatief beeld geven van de huidige praktijk. In het derde deel zijn belangrijke referenties in de opgevraagde rapportages geraadpleegd om de inventarisatie aan te vullen en is aanvullende literatuur gebruikt ter onderbouwing van de resultaten.

2.2.3 Interviews met experts

Door het uitvoerend projectteam zijn te interviewen experts geselecteerd. Met deze experts zijn onder meer de resultaten van het literatuuronderzoek besproken. Om een zo breed mogelijk scoop te krijgen van mogelijke reacties zijn personen geselecteerd van adviesbureaus, waterleidingbedrijven en overheden. De geïnterviewde personen zijn:

- Mark Emke (Royal HaskoningDHV).
- Nico van der Moot (WMD).
- Vera Lagendijk (Vitens).
- Birgitta Putters (WML).
- René van Elswijk (provincie Utrecht).
- Eric Castenmiller (provincie Limburg)
- Kees Vink (Vink Hydro Advies)
- Thomas de Meij (provincie Overijssel)

In de interviews vormden de aspecten die in het literatuuronderzoek zijn onderzocht de basis voor het gesprek. Ook is tijdens de interviews met de experts gesproken over voorstellen om verblijftijdmodellering te verbeteren en is de opzet van de tabel (zie bijlage 1) besproken en gaandeweg verder aangepast.

3 Definities van beschermingszones

3.1 Overzicht

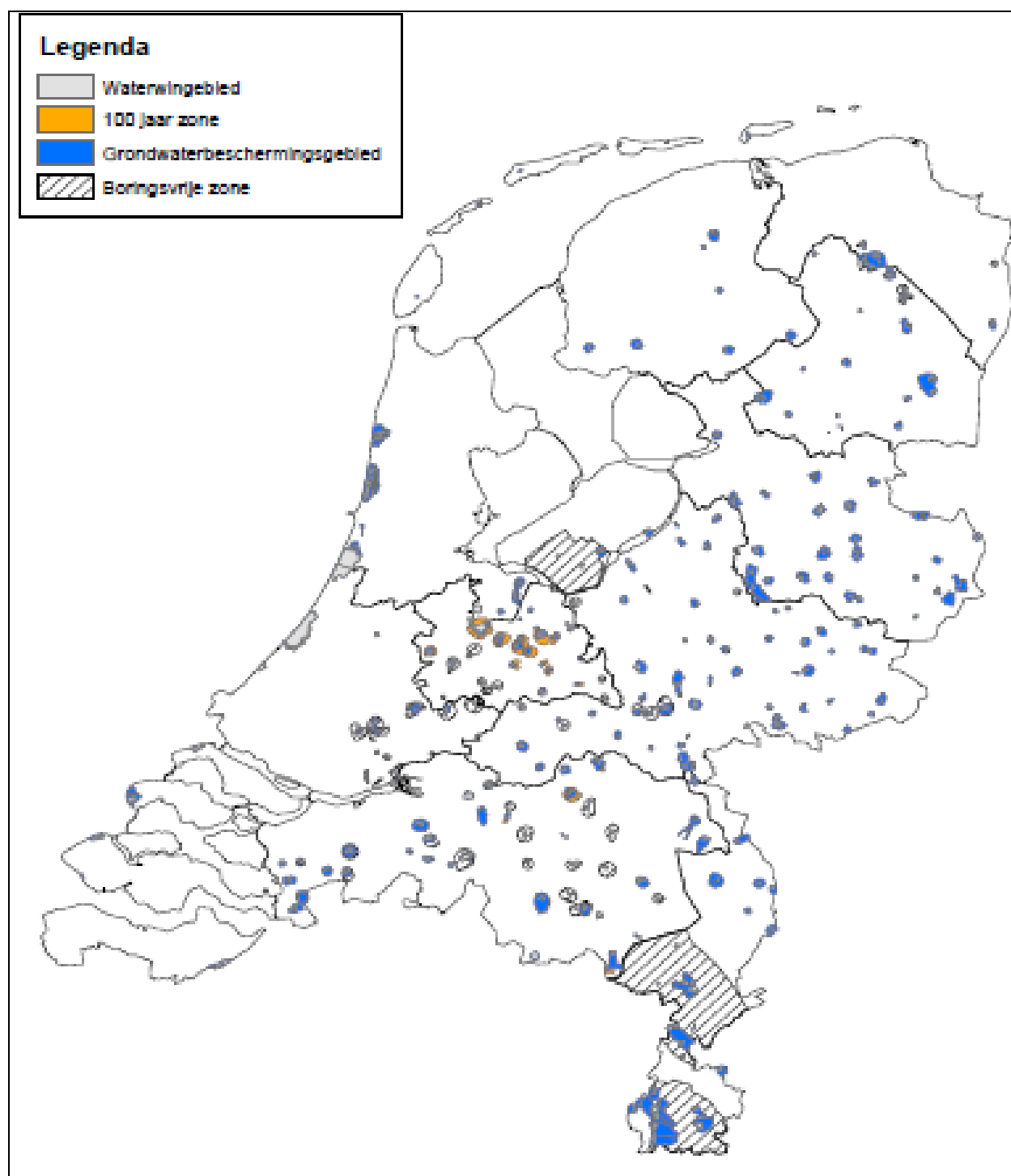
De bescherming van drinkwaterwinningen is uitgewerkt in verschillende beschermingszones die als schillen om elkaar heen liggen:

- Het waterwingebied is de locatie waar de onttrekkingsputten liggen. Het gebied is vaak in eigendom van het waterleidingbedrijf. Omdat de waterwingebieden erg kwetsbaar zijn geldt hier het strengste beschermingsniveau via zowel milieubeleid en ruimtelijk beleid.
- Grondwaterbeschermingsgebieden bieden bescherming van de drinkwatervoorziening tegen bedreigingen vanaf maaiveld via zowel milieu- als ruimtelijk beleid.
- Een boringsvrije zone kan worden ingesteld bij onttrekkingen onder een afscheidende kleilaag om doorboring van deze laag te voorkomen. Bescherming is geborgd via milieubeleid.
- Een aantal provincies hanteert daarnaast nog andere beschermingszones zoals het intrekgebied. Bescherming is in de regel geborgd via ruimtelijk beleid.

Figuur 3.1 geeft een overzicht van deze beschermingszones in Nederland. In Tabel 3.1 is aangegeven welke beschermingszones de provincies hanteren en hoe deze zones zijn gedefinieerd. Uit deze figuur en tabel blijkt dat het beschermingsbeleid per provincie anders is vormgegeven. Dit wil echter niet zeggen dat de doelmatigheid van de beschermingszones per provincie verschillend is. Het besluit tot het definiëren van een beschermingszone is als het goed is op fysische en chemische gronden gebaseerd. Desondanks zijn er gevallen bekend waar de beschermingszones gedeeltelijk buiten het intrekgebied liggen, zodat de kwetsbare gebiedsdelen van het intrekgebied niet goed beschermd worden. Voorbeelden zijn de winning Deventer (Vitens) en de winningen uit de Venlo-schol (Grubbenhorst, Houthuizen, Californie, en Hanik) van WML. Door de complexe geohydrologische opbouw en geohydrologische eigenschappen is het stromingspatroon naar deze winningen zeer lastig te simuleren zodat verblijftijdberekeningen weinig betrouwbaar zijn. Hierdoor is de boringsvrije zone rond de winning te Deventer niet goed gepositioneerd ten opzichte van de verblijftijdzonering en liggen de beschermingszones op de Venlo-schol gedeeltelijk buiten het intrekgebied van deze winningen. In deze specifieke gevallen zijn de beschermingszones weinig doelmatig, omdat de beschermingszones niet geheel overlappen met de meest kwetsbare delen van het intrekgebied (zie Kader I).

Wat opvalt, is dat de grondslagen voor beschermingszones voor een aantal provincies niet zijn te achterhalen uit de milieuverordeningen en andere internetbronnen. Deze informatie is vermoedelijk wel opgenomen in de technische rapportages die ten grondslag liggen aan de beleidsdocumenten, maar deze zijn in het kader van dit onderzoek niet opgevraagd bij de provincies. Het is belangrijk dat deze informatie beschikbaar is (en blijft) voor een eventuele toekomstige herberekening van de beschermingszones. Het hanteren van andere uitgangspunten kan namelijk consequenties hebben voor de omvang van de beschermingszone. Dit wordt hieronder nader toegelicht.

Merk op dat een aantal provincies de begrenzing van beschermingszones heeft aangepast zodat deze beter aansluit bij de kadastrale grenzen. Bijvoorbeeld door de begrenzing aan te laten sluiten bij de ligging van een weg of perceelsgrens. Dit maakt de grenzen duidelijk herkenbaar op kaart en in het veld en bevordert zo de handhaafbaarheid.



Figuur 3.1: Overzicht grondwaterbeschermingszones in Nederland. Opgemerkt wordt dat bij verder inzoomen van deze kaart meer details zicht worden (bron: Paalman, M & A. van Loon 2012)

Tabel 3.1: Afbakening grondwaterbeschermingszones per provincie. Per zone zijn de verblijftijdrempel aangegeven alsmede vanaf welke diepte de verblijftijdrempel is bepaald.

Provincie	Water- wingebied	Grondwater- beschermingsgebied	Boringsvrije zone	Overige zones
Brabant	60 dagen	25, 100 jaar	25 (?) jaar onder kleilaag	
Drenthe	60 dagen 30 meter	100 jaar vanaf maaiveld	25 jaar in het wvp	
Flevoland	?	25 jaar	Afgebakend gebied in bepompt wvp*	100-jaar intrekgebied
Friesland	?	25 jaar	n.v.t.	
Gelderland	1 jaar	25 jaar	25 jaar	
Groningen	?	?	?	?
Limburg	60/100 dagen	25 jaar vanaf top wvp*/ in bovenste wvp*	Boringsvrije zone Roerdalslenk en Venloschol	
Noord-Holland	60 dagen; 30 meter	25, 100, 200 jaar in bepompt wvp*	n.v.t.	
Overijssel	60 dagen	25 jaar in bepompt wvp*	25 jaar onder kleilaag	100-jaar intrekgebied
Utrecht	60 dagen; 30 meter	25 jaar in bovenste wvp*	25 jaar per wvp	50-jaarszone; IUH **; 100-jaarsaandachts- gebied
Zeeland	60 dagen; 30 meter	25 jaar winpakket	n.v.t.	
Zuid-Holland	60 dagen; 30 meter	50 jaar vanaf grondwaterspiegel	50 jaar in het wvp	Strategische zoetwatervoorraad

* wvp = watervoerende pakket

** IUH = Infiltratiegebied Utrechtse Heuvelrug

3.2 Waterwingebied

Het waterwingebied omvat het gebied rond de putten met een minimale verblijftijd van 60 dagen in het watervoerend pakket met een minimum van 30 meter vanaf de individuele winputten. Uitzondering is de provincie Gelderland waar een reistijd van 1 jaar wordt gehanteerd. Er wordt aangenomen dat een periode van 60-dagen in het bodemmilieu voldoende lang is voor een zodanige afbraak van schadelijke microben dat er geen gevaar voor de volksgezondheid meer dreigt.

3.3 Grondwaterbeschermingsgebied

Het grondwaterbeschermingsgebied omvat bij de meeste provincies een 25-jaarszone gerekend vanaf de winning. De Provincies Noord-Holland en Brabant hanteren een langere verblijftijd van 100 jaar rondom kwetsbare winningen. Drenthe en Zuid-Holland hanteren voor alle winningen een termijn van respectievelijk 100 en 50 jaar.

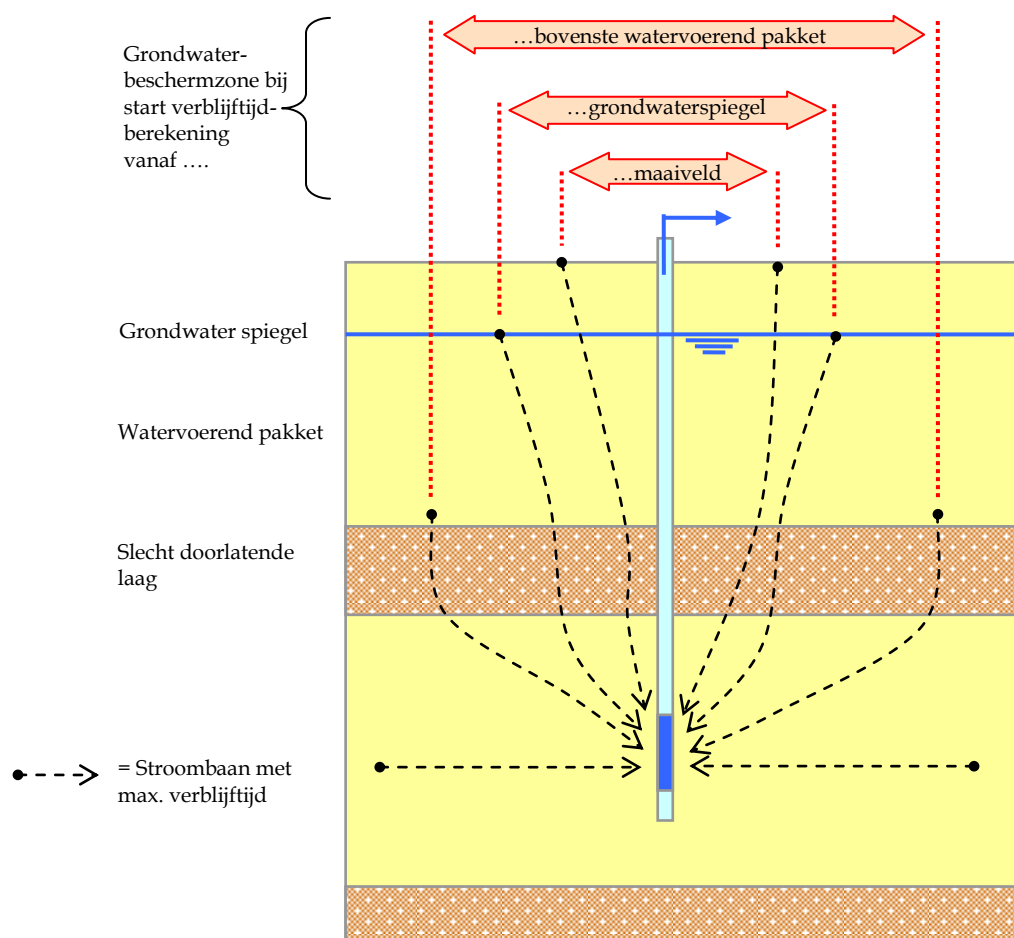
Er zijn twee redenen waarom (landelijk) vaak is gekozen voor een verblijftijd van 25 jaar. Allereerst biedt een dergelijk lange periode de mogelijkheid om in te grijpen als zich een verontreiniging voordoet. Daarnaast wordt deze periode nodig geacht om alternatieven voor een winning te ontwikkelen, wanneer de bedreiging toch te groot zou worden. Grotere verblijftijden bieden extra bescherming.

De diepte vanaf waar verblijftijdberekeningen beginnen verschilt ook per provincie. De Provincie Utrecht bepaalt het grondwaterbeschermingsgebied als de punten in het 1e watervoerende pakket, van waaraf het grondwater een periode van 25 jaar of minder nodig heeft om de pompputten te bereiken.

Het gaat hierbij alleen om de projectie van de 25-jaarspunten die zich in het eerste watervoerend pakket bevinden. Noord-Holland en Overijssel gaan uit van de maximale projectie in het pompde pakket; wat in de praktijk vaak overeenkomt met het bovenste pakket, maar niet altijd. Andere provincies wijzen alleen die gebieden aan waar de reistijd vanaf de freatische grondwaterspiegel (Zuid-Holland) of vanaf maaiveld (Drenthe) naar de winning binnen de verblijftijd drempel valt.

In Figuur 3.2 zijn de grondwaterbeschermingsgebieden schematisch weergegeven bij een aantal startdieptes voor de verblijftijdberekeningen. De grootste beschermzone wordt berekend wanneer de maximale projectie in het bovenste watervoerend pakket bepalend is. De beschermzone houdt dan ook rekening met eventuele bodemverontreinigingen die onder invloed van een grotere dichtheid versneld infiltreren naar grotere diepte. De beschermzone is het kleinst wanneer deze vanaf maaiveld wordt berekend. Er gaat dan reistijd verloren in de onverzadigde zone en het bovenste watervoerend pakket. Het kan afhankelijk van de geohydrologische situatie tientallen jaren duren voordat een waterdeeltje vanaf maaiveld de eerste scheidende laag bereikt. De uiteindelijke omvang van een beschermzone is dus afhankelijk van zowel de verblijftijd drempel als ook de startdiepte.

De verschillende keuzes die zijn gemaakt bij het bepalen van beschermingszones heeft mogelijk te maken met de geohydrologische situaties die nogal verschillen tussen de provincies. In gebieden met een diepe grondwaterstand biedt de grote verblijftijd in de onverzadigde zone extra bescherming. De keuze voor een langere verblijftijd kan te maken hebben met de kwetsbaarheid van winningen en het al dan niet voorhanden zijn van alternatieve winlocaties. Dit zal per provincie verschillen.



Figuur 3.2: Omvang van grondwaterbeschermingsgebied bij start verblijftijdberekening vanaf maaiveld, grondwaterspiegel of in het bovenste watervoerend pakket. Een grotere startdiepte leidt tot een groter gebied.

3.4 Boringsvrije zone

Bij diepe winningen onder goed afsluitende lagen is het van belang dat scheidende lagen niet doorboord worden. Zo wordt vermeden dat verontreinigingen vanaf maaiveld via het boorgat de winning kunnen bereiken. Veel provincies introduceren hiertoe een boringsvrije zone. De boringsvrije zone is de maximale projectie van de punten, waarbinnen de reistijd naar de winning 25 jaar of minder is. De grootste projectie van de 25-jaarsverblijftijd wordt in de regel gevonden in het watervoerende pakket waaruit wordt onttrokken. Sommige provincies houden ook rekening met de verblijftijd in andere watervoerende pakketten; soms worden de grootste horizontale reisafstanden gevonden in een dieper of ondieper watervoerend pakket.

De provincie Zuid-Holland hanteert een verblijftijddrempel van 50 jaar. In Flevoland en Limburg zijn (geologisch) afgebakende gebieden aangewezen als boringsvrije zone. Zo wordt een veel groter gebied dan de 25 jaarszone beschermd.

De boringsvrije zone is in de diepte afgebakend door een maximale boordiepte t.o.v. NAP of een bepaalde geologische formatie.

Kader I: Werkwijze Provincie Utrecht voor onderscheid grondwaterbeschermingsgebied - boringsvrije zones (Tauw 2012)

De Provincie Utrecht heeft het onderscheid grondwaterbeschermingsgebied en boringsvrije zones vrij ver uitgewerkt bij de actualisatie van de grondwaterbeschermingsgebieden t.b.v. de ontwerp PMV:

- Grondwaterbeschermingszone instellen als een grote hoeveelheid van het onttrokken water afkomstig is uit de 25 jaarszone van het eerste watervoerend pakket.
- Boringsvrije zone instellen als er (vrijwel) geen grondwater uit het eerste watervoerend pakket gewonnen wordt.
- Bij een kleine hoeveelheid grondwater vindt aanvullende analyse plaats van de geohydrologische informatie en een nadere afweging van de maatschappelijke consequenties van het instellen van een grondwaterbeschermingszone.

Het aandeel grondwater uit het eerste watervoerend pakket wordt bepaald aan de hand van stroombaanberekeningen. Bij twijfel wordt ook gekeken naar de grondwaterkwaliteitspatronen. Als bijvoorbeeld milieuvreemde stoffen in een pompput worden waargenomen, kan met vrij grote zekerheid gesteld worden dat de pompput antropogeen beïnvloed jong water aantrekt. Indirecter kunnen ook uit macro-ionen (chloride en andere ionen) en redoxgevoelige parameters, patronen over de grondwaterstroming en het voorkomen van scheidende lagen, worden afgeleid.

3.5 100-jaarsaandachtsgebied/ intrekgebied

Het intrekgebied van een winning is het gebied waarvan het aan maaiveld geïnfilterde water naar de winning toestroomt. Elke winning heeft zijn eigen intrekgebied.

Diverse provincies hanteren een 100-jaarsaandachtsgebied in het ruimtelijk beleid om risicovol landgebruik te weren. Binnen het 100-jaarsaandachtsgebied is de reistijd vanaf maaiveld naar de waterwinning 100 jaar of minder.

3.6 Overige beschermingszones

3.6.1 50-jaarszone

De 50-jaarszones worden door de Provincie Utrecht gehanteerd ten behoeve van de vergunningverlening voor KWO-systemen. Deze zone is de grootste projectie van de punten per watervoerend pakket, van waaraf het grondwater een periode van 50 jaar of minder nodig heeft om de pompputten te bereiken. Deze 50-jaarszones worden per watervoerend pakket bepaald. Elk watervoerend pakket kent zijn eigen aparte 50-jaarszone.

3.6.2 Strategische zoetwatervoorraad

De Provincie Zuid-Holland wil, net als de andere provincies, het zoete grondwater vooral gebruiken voor hoogwaardige toepassingen. Daarom zijn beperkingen opgelegd aan het gebruik van zoet grondwater in de strategische zoetwatervoorraad. Dit gebied is in de Provinciale Milieuverordening op kaart aangeduid.

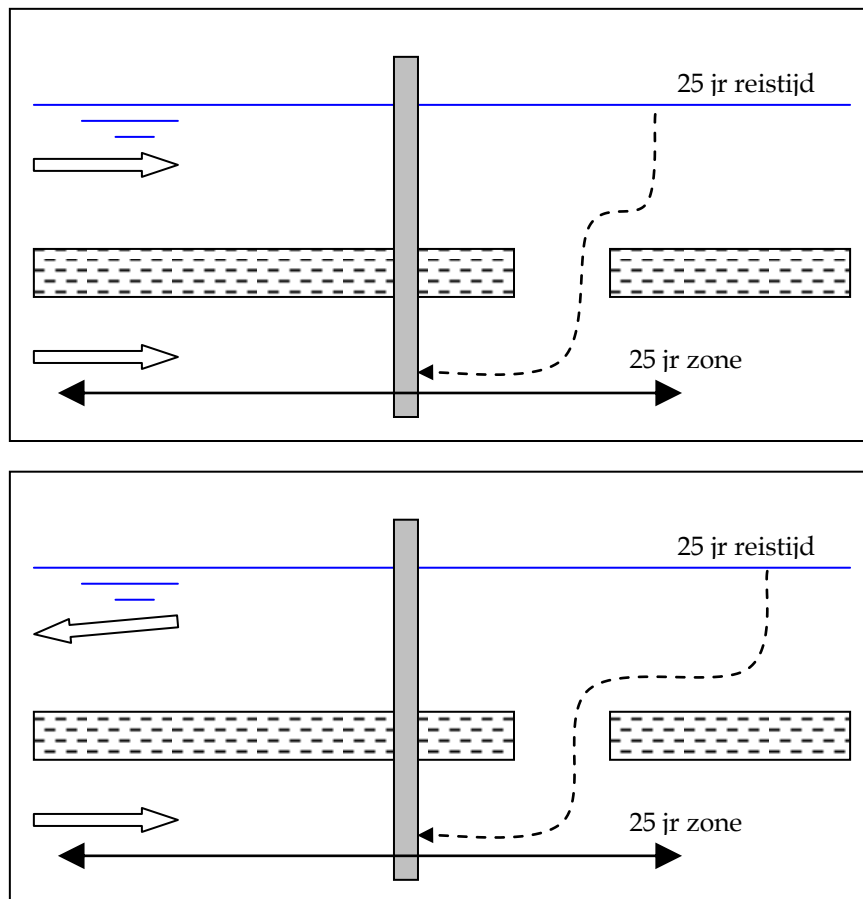
3.7 Casus: Grondwaterbescherming op de Venloschol

De WML-winningen Grubbenvorst, Houthouzen, Californie en Hanik onttrekken grondwater uit het tweede watervoerende pakket uit de Venlo-schol. Dit watervoerende pakket is aan de bovenkant bedekt met de zogenaamde Venlo-klei. Deze kleilaag is sterk heterogeen wat betreft dikte en samenstelling. Hierdoor is de verticale weerstand tegen grondwaterstroming ruimtelijk variabel en daarnaast niet goed bekend. Vooral in het noordelijk deel van de schol is de Venlo klei heterogeen en bevat duidelijk enkele gaten (Oranjewoud, 1995). Via deze gaten verloopt mogelijk een groot deel van de uitwisseling van grondwater met het bovenliggende watervoerende pakket, zodat de kwetsbare gebieden van het intrekgebied geen aaneengesloten geheel vormen. Met andere woorden, via de gaten in de Venlo-klei kunnen verontreinigingen die voortkomen uit activiteiten aan het maaiveld versneld naar het gepompte pakket stromen. De onzekerheid over dit fenomeen wordt nog verder versterkt doordat de grondwaterstromingsrichting onder de klei van Venlo anders van richting is dan boven de klei van Venlo.

De Provincie Limburg hanteert drie beschermingszones voor de winningen op de Venlo-schol, namelijk het waterwingebied, het grondwaterbeschermingsgebied en een boringsvrije zone. De boringsvrije zone is van kracht voor de hele schol, ongeacht de reistijd van het grondwater. De overige twee zones zijn gedefinieerd op basis van de reistijd van het grondwater door het gepompte pakket naar het winmiddel. Normaal gesproken (indien de achtergrond stromingsrichting eenduidig is) is de reistijd van het grondwater dat precies op de grenzen van de beschermingszones valt groter dan de reistijd van het grondwater dat vanaf deze grens, en door het gepompte pakket, naar het winmiddel stroomt. Dit komt doordat het transport door de onverzadigde zone, het freatische pakket en de weerstandbiedende laag ook reistijd vergt. In dergelijke gevallen geldt deze definitie als een worstcase benadering. De kwetsbaarheid van de beschermingszone is immers kleiner dan volgens de beleidsmatige richtlijnen.

Bovenstaande redenering gaat echter niet zondermeer op voor de winningen op de Venloschol. Hier is de grondwaterstroming boven de afsluitende kleilaag anders van richting dan onder de kleilaag. Door kortsluitstroming door gaten in deze kleilaag kan het grondwater buiten de beschermingszones een reistijd hebben die kleiner is dan de beleidsmatig vastgestelde verblijftijdendrempel. Hierdoor is het beschermingsniveau in de grondwaterbeschermings- en waterwingebieden kleiner dan op basis van de provinciale milieuverordening verwacht mag worden. Omdat het aanpassen van de planologische grenzen niet ter discussie staat, is het handelingsperspectief van de drinkwaterbedrijven in dergelijke gevallen beperkt tot het zo goed mogelijk inzichtelijk maken en communiceren van de risico's die deze hydrologische situatie voor de ruwwaterkwaliteit met zich mee brengt. Omdat deze risico's direct samenhangen met de reistijd van het grondwater zijn hiervoor goed onderbouwde verblijftijdendeberekeningen noodzakelijk. Kritische factor hierbij is de betrouwbaarheid van de onderliggende modellen, aangezien de geohydrologische situatie zeer complex is. Hierdoor kunnen keuzes van de modelleur, en de kwaliteit van de beschikbare data, sterk bepalend zijn voor de modeluitkomsten. Dit kan ondervangen worden door niet alleen een globale gevoeligheidsanalyse uit te

voeren, maar door ook het effect van verschillende modelconcepten op de uitkomsten in kaart te brengen. Dit is echter een tijdrovende klus. De best modelling practice, zoals in het volgende hoofdstuk besproken wordt, geeft hierbij concrete en eenduidige aanknopingspunten om dergelijke berekeningen systematisch en controleerbaar uit te voeren.



Figuur 3.3: Conceptuele weergave van het verschil tussen werkelijke reistijden van grondwater en berekende reistijden volgens de richtlijnen van de provinciale milieuverordening. Boven: achtergrondstromingsrichting is gelijk voor het eerste en tweede watervoerende pakket. Onder: achtergrondstromingsrichting is verschillend voor eerste en tweede watervoerende pakket.

4 Best modelling practice voor verblijftijdberekeningen

4.1 Huidige praktijk

Uit het opstellen van gebiedsdossiers is gebleken dat niet voor alle drinkwaterwinningen nauwkeurig inzicht in de ligging én onderbouwing van de intrekgebieden of grondwaterbeschermingsgebieden beschikbaar is. Dit vormt een potentiële bedreiging voor het huidige en toekomstige beschermingsniveau van de drinkwaterwinningen. Actiepunten die hieruit voortvloeien bestaan uit het (achteraf) toevoegen van de onderbouwing van een adequaat berekende zonering, verblijftijdsberekening en het uitvoeren van een herberekening – uiteraard inclusief adequate vastlegging en onderbouwing van de modellering.

Als de onderbouwing van de bepaling van de zonering niet bekend is, is de kans groot dat het opnieuw bepalen van de zones leidt tot andere uitkomsten. Ook als er wel een onderbouwing en goede beschrijving van het model aanwezig is kan een herberekening leiden tot andere uitkomsten. Mogelijk zijn er meer gegevens beschikbaar of nieuwe software. Hoe de herberekening ook uitgevoerd wordt, er dient altijd aangetoond te worden dat het model geschikt is voor de toepassing.

4.2 Inleiding

Een goed model is een model dat voldoet aan het doel van de modellering. Vanwege deze verwevenheid van ‘een goed model’ en ‘het doel van de modellering’ hoeft het model niet altijd het aller beste model te zijn dat er te maken is. Wel moet duidelijk zijn waarom het model goed of tenminste goed genoeg is. Op basis van een beknopte analyse van relevante literatuur en het houden van interviews met experts is een overzicht gemaakt van stappen die onderdeel zijn van het maken van ‘een goed model’ of anders gezegd, die invulling geven aan een ‘Good Modelling Practice’. De resultaten van deze analyse zijn verwerkt tot een samenvattende tabel die is opgenomen in bijlage 1. Reden om voor de resultaten weer te geven in een tabel is een praktische: uit de interviews bleek dat dikke modelleerhandboeken als het ‘Handboek Good Modelling Practice: Vloeiend modelleren in het waterbeheer’ niet of nauwelijks uit de kast kwamen en dat praktische modelleer A4-tjes kwijtraakten. Een tabel op A3-formaat geeft de processtappen helder weer en nodigt uit om bijvoorbeeld ‘aan de muur geprikt te worden’.

De tabel in bijlage 1 met daarin de Best Modelling Practice is opgebouwd uit twee assen. De eerste as (verticale as) geeft aan welke stappen er doorlopen moeten worden en de tweede as (horizontale as) geeft aan hoe die stappen ingevuld kunnen worden. Wat je bij die stappen moet doen. In de tabel zelf staan de aandachtspunten bij die stap in de modellering. Door deze stappen te doorlopen, komen verschillende aandachtspunten ‘automatisch’ aan de orde: Waarom kies ik hiervoor, Waarom is dat voor het beantwoorden van de vraag de beste keuze en Hoe ga ik dat doen/heb ik dat gedaan?

Bij deze Best Modelling Practice is bewust gekozen voor een vragende opzet. Hiermee is de Best Modelling Practice toepasbaar bij verschillende typen software, verschillende aanpakken, verschillende model doelstellingen, etc. De vragende aanpak is ook gekozen om de modelleur te helpen bij het markeren van keuzemomenten en de onderbouwing daarvan. Het gaat dan niet alleen om de expliciete keuze zoals zelf een nieuw model maken of een bestaand regionaal model gebruiken, maar ook om de keuzes die je maakt door de standaard modelinstellingen te gebruiken.

Welke keuzes ook gemaakt worden in het modelleerproces, het vastleggen van de gebruikte data en de keuzes die bij de verwerking daarvan gemaakt worden, dienen zorgvuldig vastgelegd te worden. Dan is het ook ‘later’ nog steeds duidelijk hoe en met welke data de modellering op is uitgevoerd. Ook wanneer gebruik gemaakt wordt van een bestaand model moet altijd goed gekeken worden of het model ook geschikt is voor verblijftijden modellering.

De inhoud van de best modelling practice wordt in de onderstaande paragrafen stap voor stap beschreven. Deze stappen volgen de opbouw van de tabel uit bijlage 1.

4.3 Bestuurlijke uitgangspunten

Het doel van het berekenen van verblijftijden van grondwaterwinningen is het bepalen waar het water vandaan komt en hoe lang het water onderweg is. Maar wat is de bestuurlijke achtergrond van deze vraag en met welke nauwkeurigheid dient het antwoord opgeleverd te worden? Is het doel om een globaal beeld te krijgen van de ligging van een intrekgebied van een strategische winning of moet de zonering van het grondwaterbeschermingsgebied aangepast worden omdat het debiet van een bestaande winning veranderd gaat worden? Verblijftijdsmodelleringen kunnen op beide vragen een antwoord geven maar beide vragen stellen andere eisen aan het model.

Ook is het van belang om voor het starten van de modellering bestuurlijk vastgelegde randvoorwaarden scherp te hebben. Voorbeelden zijn de wens om gebruik te maken van een provinciaal/regionaal model dat beschikbaar is of rekening te houden met klimaatsveranderingen. Voor de modelkeuze is het ook van belang om te weten welk type verblijftijden (in het pompde pakket of vanaf maaiveld) er berekend moeten worden.

Voor het vaststellen van de risico's van bedreigingen voor de drinkwaterwinningen is nauwkeurig inzicht in de herkomst van het grondwater essentieel. Vanuit deze optiek is het relevant te weten waar aan maaiveld het grondwater infiltreert dat uiteindelijk door de winning onttrokken wordt. Provincies hebben dit uitgewerkt in hun provinciale grondwaterbeschermingsbeleid via onder meer:

- Het voorzorgsprincipe in het beschermingsbeleid;
- Voorkantsturing in de Ruimtelijke ordening.

Het voorzorgsprincipe houdt in dat voor de bescherming van de kwaliteit van het grondwater (potentieel) risicovolle activiteiten en ontwikkelingen worden geweerd. Voorkantsturing houdt in dat de drinkwaterwinningen zoveel mogelijk verweven zijn met harmoniserende functies. De bescherming van het grondwater vindt daarmee plaats via het sturen van de ruimtelijke ontwikkelingen. Een adequate voorkantsturing resulteert in een vermindering van de toekomstige risico's voor de drinkwaterwinning.

Om sturing van ruimtelijke ontwikkelingen nabij drinkwaterwinningen effectief in te zetten is nauwkeurig inzicht nodig in welk gebied je moet sturen. Inzicht in de omvang van intrekgebieden vanaf maaiveld is daarom essentieel. Bij de interpretatie van de resultaten van de verblijftijdmodellering moet met dit doel rekening worden gehouden.

In aanvulling hierop is het net zo essentieel om als bevoegd gezag of als drinkwaterbedrijf te kunnen onderbouwen waarom een intrekgebied voldoende nauwkeurig berekend is. Immers, voor het maatschappelijk draagvlak voor de zoneringen en eventuele beperkingen die daaruit voortvloeien is een eenduidige onderbouwing van die zonering van groot belang. De best modelling practice is een handvat om een goede onderbouwing te geven bij de zonering van de berekende intrekgebieden.

4.4 Een goed model

Het proces om tot een goed model te komen bestaat uit een aantal fasen:

1. De modelleur maakt een systeemanalyse en bepaald de processen die gemodelleerd worden, het conceptuele model;
2. De modelleur maakt het model, de modelopzet;
3. De modelleur maakt het model geschikt voor de toepassing: kalibratie ;
4. en validatie;
5. De modelleur past het model toe.

Deze 5 stappen worden hier onder toelicht.

4.4.1 Conceptueel model

Het doel van een conceptueel model is inzicht krijgen in het systeem en de maatgevende processen. Inzicht in de werking van het systeem is nodig om te kunnen beoordelen of de maatgevende processen adequaat in de te gebruiken software zijn beschreven en of de uitkomsten van de modelberekening realistisch zijn. Het conceptuele model bestaat uit een schets van de ondergrond waarin te zien is welke lagen in de ondergrond voorkomen en hoe dik deze lagen zijn. Verder worden in het conceptuele model ook andere voor de grondwaterstroming belangrijke elementen meegenomen, zoals grote watergangen en andere winningen, stuwing of gelaagdheid van de ondergrond. Bij het opzetten het conceptuele model kan worden bijgehouden welke gegevens worden gebruikt en waar deze vandaan komen. Met het conceptuele model kan eventueel ook een analytische berekening worden gemaakt. Deze analytische berekening geeft nog meer inzicht in de werking van het systeem, omdat daarmee de uitkomst van het gedetailleerde numerieke model op hoofdlijnen al vastgelegd is. Een voorbeeld voor een conceptueel model – inclusief ‘sigarendoos berekening’ – staat beschreven in bijlage 2.

4.4.2 Opzetten model

Het model dat opgezet wordt voor de verblijftijdenmodellering kan een nieuw model zijn of een uitsnede uit een bestaand model. Het doel van het gebruiken van het model is uiteraard om een zo goed mogelijke inschatting te kunnen geven van de verblijftijden. De modelleur moet, om tot een voor het doel geschikt model te komen, een aantal keuzes maken wat betreft:

1. Software
2. Schematisatie
3. Randvoorwaarden
4. Gegevens
5. Parameters

Bij elk onderdeel wordt hieronder aangegeven waar de keuzes liggen en waar op gelet dient te worden.

Ad 1. Software

Een eerste keuze die gemaakt moet worden bij het opzetten van het model is een keuze voor de software. Wanneer deze keuze wordt gemaakt moet altijd nagedacht worden waarom gekozen wordt voor deze software en waarom deze software juist geschikt is voor verblijftijd modellering. Hierbij is inzicht in het maatgevende proces – onderdeel van het opstellen van een conceptueel model – van groot belang.

De keuze voor het soort tracing (backward of forward volgen van de stroombaan van het grondwater) kan de uitkomsten beïnvloeden. Het kan nuttig zijn om deze reden beide opties te gebruiken. Het programma moet dit dan wel ondersteunen.

De software die gebruikt wordt voor het traceren kan ook nog invloed hebben op het resultaat. In het veel gebruikte modflow wordt gebruik gemaakt van modpath. Veel bestaande regionale modellen rekenen in de modelleeromgeving imod. Binnen imod is een vergelijkbaar, maar net weer ander programma imodpath beschikbaar. Het programma modpath is ontwikkeld door USGS (United States Geological Survey) en de code is vrij toegankelijk. Het programma imodpath is door Deltares ontwikkeld op basis van modpath. De code van imodpath is niet openbaar. Bij het berekenen van verblijftijden zijn in imodpath minder instellingsmogelijkheden dan in modpath. Dit leidt er soms toe dat regionale imod modellen worden omgezet naar modflow om dan verblijftijden met modpath te berekenen. Geschikt maken van modellen voor andere software brengt risico's met zich mee. Een omgezet model dient opnieuw getoetst te worden.

Ad 2. Schematisatie

Een andere keuze die gemaakt moet worden is de schematisatie van de ondergrond. Bij het modelleren van verblijftijden maakt het uit op welke manier de opbouw van de ondergrond in het model wordt weergegeven. De lagen in de ondergrond kunnen onderscheiden worden op basis van de hydrogeologische opbouw of worden samengenomen tot watervoerende en slecht doorlatende pakketten. Hoe meer lagen een model heeft des te meer detail meegenomen kan worden in de modellering, maar ook hoe meer gegevens er nodig zijn van de verschillende pakketten. Ook de celgrootte van de rekencellen moet worden gekozen. Hoe kleiner de cellen hoe meer in detail er gemodelleerd kan worden. De schematisatie van de ondergrond moet geschikt zijn voor het modelleer doel.

De schematisatie van de ondergrond kan grote invloed hebben op de grootte en ligging van het intrekgebied, zoals toegelicht in kader II.

Kader II: Schematisatie is bepalend voor modeluitkomsten

Bij een winning is met een regionaal model met 18 lagen het intrekgebied berekend. Het intrekgebied dat met dit – nieuwe – model is berekend, is aanmerkelijk groter dan het intrekgebied dat eerder met een andere schematisatie was berekend was. Het grootste verschil tussen het oude en het nieuwe model was het aantal lagen waaruit het model is opgebouwd. Met het nieuwe model is toen nog een nieuwe berekening gemaakt met een aangepaste schematisatie waarbij het aantal lagen in het model is terug gebracht van 18 naar 3 terwijl de totale doorlatendheid en de totale weerstand in de lagen behouden is gebleven. Met deze aangepaste schematisatie is opnieuw het intrekgebied berekend. Dit nieuwe berekende intrekgebied bleek veel kleiner dan bij de schematisatie met 18 lagen en komt veel meer overeen met de oude modelberekeningen. Het overeenkomen van de modelberekening met 3 lagen met het oude modelberekening is geen reden om aan te nemen dat die modelberekening de beste berekening is. Wel laat dit zien dat de schematisatie van de ondergrond grote invloed heeft op de uitkomsten van de modellering.

Bij de schematisatie hoort ook de schematisatie van de putten. Bij de meeste modellen worden de putten standaard over de hele dikte van de modellaag geschematiseerd. Wanneer de filters van de putten zich in werkelijkheid slechts in een deel van de modellaag bevinden zal het intrekgebied niet juist worden berekend. Wanneer de onderkant van de modellaag veel dieper ligt dan de diepste filters zal het berekende intrekgebied aan maaiveld groter zijn dan in werkelijk het geval is. De verblijftijden aan maaiveld zullen ook groter zijn. Wanneer gebruik gemaakt wordt van een bestaand model kan dit ondervangen worden door het toevoegen van een dummy-laag. Hierdoor kunnen de filters wel op de juiste diepte geschematiseerd worden.

Ook op het vlak van de schematisatie van de waterlopen dienen keuzes gemaakt te worden. Waterlopen kunnen vaak op verschillende manieren geschematiseerd worden. Voor stroombaanberekeningen is het van belang of stroombanen een waterloop kunnen passeren, zie kader III.

Kader III: weak sinks en strong sinks

Een sink kan gemodelleerd worden als een weak of een strong sink. Een strong sink vangt al het water af dat de cel in stroomt. Bij een weak sink wordt een gedeelte van het water dat die cel instroomt afgevangen en zal een ander deel van het water de cel ook weer uitstromen. Bij het berekenen van verblijftijden is het bij een weak sink van belang of het waterdeeltje dat gevolgd wordt wel of niet wordt afgevangen. De wijze waarop de weak sinks worden gemodelleerd bepaald hoeveel water door de weak sink wordt afgevangen. Wanneer bij het modelleren van verblijftijden te veel water wordt afgevangen door weak sinks kunnen bepaalde gebieden ten onrechte buiten het intrekgebied komen te liggen. Stochastische methodes voor het afoangen van deeltjes kunnen een oplossing voor dit probleem bieden.

De grondwateraanvulling kan bepaald worden met behulp van aparte modellen die beschikbaar zijn voor de onverzadigde zone of met een eenvoudige schematisatie op basis van neerslag en potentiële gewasverdamping. De grondwateraanvulling is sterk bepalend voor het resultaat van de intrekgebiedberekening. De manier van schematiseren dient dus zorgvuldig gekozen te worden. Te grote grondwateraanvulling zal leiden tot een onderschatting van de grootte van het intrekgebied. Het maken van een waterbalans kan inzicht verschaffen over hoe goed de grondwateraanvulling berekend is, mits informatie over de afvoer van het systeem bekend is.

Ad 3. Randvoorwaarden

Bij het model worden randvoorwaarden opgegeven. Dit betreft bijvoorbeeld de stroming van grondwater over de modelrand. Bij elke modellering moet het modelgebied ruim rond het interesse gebied liggen om te voorkomen dat de randvoorwaarden te nadrukkelijk van invloed zijn op de uitkomsten van de modellering. Bij het modelleren van verblijftijden is dit extra belangrijk, omdat het intrekgebied soms ver van de putten ligt, waardoor de ligging van het intrekgebied mede bepaald wordt door de opgelegde randvoorwaarden. Het ligt voor de hand het modelgebied zo groot te kiezen dat het intrekgebied binnen de modelgrenzen ligt. Als dit niet het geval is, kan de mate waarin de opgelegde randvoorwaarden een rol spelen bij de verblijftijdsmodellering bepaald worden aan de hand van een responscurve. Met deze responscurve kan worden bepaald hoeveel procent van het gewonnen water afkomstig is uit het modelgebied en hoeveel water van buiten het modelgebied afkomstig is.

Kader IV: Het belang van representatieve randvoorwaarden

Bij een winning in de buurt van een grote rivier waar deels grondwater en deels oevergrondwater wordt gewonnen is voor het berekenen van het intrekgebied de rivier als rand van het model genomen. Later is uit waterkwaliteitsanalyses gebleken dat de grondwaterwinning ook water aantrekt dat afkomstig is onder en aan de overkant van de rivier. Door de keuze voor een randvoorwaarde te dicht bij de winputten is het intrekgebied van de winning onjuist berekend.

Ook waterlopen in het modelgebied vormen een randvoorwaarde voor het model. Ze zijn net als de grondwataanvulling sterk bepalend voor de waterbalans en ook voor de grondwaterstroming in het gebied.

Ad 4. Gegevens

Voor de modellen zijn verschillende gegevensbronnen voorhanden. Voorbeelden van bronnen voor de bodemopbouw zijn REGIS, een eigen interpretatie van bestaande boringen of geo-elektrische metingen en het zetten van nieuwe boringen of geo-elektrische metingen.

Neerslag en verdampingsgegevens zijn te vinden bij het KNMI. Een alternatieve bron voor de neerslaggegevens is de neerslagradar die tegenwoordig beschikbaar is. Actuele verdamping wordt tegenwoordig ook bepaald uit satellietbeelden en is wellicht in de toekomst een betere bron voor het bepalen van de grondwataanvulling dan een onverzadigde zone model.

Gegevens over waterlopen zijn het beste te verkrijgen bij de waterschappen.

Ad 5. Parameters

Parameters die de stroming door de ondergrond bepalen zijn de doorlatendheid (k-waarde), de diktes van watervoerende pakketten (D), de porositeit (n) en de weerstand van weerstandbiedende lagen (c-waarde). Een eerste inschatting van de parameterwaarden is te vinden in de literatuur, uit pompproeven en uit REGIS.

4.5 Kalibratie

De kalibratie heeft tot doel de gekozen parameters zodanig te optimaliseren dat het model zo goed mogelijk de metingen beschrijft. Om de gemeten en berekende waarden te laten overeenstemmen worden parameters in het model aangepast totdat de afwijking kleiner of gelijk is aan de maximaal toegestane afwijking. De maximale afwijking die acceptabel is hangt af van het doel van de modellering.

Bij verblijftijdenmodellering zouden in het meest optimale geval de gemeten verblijftijden vergeleken worden met de gemodelleerde verblijftijden. Aangezien verblijftijden nauwelijks te meten zijn, is dit in de praktijk onuitvoerbaar. In de huidige praktijk worden daarom vaak de gemeten grondwaterstanden gebruikt en soms ook gemeten afvoeren om een model te kalibreren. Dit houdt echter een risico in. Een groep Deense onderzoekers heeft onlangs aangetoond dat een model dat goed geschikt is voor het berekenen van grondwaterstanden niet automatisch ook geschikt is voor het berekenen van waterstroming door de ondergrond en het berekenen van verblijftijden (X. He et al., 2013).

Kader V: Problematische kalibratie

Het is goed mogelijk dat een doorlatendheid moeilijk te kalibreren blijkt met de beschikbare meetgegevens. Met een k-waarde van 10 m/d wordt een goed model verkregen en met een k-waarde van 15 m/d past het model ook goed bij de metingen. Mogelijk heeft dit weinig invloed op het intrekgebied. Het kan ook zo zijn dat de invloed van deze onzekerheid groot is op het intrekgebied. In dit geval zijn er meerdere opties denkbaar:

- Meer meten, grondwaterstanden of pompproef;*
- Accepteer de onzekerheid in de verschillende parameters en maak in overleg een parameterkeuze op basis van uitgebreide gevoeligheidsanalyse, bijvoorbeeld worst-case voor het intrekgebied of juist meest*

Door gebruik te maken van waterkwaliteitsgegevens kan de kalibratie van het model ook verbeterd worden. De waterkwaliteits gegevens zeggen iets over de herkomst van het water. Zeker bij een winning waar het water uit verschillende pakketten afkomstig is, kan waterkwaliteitsanalyse aanwijzingen geven over de herkomst van het water. Op deze wijze wordt een min of meer onafhankelijke dataset – nl. de gemeten grondwaterkwaliteit – gebruikt om de berekende verblijftijden te beoordelen. Hiermee kunnen geen detailaanpassingen worden gedaan – in termen van ‘jaren’ – maar kan wel worden aangegeven of de berekende herkomst van het onttrokken adequaat berekend wordt. De gemeten aanwezigheid van antropogene stoffen of tritium, duidt op relatief jong grondwater.

Kader VI: Het nut van kwaliteitsgegevens

Bij een drinkwaterwinning werd op basis van het berekende intrekgebied geen invloed van landbouw op het te winnen water verwacht, omdat het berekende intrekgebied geheel in een natuurgebied lag. De modellering is gekalibreerd op basis van gemeten stijghoogtes. In de pompputten werd echter door landbouw beïnvloed grondwater aangetroffen. Op basis van deze gemeten grondwaterkwaliteit mag verwacht worden dat het model het intrekgebied niet juist berekend heeft. Op basis van de gemeten waterkwaliteit is het model aangepast met als gevolg dat het berekende intrekgebied deels in het natuurgebied ligt en deels in het landbouwgebied. Ook het aangepaste model berekende de stijghoogtes in het gebied juist. Uit dit voorbeeld blijkt kalibratie van een verblijftijdenmodellering op basis van stijghoogtes niet automatisch een garantie biedt voor een juiste berekening van het intrekgebied.

Tijdens het kalibratie proces worden de ingevoerde gegevens zoals de bodemopbouw en parameters zoals de k- en c-waardes mogelijk aangepast. De aanpassingen aan het model moeten goed beschreven worden om ook ‘later’ te begrijpen wat de achtergrond van een gekozen aanpassingen is.

4.6 Validatie

Het doel van de validatie is te bepalen of het model in een andere situatie dan waarvoor gekalibreerd is, voldoet. Dit vergroot de zekerheid dat het model geschikt is om te gebruiken. In de validatie worden de modelresultaten vergeleken met een andere meetset dan de set die gebruikt is voor de kalibratie. Het is echter vaak lastig een andere situatie te vinden dan de kalibratie situatie. Juist voor intrekgebiedberekeningen geldt dat een andere situatie misschien beschikbaar is als de winning in het verleden gewijzigd is of dat er misschien metingen beschikbaar zijn van voor de start van de winning.

Een alternatieve methode om vertrouwen te krijgen in de uitkomsten van de verblijftijdmodellering is het kunnen verklaren van de berekende verblijftijden. Het eerder opgestelde conceptuele model is hierbij belangrijk, omdat door het conceptuele model inzicht is verkregen in de werking van het systeem. De berekende verblijftijden moeten dan ook verklaard kunnen worden vanuit hydrologisch inzicht in het systeem. In feite is daarmee geen sprake van een validatie door vergelijking van de uitkomst aan een onafhankelijke dataset, maar worden de uitkomsten aannemelijk gemaakt door vergelijking aan c.q. inpassing van de resultaten in het conceptuele model.

Bij bestaande winningen waarvoor eerder verblijftijdberekeningen zijn gemaakt, worden nieuwe berekeningen vaak vergeleken met de oude berekeningen. De mate waarin oude en nieuwe berekeningen overeenkomen geeft echter alleen inzicht in verschillen/overeenkomsten van de modellen en zegt niets over de juistheid er van. Omdat dit fenomeen niet zelden aan de orde is, is het vastleggen

van uitgangspunten en doelstellingen, conceptuele model en maatgevende processen, data en parameters etc. zo belangrijk.

Bij bestaande winningen kan de kwaliteit van het onttrokken water gebruikt worden voor validatie van de verblijftijdmodellering. De waterkwaliteit weerspiegelt de herkomst van het onttrokken water en geeft als onafhankelijke databron aanvullende informatie over de verblijftijd. (zie ook kalibratie)

4.7 Gebruik van het model

Bij deze stap wordt ervan uitgegaan dat het model dat er nu ligt specifiek gemaakt is – of in ieder geval geschikt is - met het doel om verblijftijden te berekenen. Bij berekenen van de verblijftijden moet er gekozen worden voor een manier van traceren (forward of backward volgen van de stroombaan). Beide methodes hebben voor- en nadelen. Bij forward tracing wordt de stroomrichting van het water gevolgd richting de putten. Bij deze manier van traceren is het mogelijk dat stroombanen ten onrechte naar het oppervlaktewater gaan en daardoor niet in de putten terecht komen (zie kader randvoorwaarden). Bij het backward traceren wordt de stroomrichting omgedraaid en wordt bepaald welk pad een waterdeeltje volgt voor het bij de put terecht komt. Bij het backward traceren heeft het kiezen van het startpunt voor het volgen van waterdeeltjes invloed op het berekende intrekgebied. Vaak wordt bij berekenen van intrekgebieden gekozen om beide manieren van traceren te gebruiken. Naarmate de intrekgebieden die berekend worden met beide methodes beter overeenstemmen, zal er meer vertrouwen zijn in de uitkomsten van de berekening en daarmee de juistheid van de zonering van het intrekgebied en berekende verblijftijden.

4.8 Interpretatie resultaten

De verblijftijden die zijn uitgerekend met het model kunnen niet zonder een onderbouwing van de resultaten. Vooral bij bestaande winningen waar eerder berekeningen zijn uitgevoerd en waar al een grondwaterbeschermingsgebied is gedefinieerd zullen, wanneer de resultaten leiden tot een verandering in de ligging van het grondwaterbeschermingsgebied, goed onderbouwd moeten worden. Dit geldt zeker, wanneer de resultaten van de nieuwe berekeningen verschillen van die van de oorspronkelijke berekeningen. Er zal duidelijk gemaakt moeten worden waarom de nieuwe resultaten niet alleen anders, maar ook beter zijn dan de oorspronkelijke.

4.9 Oplevering / Verslaglegging

De rapportage bevat een duidelijke uiteenzetting van uitgangspunten en doelstellingen, een beschrijving van het conceptuele model & maatgevende processen en een beschrijving van de gebruikte data en instellingen van parameters.

Bij het opleveren van de rapportage hoort ook het opleveren van het logboek dat is bijgehouden tijdens de modellering en dat beschouwd en gebruikt kan worden als een technisch achtergronddocument horend bij het model. Met dit logboek zou het mogelijk moeten zijn om de gehele modellering te kunnen reproduceren.

Het gebruikte model hoort ook opgeleverd te worden samen met alle doorgerekende scenario's, de bestanden van de aangepaste parameters en de modelleeromgeving waarin het model rekent.

Wanneer het doel van de verblijftijdmodellering bestaat uit het vastleggen van de zonering van nieuwe grondwaterbeschermingsgebieden, dan hoort bij de oplevering van de resultaten ook een interpretatie van de resultaten in de vorm van een bestuurlijke opleg. Immers, het aanwijzen of verleggen van de zonering van grondwaterbeschermingsgebieden kan (grote) gevolgen hebben voor activiteiten en functies in het gebied.

5 Conclusie en aanbeveling

5.1 Conclusies

Definities van beschermingszones

Tussen provincies zijn aanzienlijke verschillen in grondslag voor de afbakening van grondwaterbeschermingszones:

- Waterwingebied: 60 dagen, 100 dagen en 1 jaar;
- Grondwaterbeschermingsgebied: 25, 100 en 200 jaar gepompt pakket, 100 jaar vanaf maaiveld en 50 jaar vanaf grondwaterspiegel;
- Boringsvrije zone: 25 en 50 jaar onder kleilaag;
- Overige zones: 100 jaars intrekgebieden, strategische zoetwatervoorraad, infiltratiegebied Utrechtse Heuvelrug

Deze verschillen zijn deels terug te voeren op verschillen in kwetsbaarheid van de te beschermen winningen, maar ook deels op verschillende invullingen door provincies.

Best Modelling practice

Uit een consultatie van experts bij drinkwaterbedrijven, provincies, kennisinstituten en adviesbureaus kan opgemaakt worden dat er verschillende visies bestaan op het opzetten, gebruiken en bewaren/opslaan van modellen. Dit leidt in de praktijk tot grote verschillen in de modellen die de grondslag vormen voor de afbakening van de grondwaterbeschermingszones en in de reproduceerbaarheid en terugvindbaarheid daarvan.

De documentatie en verantwoording laat vaak te wensen over, waardoor het 'later' moeilijk is het model opnieuw te gebruiken of zelfs maar te achterhalen hoe het model exact opgezet is.

De geïnterviewde zien de meerwaarde van een breed gedragen Best Modelling Practice waarin de processtappen van het modelleren zijn beschreven. Het doorlopen van de processtappen zoals beschreven in bijlage II verhoogt niet alleen de inhoudelijke kwaliteit van de modellering, maar maakt ook de onderbouwing en borging van de modellering expliciet en reproduceerbaar.

5.2 Aanbeveling

Definities van beschermingszones

Het verdient aanbeveling om – met respect voor verschillen in kwetsbaarheid van de winningen – de grondslagen voor de beschermingszones tussen provincies beter af te stemmen. Meer eenduidigheid in zo'n generiek kader draagt bij aan verhoging van het beschermingsniveau van de winningen.

Best Modelling Practice

Dit rapport is met een relatief beperkt aantal betrokkenen opgesteld. Voorgesteld wordt de resultaten en aanbevelingen uit dit rapport in breder verband te bediscussiëren. Elementen uit deze discussie kunnen zijn:

- Worden de bevindingen en aanbevelingen gedeeld of zijn er aanvullingen en aanscherpingen;
- Zijn de aanbevelingen werkbaar in de dagelijkse praktijk van waterbedrijven, provincies, kennisinstituten en adviesbureaus.

Het doel hiervan is een gezamenlijk bediscussieerd en liefst ook gedragen beeld van de processtappen die bij iedere modellering doorlopen dienen te worden. Deze stappen kunnen dan – gemotiveerd – wel of niet uitgevoerd worden.

Dit draagt bij aan een verbeterde doelmatigheid van beschermingszones en ondersteunt de risicobeoordeling van winningen.

Literatuur

Harbaugh, A.W., 2005, MODFLOW-2005, The U.S. Geological Survey modular ground-water model—the Ground-Water Flow Process: U.S. Geological Survey Techniques and Methods 6-A16, variously p.

He, X., Sonnenborg, T. O., Jørgensen, F., Høyer, A.-S., Roende Møller, R., and Jensen, K. H.: Analyzing the effects of geological and parameter uncertainty on prediction of groundwater head and travel time, Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss., 10, 2789-2833, doi:10.5194/hessd-10-2789-2013, 2013.

Oranjewoud, 1995,. Onderzoek begrenzing grondwaterbeschermingsgebieden Venlo Slenk. Projectnr 0589-48954

Royal Haskoning, 2003, Ontwerp Monitoringsmeetnet Winning Gasselte, project nr. 9M2247

Royal HaskoningDHV , 2012, Hydrologische berekeningen t.b.v. bepaling beschermingszones drinkwaterwinningen in de provincie Utrecht, project nr. 9T8834

Tauw, 2012, Actualisatie grondwaterbeschermingszones provincie Utrecht, project nr. 4666368

Walraven, R.H., Groot, S., Scholten, H., van Geer, F.C., Wösten, J.H.M., Koeze, R.D., Noort, J.J., Vloeiend modelleren in het waterbeheer, handboek Good Modelling Practice, STOWA-rapport 99-05, Rijkswaterstaat-RIZA-rapport 99.036, 1999.

I Resultaten van de interviews

Op welke wijze is omgegaan met de onzekerheden in het onderliggende grondwatermodel?	
Mark Emke	Onzekerheden in KD en c hebben niet zo heel veel invloed op de ligging van het beschermingsgebied (25 jaarszone). Wel op de ligging van de staart van het berekenden intrekgebied. Vaak wordt gewoon uitgegaan van het grondwatermodel wat alleen op stijghoogtes gekalibreerd is en niet op debieten. Bij de ripricenten methode voor automatische kalibratie (Deltares) worden stijghoogtes gebruikt. Bij waterwinningen is het lastig om de juiste stijghoogte en het bijbehorende debiet te bepalen. In Mipwa zitten daardoor vaak hoge K-waarden rondom winningen. In verblijftijd modellering ligt de grootste bron van onzekerheden het onderliggende grondwatermodel.
Nico van der Moot	Zo goed mogelijk iken. Verblijftijden berekenen door middel van forward en backward tracen en evt. parameters waarvan in je niet zeker bent in je grondwatermodel variëren binnen zekere bandbreedte (10-20%) en kijken op de omvang en ligging van de verblijftijden. Grondwatermodellen zijn geijkt op stijghoogtes en pompproeven. Pompproeven niet voor Kd-waarde bepaling, maar om te simuleren in het grondwatermodel. Ter plaatsen van de winningen kan je achterhalen hoe de lagen geohydrologisch functioneren. Bij de pompproef meet je verlagingen in de omgeving van de winning.
Vera Lagendijk	Consensus over het model is noodzakelijk. De regionale modellen zijn het beste wat we hebben. Een gezamenlijk model van de provincie, waterschappen, water bedrijf. We weten dat er onzekerheden in de regionale modellen zitten, maar er is wel consensus over die modellen. Voor detail studies voor verlagingen, wel extra kijken naar kalibratieresultaten en dan evt aanpassingen doen. Verblijftijden hebben andere ruimte/tijd schaal dan verhoging/verlagingen. Model is anders gevoelig op “lange” tijd 25 jaarszone dan op een 1 cm verlagingcontour. kD waarde heeft veel effect op stijghoogtes, maar minder op verblijftijd. Drainage weerstand van waterlopen heeft veel effect op 1cm verlaging, maar niet op verblijftijd. Model diktes (d) heel belangrijk voor verblijftijden. k en d in modellen. Goede stijghoogtes geven niet altijd goede stromingspatronen, maar door het gebruik te maken van regionale grondwater modellen wordt er wel een eenduidig model gebruikt.
Birgitta Putters	Gebruik maken van regionale grondwatermodellen. Wel deelmodellen indien beschikbaar en daar extra lokale informatie aan toevoegen. (Soms wel of soms niet opnieuw kalibreren). Geen gevoeligheidsanalyse. Onzekerheden inperken door extra informatie toevoegen (kD, ligging van breuken).
René van Elswijk	Van het grondwatermodel is een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd. Dit is gebruikt om te bepalen wat de meest bepalende factoren zijn en of er voldoende zekerheid is over deze factoren. Gaat om factoren als kD waardes en onderlinge invloed van verschilden systemen bijv. vergund debiet en werkelijk debiet. Pragmatisch om gaan met de verblijftijden en de onzekerheden daarin. Omdat het een model blijft (25- of 26 jaar maakt geen verschil). Idee krijgen van de ligging van de verblijftijd zones en het landgebruik daar. Kritischer kijken bij stedelijk gebied dan bij natuur gebieden
Eric Castenmiller	Bij de uitkomsten van berekeningen horen geen onzekerheidsbeschouwingen.
Kees Vink	Vergeten de vraag expliciet te stellen.
Thomas de Meij	Bij een model horen onzekerheden het belangrijkste is dat de uitkomsten van een model verklaarbaar zijn.

Welke simulatie programma's worden gebruikt voor het modelleren van verblijftijden?	
Mark Emke	Afhankelijk van het grondwatermodel Triwaco=> trace of modflow => modpath. Beste resultaten bij een verdicht netwerk rondom putten, mogelijk bij eindige elementen model (Triwaco).
Nico van der Moot	Triwaco en modflow. Bij uitbesteed onderzoek vaak het model dat het bureau voorstelt. Dit is vaak Modflow. Type model maakt niet zo heel veel uit. Eindige elementen zijn vaak wat beter voor het inbrengen van waterlopen en voor het verdichten van het netwerk bij winningen. Geen voorstander van regionale modellen zoals MIPWA of het NHI. Landelijk model heeft landelijke schematisatie. Voor verblijftijden heb je lokale schematisatie nodig en dan ook een lokaal model. Je bouwt een model op je vraag!
Vera Lagendijk	Modflow, modpath dus niet in de imod schil. Niet alleen de default instellingen gebruiken die in de modelschil van bijvoorbeeld MIPWA zitten, maar juist kijken in modflow zelf, omdat je daar veel meer keuze mogelijkheden hebt voor het instellen van verblijftijd berekeningen. Niet alle default model instelling in modelschillen zijn altijd de juiste instellingen.
Birgitta Putters	De modpath versie die in de schil van de regionale modellen Ibrahim (via imod) en IWAN-H (groundwater vistas => modflow surfact => imod) zitten
René van Elswijk	Alle modelleringen worden uit besteed.
Eric Castenmiller	De modelleringen worden uitgevoerd door bureaus. Er wordt gewerkt met de regionale modellen IWAN-H en Ibrahim en de imod schil die hier bij hoort.
Kees Vink	Voor het berekenen van de stroombanen in modflow modellen wordt modpath gebruikt. De instellingen van de modpath kunnen grote invloed hebben op het berekende intrekgebied, daarom wordt indien mogelijk een modpath gecombineerd met een stochastische benadering.
Thomas de Meij	De modellering van de verblijftijden wordt uitbesteed. Het grondwatermodel waar mee gewerkt wordt is MIPWA en het RenD model.

Welke grondwatermodellen worden er gebruikt voor het modelleren van verblijftijden?	
Mark Emke	De modellen die worden voor geschreven door de klant. Vaak regionale modellen ook al werken die niet even goed
Nico van der Moot	Triwaco/modflow vooral niet met MIPWA
Vera Lagendijk	Grotere regionale modellen MIPWA, AMIGO, Hydromeda, Azure HDSR, MORIA....
Birgitta Putters	Ibrahim voor Midden- en Noord-Limburg (TNO-DELTARES) en IWAN-H voor Zuid-Limburg (ARCADIS)
René van Elswijk	Uitgaan van regionale modellen die gemeenschappelijk ontwikkeld en beheerd worden de door waterschappen en drinkwaterbedrijven en provincie. Eerste fase van het project is kijken wel aanpassingen er nodig zijn voor een model voor een specifieke winning. Modellen die gebruikt worden zijn de vooral regionale modellen gebruik Hydromeda en Azure
Eric Castenmiller	Er wordt gewerkt met de regionale modellen IWAN-H en Ibrahim
Kees Vink	Modelleringen worden voornamelijk uitgevoerd met modflow, bij voorkeur wordt de originele modflow versie van de USGS gebruikt.
Thomas de Meij	Het grondwater model waar mee gewerkt wordt is MIPWA en het R en D model. Diktes van lagen moet vaak aangepast worden. Bij een detail studie van een specifieke winning zijn (mogelijk) meer lokale aanpassingen nodig

Hoe wordt omgegaan met tracen?	
Mark Emke	Vooruit of terug tracen geeft een verschil, vooral dichtbij de put. Met de stroom mee tracen heeft de voorkeur. Gridgrootte bepaalt hoe goed stroming rondom put wordt gemodelleerd.
Nico van der Moot	Backward / Forward tracen maakt niet zoveel uit. Backward vooral als je wilt weten waar water bij een bepaalde pompput vandaan komt.
Vera Lagendijk Pass	Gebruik maken van pass through weak sinks, anders stoppen stroombanen in het oppervlaktewater. Bij putten die in aangrenzende de cellen zitten dan een harde stop in ibound gebruiken, anders kan het water tussen je putten doorstromen. Dit kan vooral voorkomen bij modellen met grote gridcellen (100x100 m).
Birgitta Putters	Weak sinks / strong sinks zoals standaard in regionaal model is opgenomen. Zowel backward als forward modelleren moet leiden tot vergelijkbare verblijftijdzones
René van Elswijk	Vraag niet gesteld, omdat niet zelf gemodelleerd wordt. Heeft aangegeven dat keuzes worden overgelaten aan adviesbureaus.
Eric Castenmiller	In het Ibrahim model wordt gerekend vanaf de put terug (back-ward)
Kees Vink	Bij voorkeur foreward tracen van de stroombanen in combinatie met en stochastische benadering. Door de stochastische benadering wordt ook de problematiek met weak sinks voorkomen. Bij backward tracen moeten de startpunten veel zorgvuldiger worden gekozen dan bij foreward tracing.
Thomas de Meij	Weak sinks zijn een zeer belangrijk aandachtspunt bij het berekenen van de verblijftijden.

Hoe wordt de aspecten die samenhangen met de interactie tussen grondwater en oppervlaktewater meegenomen	
Mark Emke	Zit in het grondwater model. Hier in zitten ook aannames over de grondwateraanvulling.
Nico van der Moot	Grondwaterstanden worden voor een heel groot de bepaald door het oppervlakwater. Oppervlaktewater is erg belangrijk voor freatisch grondwater.
Vera Lagendijk	pass through weak sinks voor forwards berekeningen. Anders is er een grote kans dat stroombanen in toplaag blijven steken.
Birgitta Putters	Die worden meegenomen zoals ze standaard in het model zitten
René van Elswijk	Vraag niet gesteld, omdat niet zelf gemodelleerd wordt. Heeft aangegeven dat keuzes worden overgelaten aan adviesbureaus.
Eric Castenmiller	De interactie tussen grond- en oppervlaktewater is meegenomen in de regionale modellen. Bij het opstellen van die modellen is samengewerkt met de waterschappen.
Kees Vink	De aanvulling van grondwater door rivieren wordt niet altijd zorgvuldig genoeg meegenomen.
Thomas de Meij	Bij de interactie tussen grond- en oppervlakte water is de aanvulling van het grondwater door het oppervlakte water erg belangrijk.

Hoe zijn de verblijftijden in de onverzadigde zone meegenomen	
Mark Emke	Deze worden niet meegenomen. Er is wel keuze in topsystemen. De input voor de onverzadigde zone is heel belangrijk. Voeding vanuit het oppervlakte water is ook heel belangrijk. Dit wordt bijna nooit gemeten, zeker niet in gebieden met een vaste grondwaterstand. Dit komt omdat er geen fluxen worden gemeten, maar alleen (grond)waterstanden.
Nico van der Moot	Onverzadigde zone is vooral belangrijk voor landbouwschade niet zozeer van belang voor het berekenen van verblijftijden.
Vera Lagendijk	Voeding (recharge) is een gevoelige parameter wat betreft waar in het model de recharge wordt toegekend. Bovenin de bovenste cel, midden in de bovenste in de cel of in de eerste cel die actief is (cel met grondwater).
Birgitta Putters	Wordt meegenomen zoals dat standaard in het regionaal model is opgenomen. Nieuwe inzichten worden wel meegenomen de nieuwe versie van Ibrahim. Collega heeft nog wel eens iets gewijzigd in de onverzadigde zone om ook te reken met niet totaal verzadigde onverzadigde zone.
René van Elswijk	Vraag niet gesteld, omdat niet zelf gemodelleerd wordt. Heeft aangegeven dat keuzes worden overgelaten aan adviesbureaus.
Eric Castenmiller	Vraag niet gesteld, omdat niet zelf gemodelleerd wordt.
Kees Vink	De onverzadigde zone speelt geen grote rol bij modellering van verblijftijden. De grondwateraanvulling is wel een heel belangrijke factor.
Thomas de Meij	Het belangrijkste elementen van het onverzadigde zone model is de hoeveelheid grondwateraanvulling. De grondwateraanvulling is een zeer sturende parameter waarover veel kennis ontbreekt. Voor de onverzadigde zone kan gerekend worden met swap of meta swap. Hierbij kunnen metingen worden vergeleken met de berekeningen

Op welke databronnen zijn modelparameters zoals de porositeit, anisotropie, k (d)waarden gebaseerd.	
Mark Emke	Deze parameters zitten in het grondwatermodel.
Nico van der Moot	Korrelgrote verdelingen zijn belangrijk voor de porositeit. Kijken in boorbeschrijvingen naar beschrijvingen van de profielen. Scheidende lagen/ watervoerende pakketten bepalen op basis van geo-elektrische metingen (TNO). De interpretatie is niet altijd juist, dus opnieuw interpreteren ook aan de hand van boorbeschrijvingen.
Vera Lagendijk	Uit regionale modellen halen. Eén waarde voor n voor alle modellagen. Nog discussie over welke waardes wel realistisch zijn. Keuze moet gemaakt gaan worden. N is wel een belangrijke parameter voor de verblijftijden!! Over n is weinig bekend.
Birgitta Putters	Op de regionale modellen. Soms lokale informatie toevoegen bijv extra stijghoogte reeksen, informatie uit pompproeven en ligging van breuken (eigen informatie). De nieuwe inzichten worden ook verwerkt in de nieuwste versie van het regionale model.
René van Elswijk	Uit regionaal model. Wel aanvullen met lokale informatie. Bijvoorbeeld aanvullende boorgegevens soms ook recentere of gegevens uit andere studies. (bijv. een goed uitgekarteerde verontreinigingsstudie).
Eric Castenmiller	
Kees Vink	Wanneer geen gebruik gemaakt wordt van regionale modellen en er een nieuw model gebouwd wordt, wordt gebruik gemaakt van de REGIS-gegevens, boorbeschrijvingen, sonderingen etc. Alle gegevens bronnen die beschikbaar zijn worden gebruikt. Bij het gebruik van REGIS gegevens moet bedacht worden dat REGIS gemaakt is voor het kwantiteits modelleringen en niet voor kwaliteitsmodelleringen.
Thomas de Meij	De porositeit is een parameter waar over niet zoveel bekend is. De resultaten van het onderzoek van Olsthoorn uit 1977 worden nog steeds gebruikt. Porositeit blijkt niet een belangrijke parameter te zijn bij het berekenen van intrekgebieden. De kD- en de c-waardes zijn bepalender. Niet zo zeer voor de ligging van het intrekgebied, maar wel voor de reistijden en daarbij dus ook voor de ligging van het grondwaterbeschermingsgebied.

Hoe worden verblijftijden gevalideerd	
Mark Emke	Vaak via waterkwaliteit. Er zijn wel verificatie methoden mogelijk, maar er zijn vaak geen metingen beschikbaar.
Nico van der Moot	Valideren op basis van de leeftijd van het grondwater. Moet je kunnen terug vinden in de kwaliteit van het onttrokken grondwater. Bijv aan de hand van bekende verontreinigingen (1,2-DCP)
Vera Lagendijk	Expert judgement wel geëxperimenteerde met dateringen binnen 25 jaarsrange. Tritium metingen zijn ook een mogelijkheid. Wat wel vaak gebeurd is het leggen van de intrekgebieden naast de waterkwaliteitsgegevens. Deze vergelijking is nog steeds expert judgement.
Birgitta Putters	Door te vergelijken met de ligging van huidige beschermingszones (die gebaseerd zijn op oude berekeningen) en te kijken of het patroon verklaarbaar is. Met expert judgement kijken naar de uitkomsten. Mogelijk ook isotopen analyse, maar dit is/wordt (nog) niet gedaan.
René van Elswijk	Door ook te kijken naar vorige beschermingszones. Heel belangrijk omdat grenzen juridisch vastgelegd zijn. Het wijzigen van beschermingszones heeft maatschappelijke gevolgen. Kijken naar wat je eerder hebt berekend en wat je verwacht. Vooral erg belangrijk bij moderne modellen met veel lagen.
Eric Castenmiller	Voor de validatie van het model wordt voornamelijk gekeken naar het isohypsen beeld, wanneer dat klopt is er vertrouwen dat ook de berekende verblijftijden kloppen (dit geldt vooral voor de winningen in zandpakketten).
Kees Vink	Verblijftijden kunnen gevalideerd worden aan de hand van de grondwaterkwaliteit. Bij verblijftijden zouden meerdere model realisaties moeten worden gerealiseerd om dan met behulp van statische technieken en controle methoden te bepalen of de resultaten van de modellering vertrouwen geven.
Thomas de Meij	Validatie van nieuw berekende intrekgebieden op basis van oude berekeningen is niet mogelijk. Wel kunnen de uitkomsten worden vergeleken de afwijkingen tussen de uitkomsten moeten verklaarbaar zijn. Verklaringen zijn bijvoorbeeld verschil in inzicht of veranderingen in het systeem.

Hoe is er omgegaan met de onzekerheden in de resultaten?	
Mark Emke	Wel soms nog een snelle gevoeligheidsanalyse op bijvoorbeeld grondwateraanvulling. Onzekerheden in kaart brengen is vaak een studie op zich en wordt niet altijd uitgevoerd.
Nico van der Moot	Door variëren van parameters in het grondwatermodel krijg je een bepaalde bandbreedte waar het in de verblijftijd moet liggen.
Vera Lagendijk	Forewards en backwards moeten dezelfde resultaten geven om vertrouwen te krijgen in het model. Door de vergelijking is te zien of stroombanen in de toplaag blijven steken en of er “race lagen” voorkomen Samen met een provincie tot een gedragen plaatje komen, wat is belangrijk om te beschermen. Te komen tot één lijn op een kaart. Bij detail modelleringen (verlagingen) wordt wel een range aangegeven.
Birgitta Putters	Er wordt vooral gekeken of het model overeenkomt met de huidige ligging van de zoneringen (gebaseerde op oude sommen) Als er afwijkingen zijn wordt gekeken of het verschil verklaarbaar is bijvoorbeeld door aanpassingen in de winningen.
René van Elswijk	
Eric Castenmiller	Voor het vaststellen van een grondwaterbeschermingsgebied is een harde grens nodig. Bij winningen in kalksteen is bekend dat de berekende verblijftijden onzeker zijn. Daarom wordt van dat type winningen het gehele intrekgebied beschermd.
Kees Vink	Onzekerheden worden kleiner door speciale kalibratie technieken waarbij veel mogelijke combinaties van parameters worden doorgerekend. Wanneer er meerdere model realisaties zijn kan met statistische technieken en controle methodes gecontroleerd worden op tegenstrijdigheden. Hierdoor kan worden bepaald of er vertrouwen is in de resultaten. Tijd en geld bepalen de inspanning die mogelijk is bij het valideren van het model. De uitgevoerde validatie werkt door in de uitkomsten van het model.
Thomas de Meij	Over de uitkomsten van de modellering moet consensus zijn en de uitkomsten moeten inhoudelijk kunnen worden onderbouwd, eventuele afwijkingen moeten verklaard kunnen worden. Ook al zijn er onzekerheden in de uitkomsten van het model moet wel gelden dat deskundigen het eens zijn dat het best mogelijke model gebruikt is. Wanneer het met de resultaten van de modellering de ligging van een grondwaterbeschermingsgebied wordt bepaald dat wordt hiervoor niet alleen de uitkomsten van de modellering gebruikt, maar ook de praktische keuzes zoals ligging van wegen.

Wordt er een handboek gebruikt bij het modelleren? Zo ja, welke?	
Mark Emke	Nee
Nico van der Moot	Nee, op basis van ervaring.
Vera Lagendijk	Nee, modelleren is ervaring. Wel gebruiken maken van de modpath manual. Hier uit blijkt dat de methode voor het toekennen van recharge ook erg belangrijk is voor modelresultaten. Deze opties zitten niet in imodpath (de schil van deltares) maar wel in modpath. Keuze voor opties is ervaringen en afstemming met collega modelleurs. Doel van je modellering blijft heel belangrijk voor de te maken keuzes. Doel wordt wel eens het oog verloren.
Birgitta Putters	Nee, wel gebruik maken van kennis van collega's. Wel gebruik maken van de handleiding van modpath / groundwater vistas (technische handleiding).
René van Elswijk	Nee, er wordt geen handboek gebruikt. Ervaringen en expert judgement gebruikt.
Eric Castenmiller	De modellering wordt door derde uitgevoerd. Bij het beoordelen van modelleringen wordt ook geen checklist gebruikt.
Kees Vink	Er zijn vele handboeken over modelleringen, maar er is niet een "Bijbel".
Thomas de Meij	Nee

Heb je ook een voorbeeld rapportage?	
Mark Emke	Ja, zie model onderzoek voor Utrecht. Iwaco rapportage 10777? Herbepaling grondwaterbeschermingszones
Nico van der Moot	Ja, modellering voor Gasselte door RH
Vera Lagendijk	RH onderzoek Utrecht (idem Mark) Beschermingsgebieden van de provincie Utrecht.
Birgitta Putters	Nee geen voorbeeld van rapportage met uitgewerkt verblijftijdsmodellering. Wel een tijd terug ivm een bestrijdingsmiddelen onderzoek een verblijftijdsmodellering uitgevoerd, maar deze is niet uitgebreid gerapporteerd. Model aannames staan wel in een intern logboek
René van Elswijk	Voorbeeld is het rapport van Haskoning. Weet niet of het een goed voorbeeld is. In die studie is samen met partner Vitens juist een zeer pragmatische aanpak gekozen. Het is niet de meest wetenschappelijke aanpak. Maar het was voor dit project voldoende. Ik stel wel een protocol op prijs voor een meer wetenschappelijke aanpak. De aanpak moet wel behapbaar zijn voor de grotere adviesbureaus. (Prijs voor dit soort project ligt tussen de kosten tussen de 20.000 en 70.000 euro. Geen ruimte in budget voor Monte Carlo simulaties.
Eric Castenmiller	Nee
Kees Vink	Zie het NHV website voor de presentatie over grondwaterkwaliteitsmodellering
Thomas de Meij	Nee

Aanvullende vraag na het houden van drie interviews

Hoe reproduceerbaar zijn de modellen en hoe worden ze opgeslagen?	
Birgitta Putters	Dit is een gevoelig punt. Lokale modellen op dezelfde server opgeslagen en afspraken over de naamgeving. Ook het logboek wordt daarop geslagen. Er is geen totaal overzicht van welke lokale modellen er zijn en welke aanpassingen daarin zijn doorgevoerd. Dit moet opgezocht worden in de afzonderlijke logboeken.
René van Elswijk	Lastig punt. Aanpassingen in het model zijn vaak bij ingenieursbureaus en worden niet in hetzelfde format opgeleverd. Grootste deel van het gebied valt binnen het model Hydromeda. Dit model is beschikbaar voor externe partijen. Bij studies waar model aanpassingen worden gedaan, staat in de opdracht dat het gebruikte model moet worden terug geleverd. Die terug geleverde modellen worden eens in de x jaar gebruikt voor evaluatie/herkalibratie van het model. Lastige is dat veel adviesbureaus moeite hebben om het model fatsoenlijk terug te leveren. Dit komt door dat elk bureau gebruikt een eigen schil en visualisatie programma's gebruikt. Hier zou eigenlijk nog een protocol voor moeten worden opgesteld. Bij converteren van modellen voor het draaien van modellen in 'eigen' schillen is het niet duidelijk of default waarden etc wel juist/ gelijk worden overgenomen. Ook wordt het dan in niet in de juiste format terug geleverd.
Eric Castenmiller	Lokale aanpassingen aan regionale modellen moeten worden opgeslagen omdat ze gebruikt kunnen worden om de volgende versie van het model te verbeteren.
Kees Vink	Alle modellen zouden openbaar moeten zijn. Ook de kalibratie technieken die bij het maken van de modellen zijn gebruikt. Er zou algemene transparantie moeten zijn in de modellen en de gebruikte methodes zoals dat ook het geval is bij de USGS. Door het (voorgeschreven) gebruik van regionale modellen, wordt er slechts één model gebruikt. Hierdoor is er geen mogelijkheid om modellen te vergelijken en ontstaat er geen discussie over de uitkomsten van de verschillende modellen. Hierdoor wordt de discussie als drijvende kracht achter verbetering van modellen uitgeschakeld.
Thomas de Meij	Het is niet nodig om modellen voor zeer lange tijd beschikbaar te houden. Oude modellen worden namelijk ingehaald door voortschrijdend inzicht. Mogelijk gaat daardoor lokale kennis bij een bepaalde winning verloren.

II Best modelling practice

Zie volgende pagina (A3-formaat)

	Doel	Schematisatie	Software	Randvoorwaarden	Gegevens	Parameters	Resultaten	Logboek
Bestuurlijke uitgangspunten	☐ Inzicht in verblijftijden		☐ Is er voorgeschreven software?	☐ Welke verblijftijden? ☐ Rekening houden met klimaat scenario's?			☐ Vastlegging bestuurlijke uitgangspunten.	☐ Beschrijving in logboek
Conceptueel model	☐ Inzicht het systeem en de processen	☐ Schets van de ondergrond gemaakt		☐ Belangrijke invloeden op ondergrond bepaald	☐ Welke gegevens zijn gebruikt? ☐ Wat zijn de gebruikte bronnen		☐ Eenvoudige analytische berekening	☐ Beschrijving in logboek
Opzetten model	☐ Model gebruiken dat geschikt is voor het modelleren doel	☐ Model schematisatie afgestemd op modelleren doel? ☐ Bij bestaand model, welke aanpassingen zijn nodig?	☐ Welke software? ☐ Waarom is deze geschikt?	☐ Model-begrenzing ☐ Bij bestaand model, hoe is uitsnede gekozen ☐ Type randvoorwaarden	☐ Welke gegevens zijn gebruikt? ☐ Wat zijn de gebruikte bronnen	☐ Herkomst van invoer parameters vastgelegd ☐ Range van gebruikte parameters ☐ Gebruikte parameters realistisch ☐ Bij bestaand model, welke aanpassingen zijn nodig?	☐ Model voldoet aan de gestelde eisen	☐ Beschrijving in logboek ☐ Bij gebruik van bestaand model, logboek beschikbaar van dat model?
Kalibratie	☐ Model verbeteren voor het doel van de modellering	☐ Is schematisatie consistent met metingen? ☐ Aanpassingen?	☐ Beschrijving gekozen modelinstellingen ☐ Aanpassingen modelinstellingen tijdens kalibratie	☐ Worden randvoorwaarden bevestigd of tegengesproken door metingen ☐ Aanpassingen?	☐ Welke gegevens zijn gebruikt? ☐ Wat zijn de gebruikte bronnen ☐ Welke periode is gebruikt voor de kalibratie	☐ Zijn parameter-aanpassingen realistisch of plausibel? ☐ Beschrijving aanpassingen	☐ Parameter(s) gebruikt voor kalibratie ☐ Uitkomsten vergelijkbaar met eerdere berekeningen? ☐ Model “goed genoeg” voor doel modellering ☐ Model komt overeen met conceptueel model?	☐ Beschrijving in logboek

Validatie	☐ Model is goed genoeg voor het doel van de modellering	☐ Is schematisatie consistent met metingen?	☐ Voldoet software?	☐ Worden randvoorwaarden bevestigd of tegengesproken door metingen	☐ Welke gegevens zijn gebruikt? ☐ Wat zijn de gebruikte bronnen? ☐ Welke periode is gebruikt voor de validatie	☐ Zijn de parameters realistisch of plausibel?	☐ Parameter(s) gebruikt voor validatie ☐ Model “goed genoeg” voor doel modellering	☐ Beschrijving in logboek
Gebruik/ scenario's	☐ Specifieke berekeningen voor doel	☐ Is schematisatie geschikt?	☐ Welke tracing methode? ☐ Welke tracing software?	☐ Sluiten randvoorwaarden aan bij doel?	☐ Waarop zijn waarden gebaseerd?		☐ Model “goed genoeg” voor doel modellering? ☐ Reden om met het nieuwe model te gaan werken	☐ Beschrijving in logboek
Interpretatie resultaten	☐ Het duiden van de resultaten van de modellering.						☐ Vergelijking met eerdere modellen ☐ Interpreteren resultaten ☐ Verschillen tussen scenario's/alternatieven ☐ Interpretatie resultaten in bestuurlijke context evt bestuurlijke opleg	☐ Beschrijving in logboek
Oplevering/ verslaglegging	☐ Vastleggen van GWBG via BMP		☐ Uitwisselbaarheid van het model ☐ Model te verwerken in originele schil ☐ Bij gebruik van bestaand model, ook originele model opgeleverd ☐ Alle scenario's opgeleverd?			☐ Aangepaste parameter bestanden apart beschikbaar?	☐ Verslaglegging van een modellering volgens de BMP.	☐ Is modellering reproduceerbaar aan de hand van het logboek?

III Voorbeeld van een conceptueel model

Korte beschrijving van de "veldmethode" door Henk Tienstra

Dit is een korte beschrijving van de methode waarmee ongeveer in 1985 de beschermingszones rondom een aantal winningen in Overijssel werden berekend.

1. Rondom een aantal winningen (o.a. Nijverdal) waren een behoorlijk aantal grondwaterstands meetpunten aanwezig. Op basis van deze metingen heb ik toen een isohypsen patroon getekend. Dat ging met de hand op een "transparant" over een goede kaart waarop de peilputten stonden ingetekend met de meetwaarden erbij. Als ik terugkijk een monnikenwerk, maar wel heel nuttig. Je leert het gebied kennen en de eigenaardigheden van het betreffende gebied. Het ging hierbij om een aantal freatische winningen waar het programma FLOP van Kees van den Akker³ niet geschikt voor was.

Wet van Darcy

$$① Q = k \cdot A \cdot i$$

$$② Q = k \cdot D \cdot b \cdot i$$

$$③ v_s = \frac{Q}{n \cdot A}$$

$$④ v_s = \frac{Q}{n \cdot D \cdot b}$$

$$⑤ v_s = \frac{k \cdot D \cdot b \cdot i}{n \cdot D \cdot b} = \frac{k \cdot i}{n}$$

$$⑥ T = \frac{l}{v_s} = \frac{l}{\frac{k \cdot i}{n}}$$

$$⑦ T = \frac{l \cdot n \cdot D}{k \cdot i}$$

Q = debiet [m^3/s]
 A = oppervlakte [m^2]
 i = verhang [m/m]
 k = doorlatend coëfficiënt [m/s]
 D = dichte water voerend pakket [m]
 b = breedte tussen stroombanen [m]
 kD = eigen schape te bepalen uit pomp proef [m^2/s]
 v_s = snelheid water [m/s]
 n = porositeit [-]
 T = looptijd tussen 2 punten [s]
 l = afstand tussen 2 punten [m]
controle eenheden
 $T[s] = \frac{[m] \cdot [-] \cdot [m]}{[\frac{m^2}{s}] \cdot [\frac{m}{m}]} = \frac{[m^2]}{[\frac{m^2}{s}]} = [s]$
 $kD \rightarrow$ uit pomp proef
 $D \rightarrow$ uit pomp proef
 $n \rightarrow$ ook uit pomp proef of ondergrond
 $i \rightarrow$ verhang te meten uit de isohypsen kaart

2. Voor de betreffende winningen waren ook pompproeven uitgevoerd door de Waterleiding Maatschappij Overijssel (WMO). Hier waren goede rapporten van gemaakt. De pompproeven waren vooral ook bedoeld om de kwaliteit van het watervoerende pakket te onderzoeken en om een verlagingsspatroon te kunnen bepalen. Dit laatste vooral om de schade te kunnen bepalen.

Uiteraard leverde dat ook parameters op waarmee de eigenschappen van het watervoerende beschreven konden worden. Belangrijkste Eigenschap is daarbij de doorlatendheid kD [m^2/s] en de dikte D [m] van het watervoerende pakket.

$$i = \frac{h_2 - h_1}{l}$$

$$T = \frac{l \cdot n \cdot D}{kD \cdot i} \quad \left\{ \rightarrow T = \frac{l \cdot n \cdot D}{kD} \cdot \frac{l}{(h_2 - h_1)} = \frac{l^2 \cdot n \cdot D}{kD \cdot (h_2 - h_1)} \right.$$

$T = \frac{l^2 \cdot n \cdot D}{kD \cdot (h_2 - h_1)}$ is looptijd tussen twee punten op een eevlade stroombaan.
 $[s] = \frac{[m^2] \cdot [-] \cdot [m]}{[\frac{m^2}{s}] \cdot [m]} = [s]$

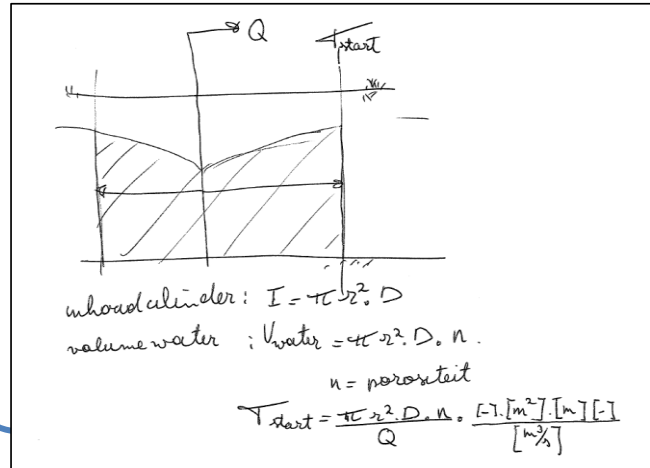
$$T = \frac{n \cdot D}{kD} \cdot \frac{l^2}{h_2 - h_1}$$

$\uparrow$
 - constant voor een winning
 - l, h_2 en h_1 zijn op te meten / af te lezen op de kaart.

³ Een toelichting bij het rekenprogramma Flop-1, C. van den Akker, Rijksinstituut voor Drinkwatervoorziening, 1975

3. De looptijd langs een stroombaan is een looptijd te berekenen met de formule zoals in het kader weergegeven. $T = (l \cdot n \cdot D) / (kD \cdot i)$. Opmerkelijk is dat in deze formule de afstand tussen de stroombanen niet meer voorkomt. Dus als er een goed isohypsen patroon is te maken dan kunnen ook een aantal stroombanen worden getekend.

ook het debiet is uit de formule voor de looptijd verdwenen. Dat is echter maar schijn, omdat dit debiet het verhang veroorzaakt. Bij een groter debiet zal het verhang ook groter zijn. Het debiet zit er dus nog steeds in.



4. Het is daarbij zaak om bijvoorbeeld bij de putten te beginnen met een cirkel en daar (bijvoorbeeld) keurig verdeeld over deze cirkel 8 stroombanen te tekenen.

5. De vraag is natuurlijk waar de looptijd begint. Dat heb ik opgelost door een cirkel om de winning te te trekken en na te gaan in hoeveel tijd de inhoud van de cilinder onder die cirkel is leeg getrokken. Met een simpele berekening is uit te rekenen hoe snel het volumewater uit de cilinders onttrokken. Dat geeft de "starttijd" van de looptijd berekening.

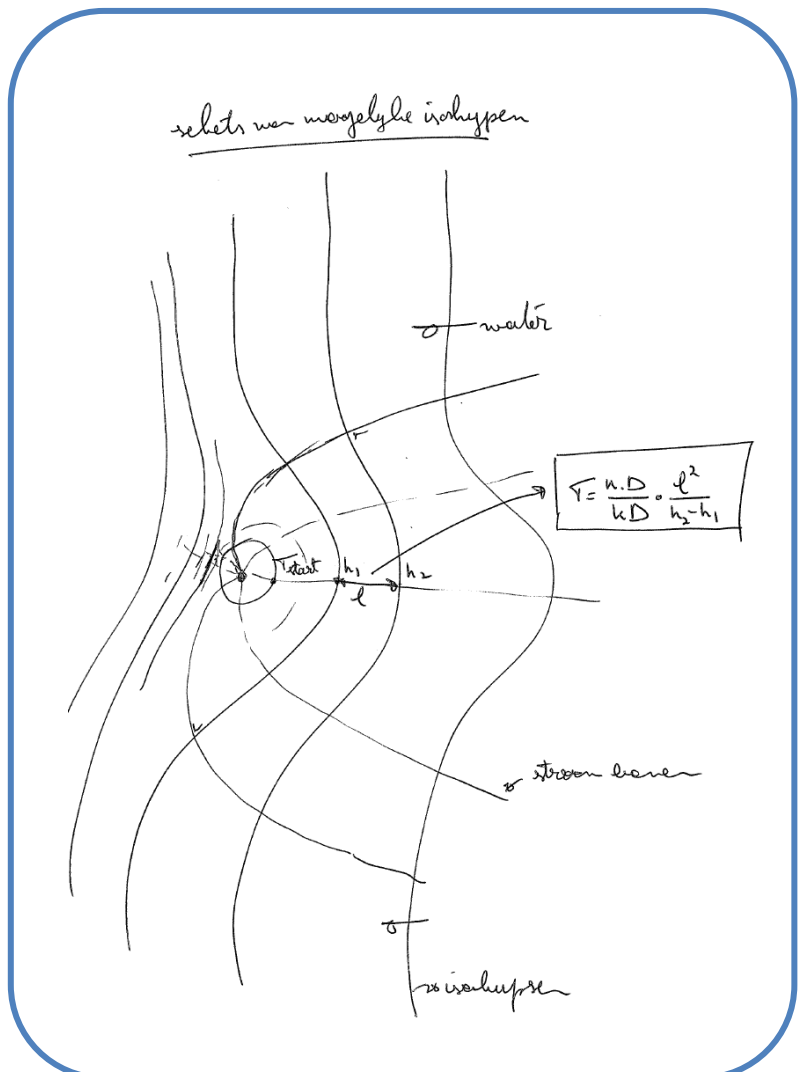
6. De stijghoogte op de cirkel waar de berekeningen beginnen moet wel (bij benadering) bekend zijn.

7. Nu kan over de stroombaan de looptijd tussen twee isohypsen berekend worden. Vanaf de onttrekking steeds verder naar buiten.

8. De beschermingszones worden bepaald door de punten met de gelijke looptijd (25 of 10 jaar met elkaar te verbinden).

9. Benedenstrooms van de winning is een soort 'waterscheiding'. Dit is ook het uiterste punt van het intrekgebied.

10. Het gaat hier om een simpele methode waarbij het volgende opgemerkt moet worden:
 (a) Er wordt uitgegaan van een constante dikte D van het watervoerende pakket. Is dit is een benadering. In de



Nederlandse omstandigheden zal het verval van de stijghoogte klein zijn in vergelijking met de dikte van het pakket.

- (b) Het is dus wel zaak dat er een goede isohypsen kaart beschikbaar is. Het maken van een dergelijke kaart vergt veel tijd.

