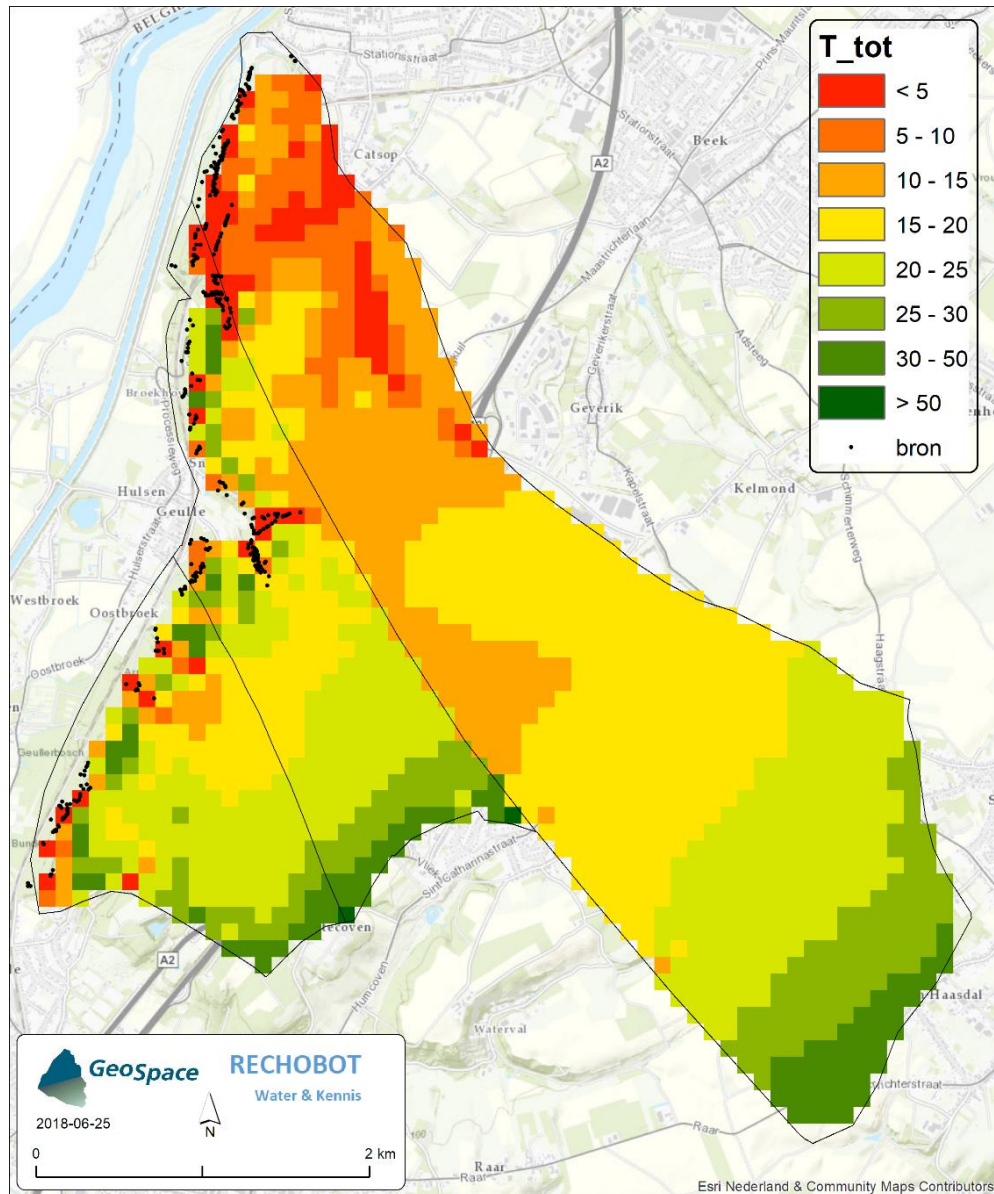


De reistijd van grondwater door verzadigde en onverzadigde zone case: Bronnen in het Bunder- en Elsloërbos



Door: Hein Bouwmeester (GeoSpace)
Rijke van de Weerd (Rechobot – Water & Kennis)
Datum: 10 juli 2018
Versie : 2^e Concept

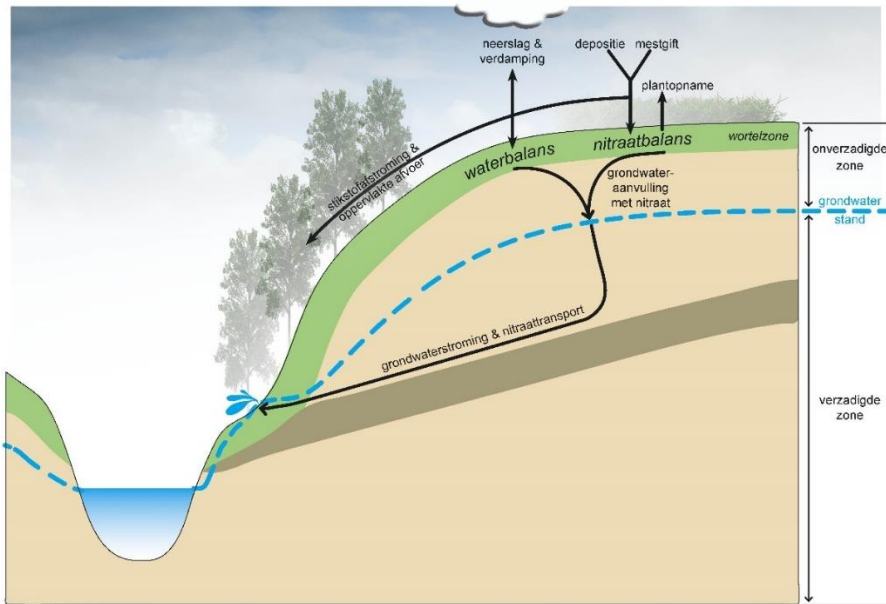


Inhoudsopgave

Inleiding.....	1
Materialen en methodes	2
Studiegebied	2
Bronbestanden.....	3
Geologische opbouw.....	3
Grondwaterstand.....	4
Grondwater aanvulling	6
Reistijden	6
Verticale reistijd	7
Horizontale Reistijd.....	8
Totale reistijd	9
Resultaten	10
Verticale Reistijd	10
Horizontale reistijd.....	11
Totale Reistijd	12
Discussie.....	15
Conclusies	15
Verder onderzoek	15
Bijlage I – berekening verticale reistijd.....	17
Bijlage II – berekening dikte verzadigde laag.....	19

1 Inleiding

2 De provincie Limburg heeft Rechobot – Water & Kennis opdracht gegeven om berekeningen uit te
3 voeren van het water- en nitraattransport in de intrekgebieden van de bronnen in het Bunderbos en
4 Elsoërbos¹. De intrekgebieden liggen in Zuid-Limburg op de westelijke plateaurand van het Centraal
5 Plateau. De berekeningen leveren inzicht op van de maatregelen die nodig zijn om de kalktufbronnen en
6 vochtige alluviale bossen in het Natura 2000 gebied Bunderbos en Elsoërbos te beschermen. Voor deze
7 berekeningen wordt het doorontwikkelde nitraatuitspoelingsmodel van IWANH², VATRAN³, gebruikt
8 samen met een stationaire stroombanenbenadering (SSBB) door de ondergrond. In VATRAN worden
9 berekeningen uitgevoerd in de bovenste 1,5 meter van de bodem (de wortelzone). In dit model wordt
10 het neerslagoverschot en de nitraatconcentratie in het neerslagoverschot berekend. Dit vormt de
11 output van VATRAN en de input van SSBB. In de SSBB wordt vervolgens de grondwaterstroming en het
12 nitraattransport in zowel de onverzadigde als verzadigde zone berekend. In Figuur 1 zijn de
13 modeldomeinen van VATRAN (groene deel) en SSBB (beige deel) schematisch weergegeven. Wanneer
14 we vanaf de zuidkant richting een doorsnede van de westelijke plateaurand kijken zou de
15 grondwaterstroming er zo uit kunnen zien als in het plaatje. In het plaatje is één stroombaan getekend.
16 In de praktijk zal het water via verschillende stroombanen variërend in lengte bij de bronnen uitkomen.
17 In het project is in eerste instantie een simpele benadering gekozen om de stroombanen en reistijden
18 (de verblijftijden in de stroombanen) van het grondwater te bepalen. In de loop van het project bleek
19 het wenselijk om de reistijden gedetailleerder te bepalen. Dit rapport beschrijft de input, aannames en
20 resultaten van deze gedetailleerdere benadering, en licht de hiervoor ontwikkelde methode globaal toe.



21
22 *Figuur 1 Doorsnede Limburgs Plateau met de Bronnen*

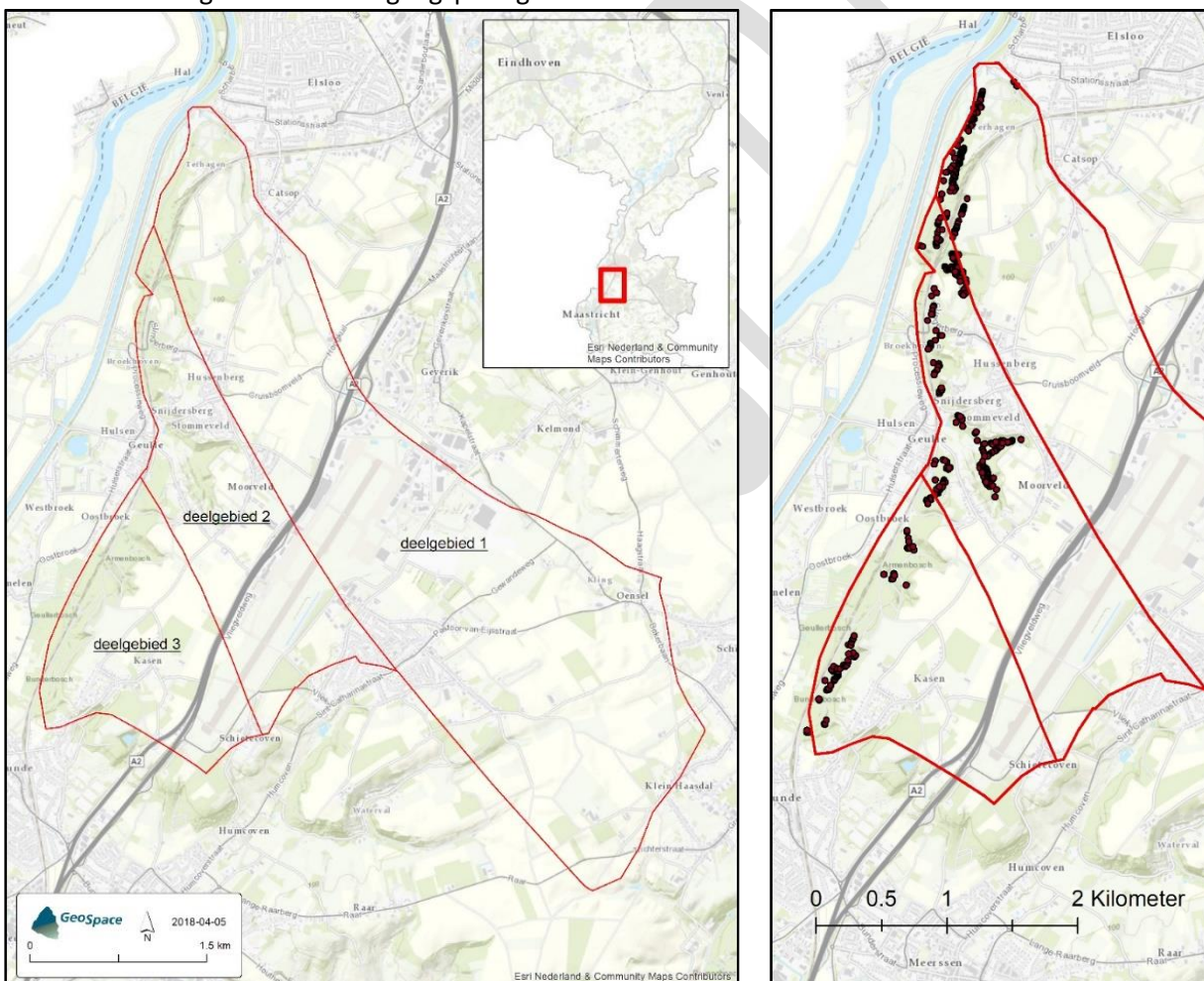
¹ Zie het hoofdrapport: Rechobot-Water & Kennis, 2018 Nitraat in het kalktufbronnen van het Bunder- en Elsoërbos in verleden, heden en toekomst. Een modelstudie ter onderbouwing van toekomstige maatregelen
² Provincie Limburg, Waterleidingsmaatschappij WML en Waterschap Roer en Overmaas waren opdrachtgevers van het project IwanH waarin een Integraal water en nitraatmodel voor het Heuvelland (Zuid-Limburg) is ontwikkeld door ARCADIS: Arcadis 2011 IWANH Eindrapportage. Pors, A & H van de Weerd. Opdrachtgever: Provincie Limburg.
³ Een gedetailleerde beschrijving van het uitspoelingsmodel van IwanH is te vinden in: Arcadis 2011 Nitraatuitspoelingsmodel IWANH. Van der Toorn, L & H. van de Weerd. Opdrachtgever: Provincie Limburg

23 Materialen en methodes

24 Studiegebied

25 Het natura2000 gebied Bunderbos en Elsloërbos ligt op de westelijke plateaurand van het plateau van
26 Schimmert, ook wel het Centraal plateau genoemd. Onderaan de westelijke plateaurand, gedeeltelijk in
27 het bos, ontspringen verschillende bronnen. Ook zijn er enkele bronbeken. Het studiegebied bestaat uit
28 deze bronzones en hun intrekgebieden (Figuur 2). De spoorlijn Maastricht - Roermond loopt midden
29 door de bronzones heen. Wat hoger op het plateau ligt de A2 met ten oosten daarvan het vliegveld
30 Maastricht-Aken. Op het plateau liggen landbouwgronden tussen het bos en de A2 en ook ten oosten
31 van de A2. Ook liggen er nog enkele dorpen in het gebied.

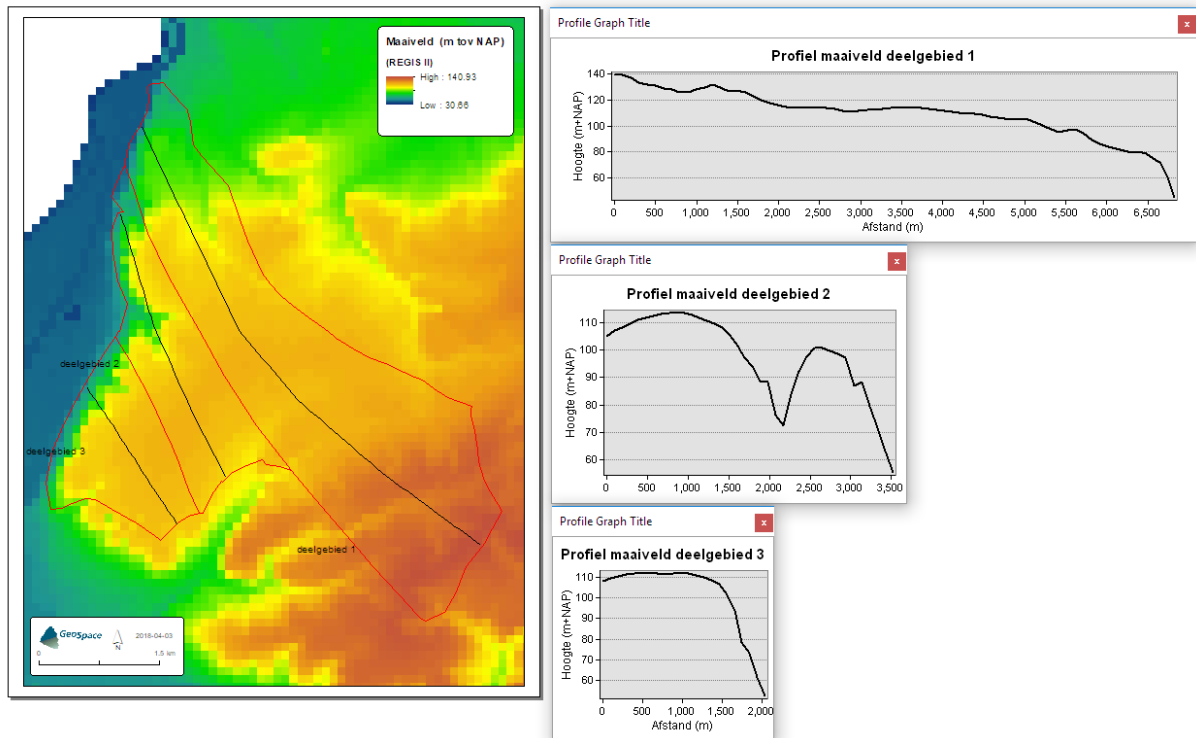
32 In een eerdere studie is het intrekgebied van de bronzones in drie deelgebieden verdeeld. Van noord
33 naar zuid zijn dit: 1) Het gebied ten Noorden van de Schin op Geul breuk, 2) Het gebied tussen de Schin
34 op Geul breuk en de Geulle breuk en 3) het gebied ten zuiden van de Geulle breuk. In deze studie
35 worden deze deelgebieden als uitgangspunt genomen.



36
37 *Figuur 2* Overzicht van de in rood omliggende deelgebieden (links) en de bronnen als zwarte stippen (rechts).

38 De hoogteligging van het maaiveld wordt beschreven in Figuur 3. Deelgebied 1 loopt geleidelijk
39 bergafwaarts naar het Maasdal in het westen. In het oosten van deelgebied 1 is een beekloop te zien die

40 westwaarts naar het Maasdal loopt en mogelijk een water scheidend effect heeft. Deelgebieden 2 en 3
41 lopen minder geleidelijk zoals te zien is in de dwarsprofielen.

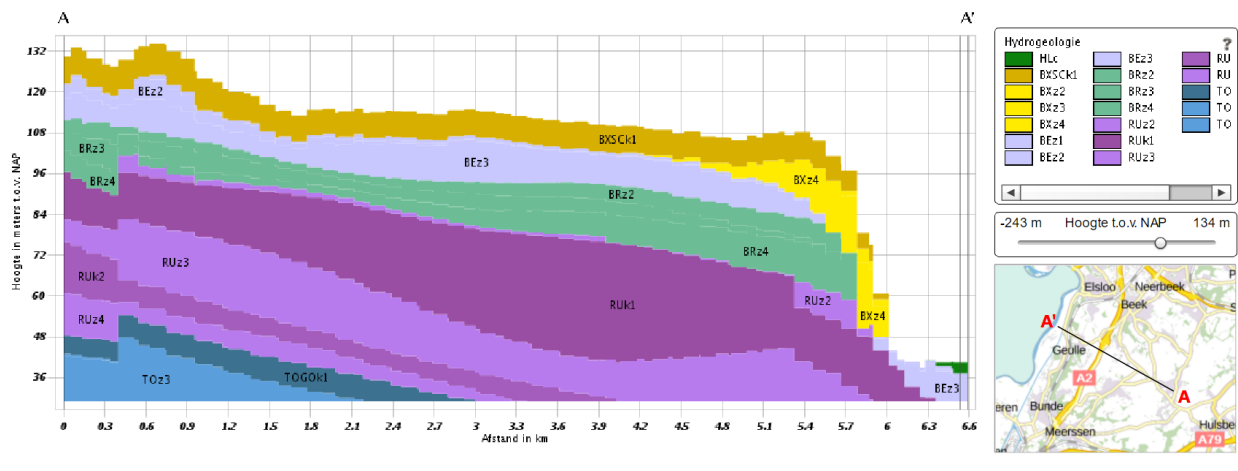


42
43 *Figuur 3 Hoogtemodel maai veld en dwarsprofielen van de zwarte lijnen binnen de drie rood omliggende deelgebieden.*
44 *(bron: REGIS II).*

45 Bronbestanden

46 Geologische opbouw

47 De geologische opbouw is belangrijk voor het bepalen van de reistijden van het grondwater in de
48 ondergrond. Bij het DINO-loket zijn twee modellen beschikbaar die elk de geologische gelaagdheid van
49 Nederland in een 3D model weergeven. REGIS II let speciaal op de hydrogeologische eenheden. Dit zijn
50 lagen met min of meer uniforme hydraulische eigenschappen zoals doorlatendheid. Deze hydro-
51 geologische eenheden vallen samen, of zijn onderdeel van, de in het DGM, het andere 3D model,
52 onderscheiden lithostratigrafische eenheden. De diepteligging van de onder- en bovenkant en de dikte
53 van de eenheden zijn vastgelegd in grid-bestanden met celgrootte van 100 bij 100 meter.
54 Het DINO-loket biedt de optie om een vertical doorsnede te maken van een gekozen traject. Hieruit komt
55 naar voren dat in het studiegebied vijf lithostratigrafische formaties van belang zijn. De bovenste
56 (geelbruine) is de formatie van Boxtel, De grijspaarse daaronder is de formatie van Beegden. De groene
57 daaronder is de formatie van Breda. De dikke paarse laag, met verschillende (donkere of lichtere) kleiige
58 en zandige sublagen daaronder is de Rupelformatie. Onder de Rupelformatie ligt de blauw-groene
59 Tongeren formatie met donkere en lichtere kleiige en zandige sublagen.



60

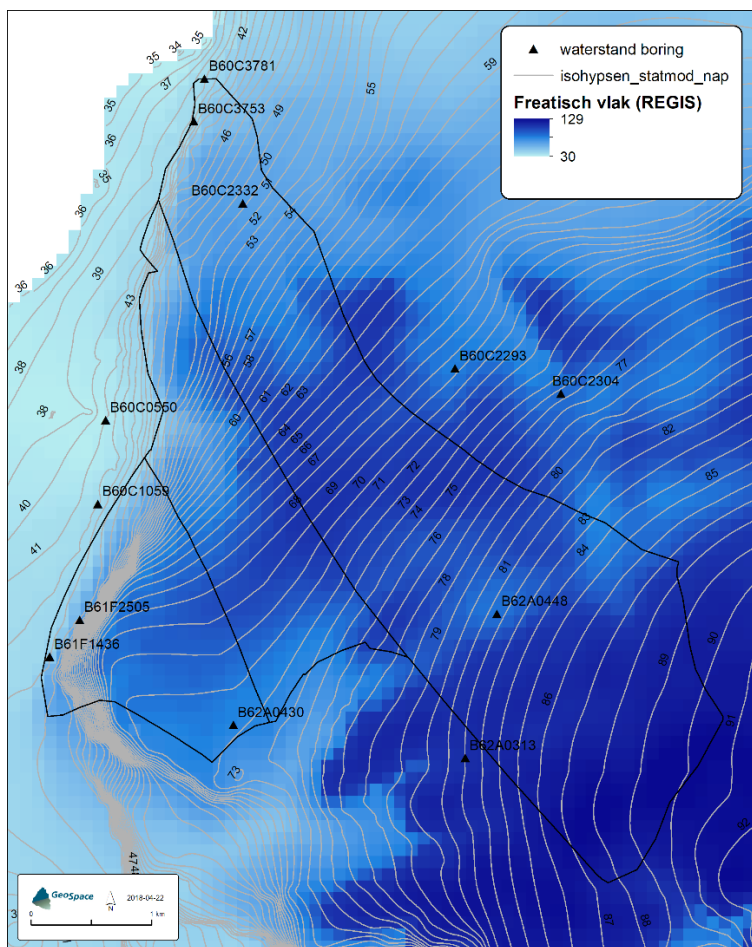
61 *Figuur 4 Verticale doorsnede uit REGIS II.*62 **Grondwaterstand**

63 Er zijn drie bronbestanden bekeken die het grondwaterniveau beschrijven. Het eerste is een uit REGIS II
 64 afkomstige kaart van het freatisch vlak (m+NAP). Deze kaart is in deze analyse gebruikt in de
 65 berekeningen. De tweede is een isohypsen kaart afkomstig van berekeningen met het Ibrahim model.
 66 Van deze kaart met contourlijnen (m+NAP) is een vlakdekkend bestand afgeleid. Het derde bronbestand
 67 zijn de grondwatermonitorputten waarin grondwaterstanden worden gemeten afkomstig van het DINO-
 68 loket⁴. In het Dino-loket zijn in de deelgebieden en vlak eruiten in totaal twaalf meetreeksen van
 69 waterstanden in boorputten beschikbaar.

70

71 In Figuur 5 zijn de putten weergegeven met op de achtergrond het freatisch vlak (REGIS II) met daarover
 72 heen de Isohypsen contourlijnen. In Tabel 1 zijn de gemiddelde waterstanden weergegeven op de
 73 locaties van de waterstandputten. Daarnaast zijn op dezelfde locaties de waterstanden volgens REGIS II
 74 en volgens de Isohypsen kaart weergegeven. De verschillen in waterstand zijn groot tussen de
 75 bronbestanden.

⁴ Gedownload van <https://www.dinoloket.nl/ondergrondgegevens> op 2 april 2018.



76

77 *Figuur 5 beschikbare waterstandsboorputten geplot samen met isohypsen uit Ibrahym en het freatisch vlak uit*
 78 *Regis II Tabel 1 gemiddelde grondwaterstand van de tijdreeksen (m+NAP) . De twee rechter kolommen beschrijven*
 79 *de grondwaterstand op dezelfde locatie als de putten maar dit betreft het freatisch vlak meegeleverd met REGIS II⁵*
 80 *en isohypsen kaart gegenereerd vanuit Ibrahym⁶.*

Locatie	X-coördinaat	Y-coördinaat	N	Waterstand (m+NAP)		
				Gemiddelde tijdreeksen putten (m)	Freatisch Vlak (REGIS II)	Isohypsen (Ibrahym)
B60C0550	180210	325920	1341	33.74	32.48	41.05
B60C1059	180145	325225	6012	36.61	40.06	41.98
B60C2293	183110	326350	1128	95.64	96.15	68.72
B60C2304	183990	326140	580	95.93	98.47	75.44
B60C2332	181348	327721	3312	58.97	75.44	49.75
B60C3753	180940	328401	650	40.34	42.94	39.78
B60C3781	181029	328756	815	38.72	41.90	38.85
B61F1436	179744	323956	3519	40.81	53.81	42.99
B61F2505	179993	324263	3003	70.47	68.50	44.39
B62A0313	183195	323115	6225	92.80	109.37	82.03

⁵ Aangeven oorspronkelijke herkomst van dit bestand

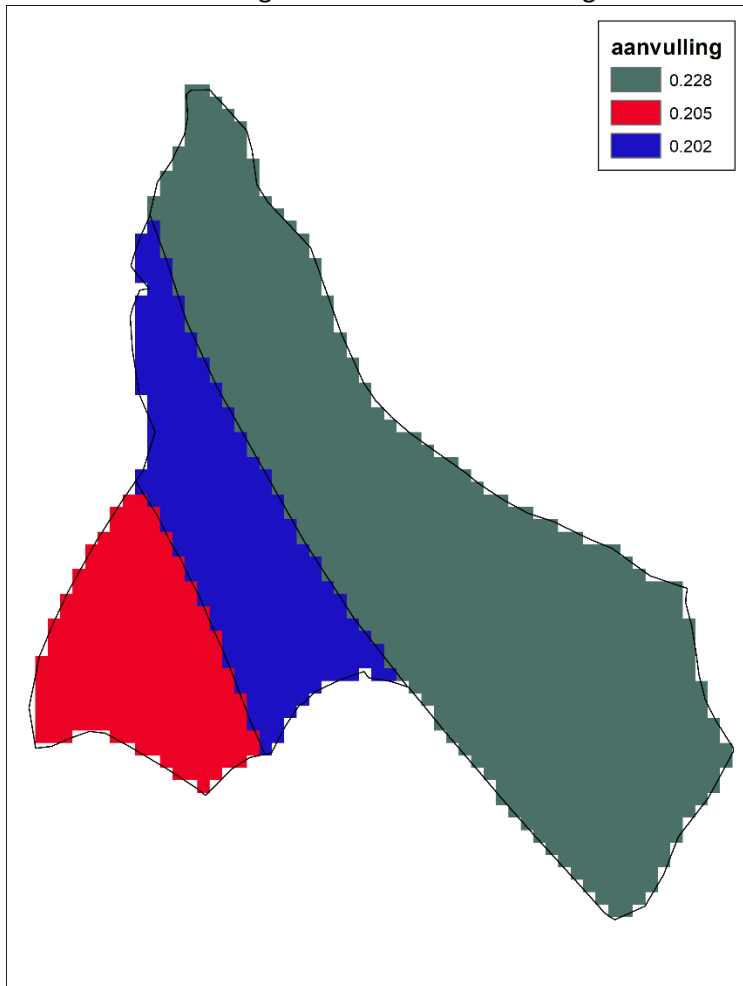
⁶ Aangeven welke versie van Ibrahym

B62A0430	181270	323390	5870	46.70 ⁷	93.81	71.80
B62A0448	183458	324312	2152	97.20	97.88	81.55

81

82 Grondwater aanvulling

83 Als grondwateraanvulling is per deelgebied een constante gemiddelde waarde gehanteerd. Deze
84 gemiddelden waarden zijn gelijk aan de met VATRAN berekende grondwateraanvulling per deelgebied
85 over de periode 1957-2017. Deze gemiddelden variëren tussen 0,202 tot 0,228 meter per jaar. In plaats
86 van deze gemiddelde aanvulling zou ook een kaart van de grondwateraanvulling als input gebruikt
87 kunnen worden, de ruimtelijke variatie in de grondwateraanvulling als gevolg van helling en landgebruik
88 kan dan worden meegenomen. In deze studie is gekozen om met gemiddelden te werken.



89

90 *Figuur 6 Gehanteerde aanvulling waarden (m/j) per deelgebied.*

91 Reistijden

92 Grondwater stroomt relatief traag en vaak over grote afstanden. Het is vaak tientallen of zelfs
93 duizenden jaren onderweg voordat het weer aan de oppervlakte komt. In dit project bepalen we
94 reistijden van neerslag die via het freatisch watervoerende pakket afstroomt richting bronnen. De totale
95 reistijd is in dit project gedefinieerd als de verticale reistijd plus de horizontale reistijd. De verticale

⁷ Dit betreft een grondwaterstand van een diepere (niet freatische) laag.

96 reistijd is de tijd die de neerslag nodig heeft om het grondwater te bereiken. Hierbij worden drie
97 aannames gedaan:

- 98
- 99 • De grondwaterstanden fluctueren niet in de tijd,
- 100 • het vochtgehalte per sub-laag is constant, er wordt aangenomen dat er sprake is van stationaire
- 101 stroming door de onverzadigde zone (evenwicht)
- 102 • de aanvulling van infiltrerend regenwater is constant.

103 Verticale reistijd

104 De verticale reistijd is vooral afhankelijk van de dikte en van de geologische opbouw van de
105 onverzadigde zone. Deze variabelen zijn bepaald op basis van het DGM en het REGIS II model. Om de
106 verticale reistijd van infiltrerend water door de onverzadigde zone te bepalen is de volgende methodiek
107 gebruikt:

- 108
- 109 1. De grondwaterstanden zijn gebaseerd op de kaart van het freatisch vlak uit het REGIS II model
110 (m+NAP). Er is ook gekeken naar de toegeleverde isohypsen kaart (isohypsen_statmod_nap.shp)
111 maar deze gaf minder aannemelijke resultaten en de verschillen met de gemeten
112 grondwaterstanden waren groter.
- 113 2. Voor de grondwateraanvulling is gebruik gemaakt van een gemiddelde aanvulling per
114 deelgebied in m. Ook is gekeken naar een toegeleverde grondwater aanvullingskaart
115 (GrondwaterAanvulling_2018-12-31.asc) gebaseerd op actueel landgebruik in 2018. Maar deze
116 is niet gebruikt. Redenen hiervoor zijn a) het landgebruik varieert in de tijd, b) voor bepaling van
117 de (horizontale) reistijd in de verzadigde zone en ook bij de toepassing van de stationaire
118 stroombaanbenadering (SSBB) wordt gerekend met gemiddelden per (deel)gebied .
- 119 3. Uit het DGM is de boven- en onderkant (m+NAP) van de drie bovenste lagen meegenomen.
120 Binnen deze lagen waren de lithologische verschillen niet groot genoeg om onderscheid te
121 maken. Zo bestond Boxtel voornamelijk uit lemlagen, Beegden uit grind en Breda uit zand.
 - 122 a. Fm. van Boxtel,
 - 123 b. Fm. van Beegden,
 - 124 c. Fm. Van Breda.
- 125 4. Uit REGIS II is de boven- en onderkant (m+NAP) meegenomen van 2 sub-lagen uit de Rupel
126 formatie. Reden hiervoor was dat de bovenste (zand 2⁸) laag lithologisch behoorlijk verschilde
127 van de laag daaronder (klei 1) en dus behoorlijk verschilt in vochtgehalte. Bovendien gold de
128 bovenkant van klei 1 in deelgebied 1 en 2 als hydrologische basis voor de verzadigde zone, en
129 dus als onderkant van het eerste watervoerend pakket.
 - 130 a. 2^{de} zandlaag van Rupel Fm.
 - 131 b. 1^{ste} kleilaag van Rupel Fm.
- 132 5. Aan de dikte van elke laag (onverzadigde zone) kan het vochtgehalte worden gekoppeld, waarbij
133 constante waardes zijn aangenomen (Tabel 2).

134

⁸ De eerste zandlaag is niet aanwezig in REGIS II in het deelgebied

135 *Tabel 2 Gebruikte waarden voor het vochtgehalte voor iedere laag, gebruikt bij de bepaling van de verticale*
136 *reistijden.*

Formatie	Laag	Vochtgehalte (%)
Boxtel	samengevoegd	0,39
Beegden	Samengevoegd	0,03
Breda	Samengevoegd	0,2
Rupel	Zand	0,2
Rupel	klei	0,4

137
138 6. Per onverzadigde (deel)laag kan nu de verticale reistijd bepaald worden. De totale reistijd wordt
139 berekend door sommatie van de verticale reistijd per laag (zie Bijlage I – berekening verticale
140 reistijd).

141 Horizontale Reistijd

142 Per intrekgebied, wordt voor elk punt op het freatisch vlak (i.e. de grondwaterspiegel) de horizontale
143 reistijd bepaald. De verticale reistijd op dit punt kan hierbij worden opgeteld zodat er een totale reistijd
144 verkregen wordt. De op deze manier onafhankelijk verkregen verdeling van totale reistijden kan
145 getoetst worden met beschikbare tritiumgegevens in de bronnen en kennis van tritiumgehalten in de
146 neerslag⁹.

147
148 Om de reistijd te bepalen zetten we de volgende stappen:

149 1. We gebruiken een benadering¹⁰ gebaseerd op vergelijkingen die zijn ontwikkeld door Ernst en
150 Bruggeman en uitgewerkt in Meinardi¹¹. In deze benadering wordt een relatie gelegd tussen de
151 verdeling van naar de bronnen toestromende stroombanen (in diepte) en de verdeling van het
152 infiltrerend oppervlak van het intrekgebied. Hierbij doen we de volgende aannames: 1) de
153 bronnen liggen in een lijn, 2) de intrekgebieden zijn rechthoekig, 3) de aquifer is homogeen en
154 heeft een vaste dikte. De reistijd vanaf de grondwaterspiegel wordt dan bepaald met de
155 formule:

$$156 \quad t = - \left(p * \frac{D}{l} \right) * \ln \left(1 - \frac{x}{X} \right)$$

157 Waarin:

158 x = afstand tot de bronzone (m)

159 X = maximale afstand tot de bronzone (m)

160 D = dikte aquifer (m)

161 p = porositeit (-)

162 l = grondwateraanvulling (m/j)

163 t = reistijd (j) in aquifer van water infiltrerend op afstand x

164
165 2. Om de afstand tot de bronzone te bepalen zijn de 100x100m rekencellen omgezet naar
166 gridpunten die in het midden van elke cel liggen. Vervolgens is over de breedte van elk

⁹ Hendrix W.P.A.M. & Meinardi, C.R. 2004. Bronnen en bronbeken van Zuid-Limburg kwaliteit van grondwater, bronwater & beekwater. RIVM rapport 500003003/2004

¹⁰ Van de Weerd et al, 2018 in preparation

¹¹ Meinardi C.R., (1994), Groundwater recharge and travel times in the sandy regions of the Netherlands, Ph.D. Thesis VU Amsterdam, RIVM report no. 715501004

167 deelgebied een denkbeeldige lijn getrokken tussen de bronnen (Figuur 2) waarbij bij meerdere
168 bronnen gekozen is voor de meest bovenstroomse. Vervolgens is de kortste hemelsbrede
169 afstand bepaald tussen elk gridpunt en de lijn.

170 3. Voor elk gridpunt bepalen we de totale aquiferdikte en de dikte van de individuele lagen tussen
171 de hydrologische basis en het freatisch vlak (Zie bijlage II). Voor deelgebied 1 en 2 is het eerste
172 kleipakket van de Rupel formatie de hydrologische basis. Voor deelgebied 3 wordt de formatie
173 van Tongeren (Goudsberg klei) als hydrologische basis genomen. Door ruimtelijke interpretatie
174 van deze informatie samen met kennis van de richting van de grondwaterstroming kan de
175 karakteristieke aquiferdikte, en aquiferlaag bepaald worden. Met behulp van deze dikte en
176 eigenschappen van de aquiferlaag kan dan een reistijdverdeling in de verzadigde zone bepaald
177 worden.

178
179 *N.B. Wanneer de ondergrond uit verschillende watervoerende lagen bestaat, kan de ene laag,
180 met hoge horizontale doorlatendheid (Kh) substantieel bijdragen en de andere, met lagere (Kh),
181 bijna niet aan de grondwaterstroming. De helling van de lagen en de geometrie van de lagen
182 kunnen ook medebepalend zijn voor de stroming. Een voorbeeld hiervan is dat de stroomsnelheid
183 in een watervoerende grindlaag, variërend in dikte van 15 tot 3 meter, bepaald zal worden door
184 de plek met de kleinste dikte. De stroming in een deel van de aquifer kan mogelijk
185 verwaarloosbaar zijn of juist relatief groot zijn vanwege de geometrie of vanwege variaties in de
186 horizontale doorlatendheid.*

187
188 4. Al doende bleek dat met behulp van eigenschappen van de lagen en aquiferdiktes het heel
189 moeilijk was om een karakteristieke aquiferlaag en dikte te bepalen en hiermee de reistijden te
190 bepalen. Vanwege de complexiteit van de ondergrond is gedetailleerd nader onderzoek nodig
191 om onderbouwde keuzes te maken. Hierdoor was het niet mogelijk om een onafhankelijke
192 schatting te maken van de horizontale reistijden.

193 5. Uiteindelijk is gekozen om de horizontale reistijden te bepalen op basis van beschikbare
194 tritiumgegevens in de bronnen en kennis van tritiumgehaltenes in de neerslag¹². Hierbij worden de
195 bepaalde verticale reistijden als invoer gebruikt.

196 6. Vergelijking van de gebruikte aquiferdiktes in de benadering en werkelijke aquifer- en/of
197 laagdiktes op gridpunten kan bij nadere detailanalyse mogelijk interessante nieuwe inzichten
198 opleveren over de watervoerende lagen.

199 Totale reistijd

200 De totale reistijd is simpelweg de verticale en horizontale reistijden bij elkaar opgeteld.

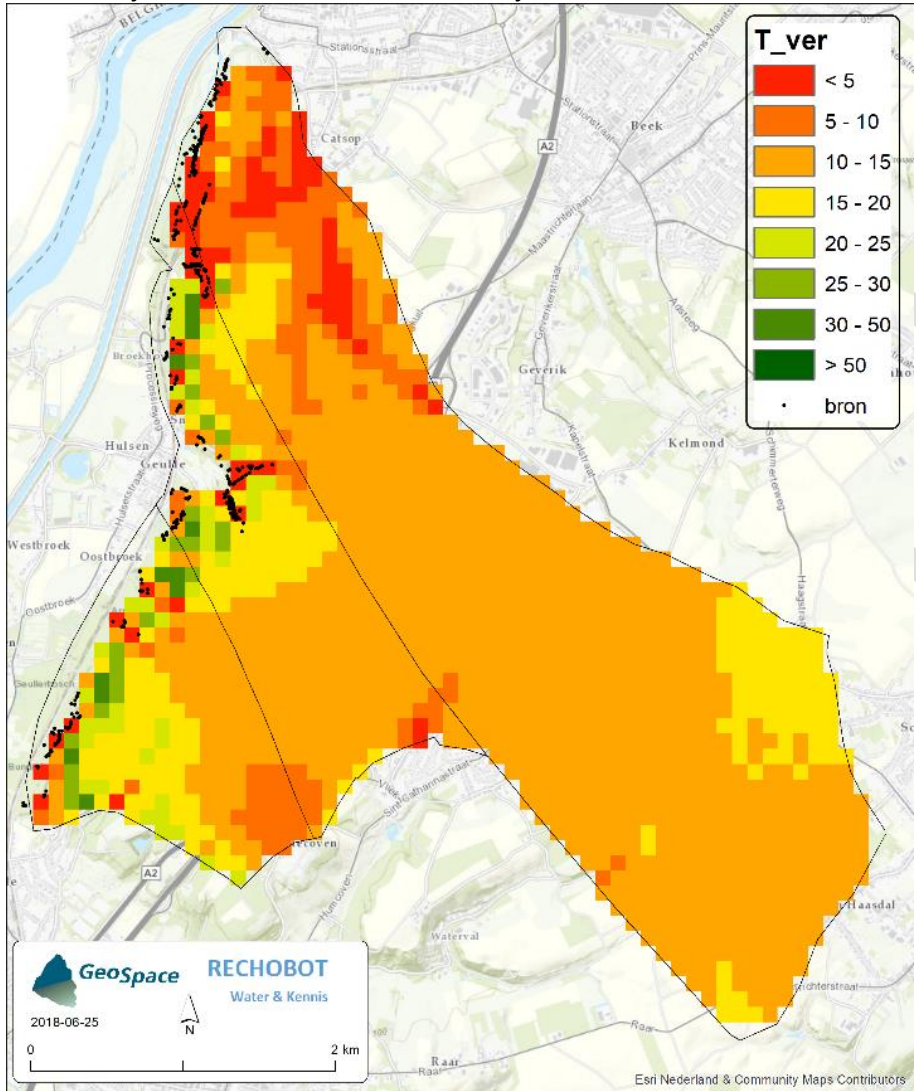
201 Per intrekgebied, is voor elk punt de verticale reistijd bepaald. De horizontale verblijftijd op dit punt kan
202 hierbij worden opgeteld zodat er een totale reistijd verkregen wordt. Idealiter worden de horizontale en
203 verticale reistijd onafhankelijk bepaald en wordt zo een onafhankelijke verdeling van totale reistijden
204 verkregen. Deze kan getoetst worden met beschikbare gegevens over de ouderdom van het
205 grondwater. In ons geval zijn de verticale reistijden onafhankelijk bepaald en zijn de horizontale
206 reistijden bepaald met behulp van kalibratie van de totale reistijdverdeling op beschikbare
207 tritiumgegevens in de bronnen en kennis van tritiumgehaltenes in de neerslag¹².

¹² Hendrix W.P.A.M. & Meinardi, C.R. 2004. Bronnen en bronbeken van Zuid-Limburg kwaliteit van grondwater, bronwater & beekwater. RIVM rapport 500003003/2004

208 Resultaten

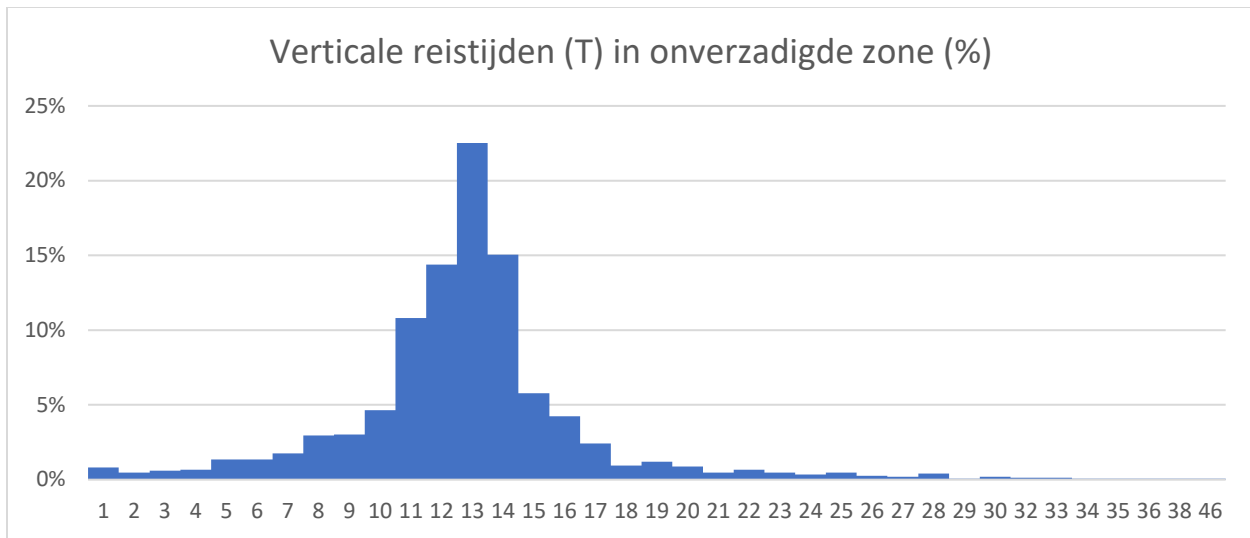
209 Verticale Reistijd

210 De reistijd in de onverzadigde zone is weergegeven in Figuur 7. In het histogram in Figuur 8 is de
211 verdeling van alle cellen in de deelgebieden weergegeven. Hieruit blijkt dat 90% van het grondwater
212 binnen 17 jaar het freatisch vlak bereikt. Bijna twee derde doet hier tussen de 11 en 14 jaar over.



213

214 *Figuur 7 de verticale reistijd door de onverzadigde zone van de deelgebieden.*



215

216 *Figuur 8 Histogram van de verticale reistijden van alle cellen binnen de deelgebieden.*

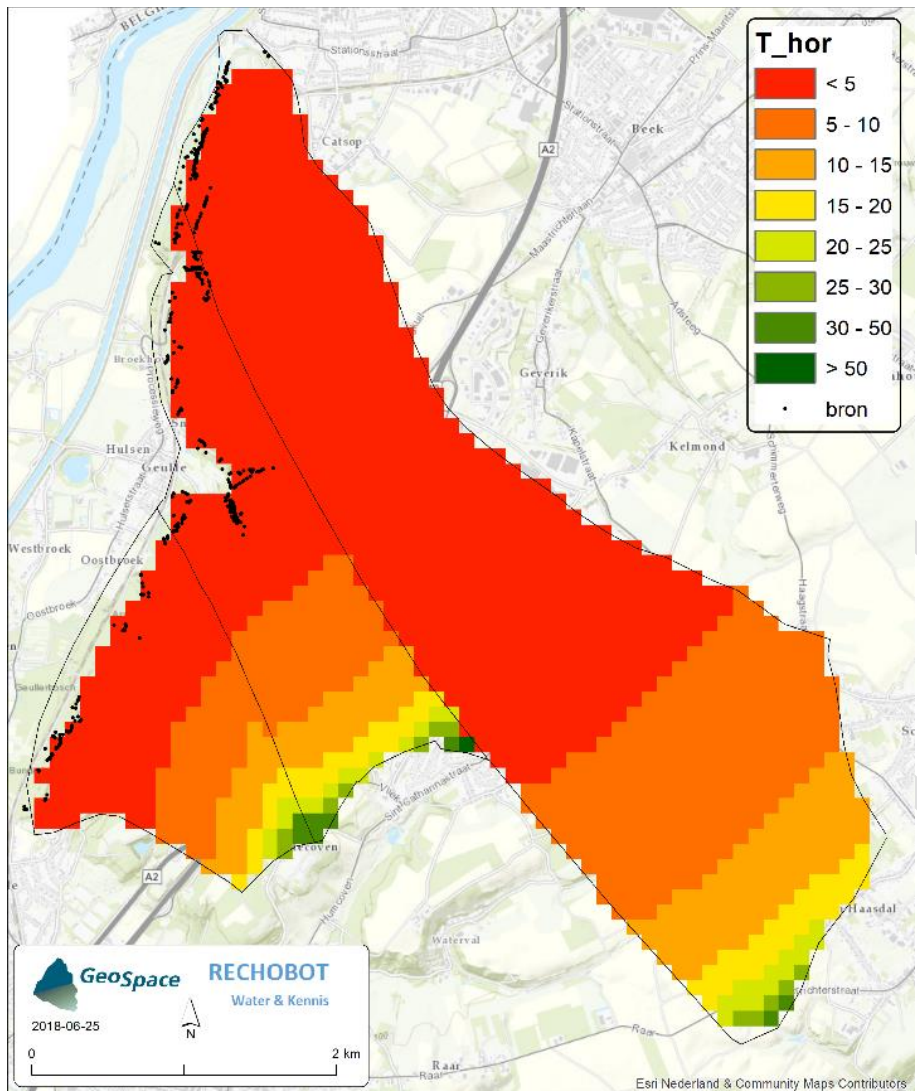
217 **Horizontale reistijd**

218 Tabel 3 bevat parameters en eigenschappen relevant voor de bepaling van de horizontale reistijd. Per
 219 deelgebied is de minimale (>10%) en maximale (<90%) totale aquiferdikte gegeven. Deze is bepaald op
 220 een transect midden door het deelgebied. De lengte van dit transect wordt ook weergegeven. Daarnaast
 221 worden de parameters weergegeven die uiteindelijk gebruikt zijn bij het benaderen van de
 222 verblijftijdsverdeling. De in de berekening gebruikte aquiferdiktes zijn veel lager dan de werkelijke
 223 totale diktes, wat erop duidt dat waarschijnlijk maar een klein deel van de aquifer substantieel aan de
 224 stroming bijdraagt.

225 *Tabel 3 Parameters en eigenschappen relevant voor bepaling van reistijd in de verzadigde zone*

parameter/eigenschap	deelgebied 1	deelgebied 2	deelgebied 3
max (< 90%) totale aquiferdikte (m)	28	24	38
min (> 10%) totale aquiferdikte (m)	16	8	12
Hydrologische basis	Rupel klei	Rupel klei	Goudsberg klei
Lengte transect midden (km)	7	3,2	2,1
Dikte gebruikt in berekening (m)	4	5	4
porositeit gebruikt in berekening (-)	0,3	0,3	0,3
gwa m/j	0,228	0,202	0,205

226



227
228 *Figuur 9 horizontale reistijden door de verzadigde zone van de deelgebieden.*

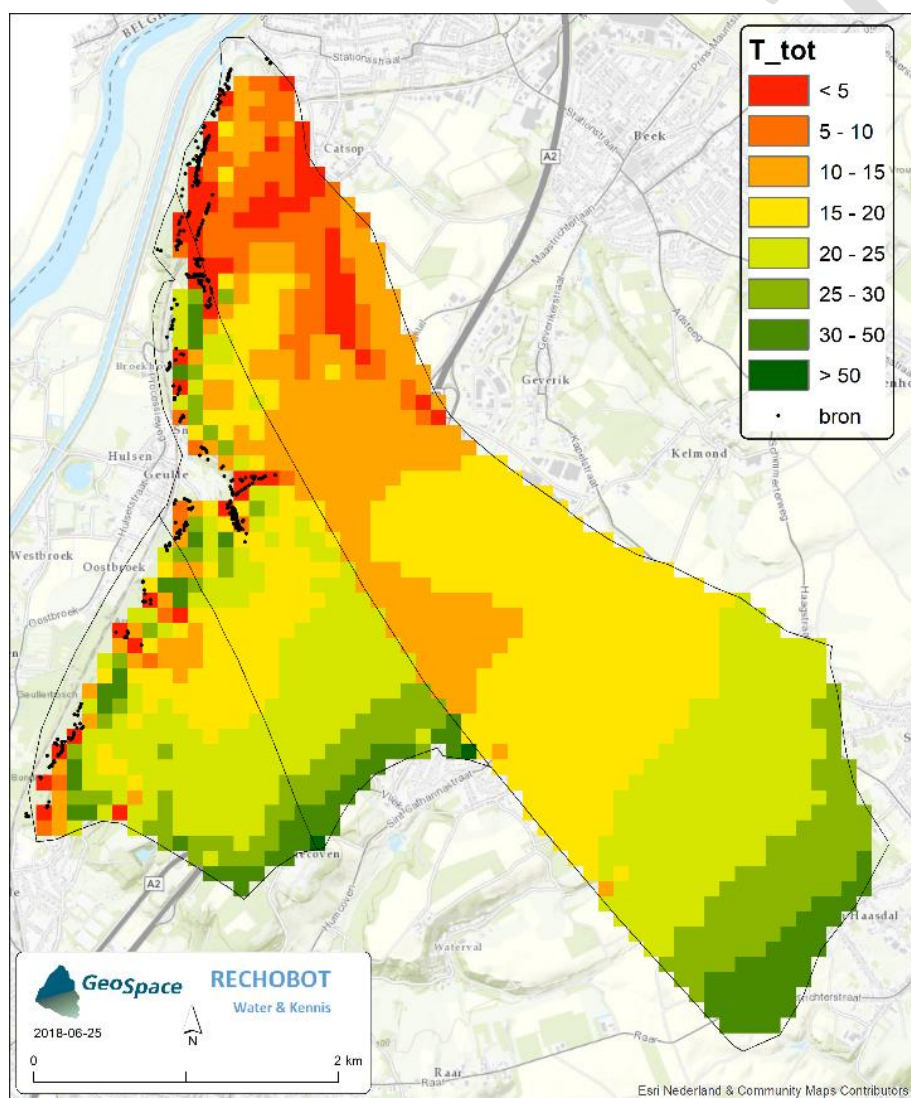
229 **Totale Reistijd**

230 Tabel 4 bevat parameters en eigenschappen welke gebruikt zijn voor, of de uitkomst zijn van de totale
 231 reistijd bepaling. We berekenen een mediane en gemiddelde verblijftijd in deelgebied 1 rond de 17 jaar.
 232 en rond de 21 jaar in deelgebied 2 en 3. We berekenen ook dat 90% van het water waarde een totale
 233 reistijd heeft beneden de 30 jaar. In alle deelgebieden wordt een grotere verticale dan horizontale
 234 verblijftijd berekend, waarbij de verticale verblijftijd bijna een factor 2 (deelgebied 2) of ruim een factor
 235 2 (deelgebied 1 en 3) groter is.
 236

237 Tabel 4 Parameters en eigenschappen behorend bij de totale reistijdbepaling (input/output)

parameter/eigenschap	deelgebied 1	deelgebied 2	deelgebied 3
T_tot med (50% water < T_tot, j)	16,54	20,77	21,36
T_tot 90% (90% water < T_tot, j)	26,26	29,11	30,16
T_tot gemiddeld (j)	17,62	21,47	21,39
T_vert gemiddeld (j)	12,35	13,96	15,45
T_hor gemiddeld (j)	5,28	7,51	5,94
T_vert/T_hor gemiddeld (-)	2,34	1,86	2,60
Tritium conc_min (H3, TU)	12,00	13,00	11,50
Tritium conc_max (H3, TU)	15,50	22,00	21,00
Tritium conc berekend (H3, TU)	14,73	19,07	19,37

238



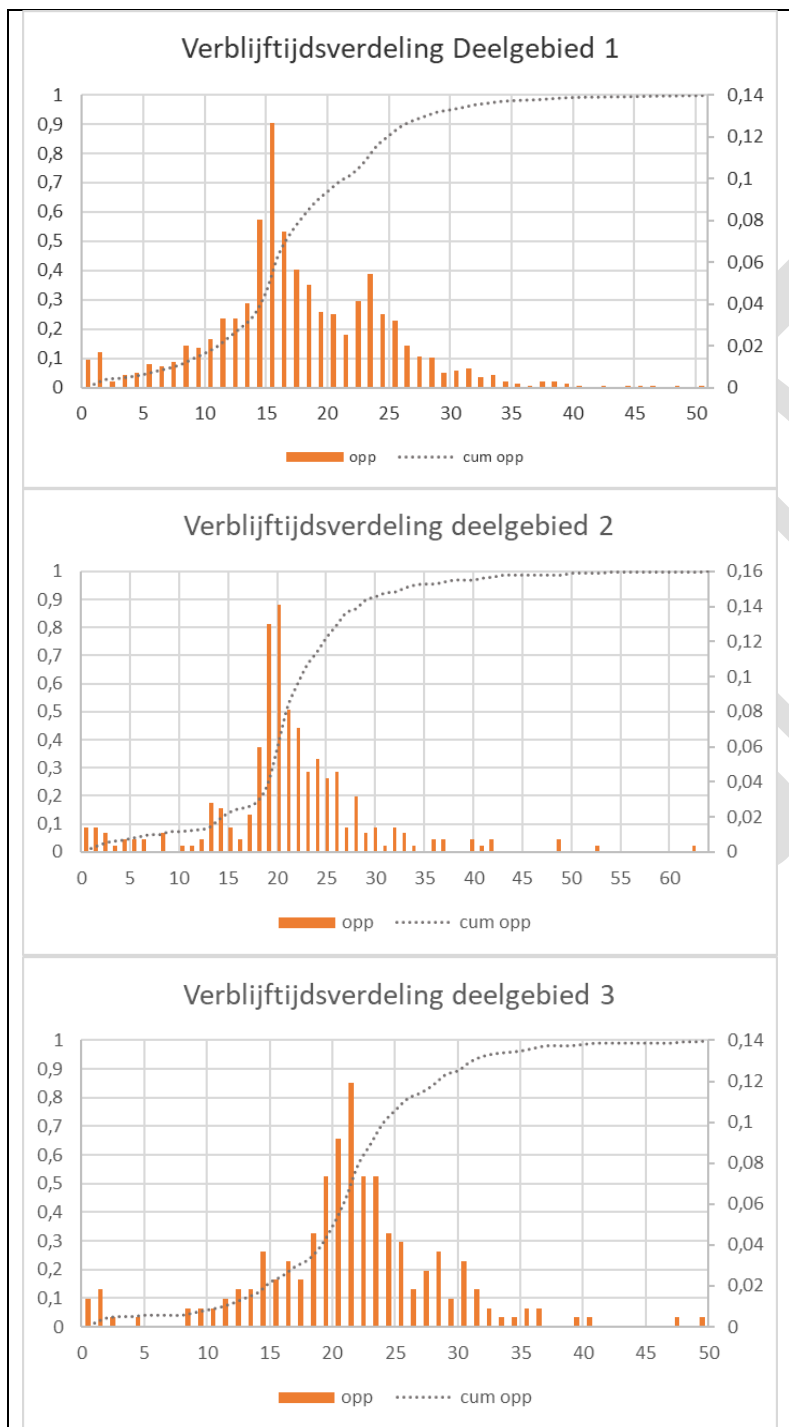
239

240 Figuur 10 verdeling van de totale reistijd zien voor de drie deelgebieden.

241 In figuur 11 zien we de verdeling van de reistijd per deelgebied. De getallen uit Tabel 4 kunnen

242 gedeeltelijk uit deze figuren worden afgelezen. Voor met name deelgebied 1 en 2 geldt dat de verblijftijd

243 niet "normaal verdeeld" is. Er komt meer water na de "piek" (de meest voorkomende verblijftijd) dan
244 ervoor. De mediane verblijftijd (cum opp = 0,5; 50% van het water is aangekomen) komt na de meest
245 voorkomende verblijftijd. Bij deelgebied 3 zijn deze praktisch gelijk.
246



247 *Figuur 11 Verblifjijdsverdeling in de verschillende deelgebieden. Hierin wordt de fractie van het oppervlak (rechter*
248 *y-as), en de cumulatieve fractie van het oppervlak (linker y-as) met een bepaalde verblijftijd (x-as) weergegeven.*

249

250
251

252 Discussie

- 253 • Het grondwaterniveau is van groot belang voor bepaling van zowel de dikte van de verzadigde
254 als de onverzadigde zone. In deze analyse is het freatisch vlak uit REGIS II meegenomen. Deze
255 week behoort af van de isohypsenkaart bepaald met Ibrahim en plaatselijk van de
256 grondwaterstandswaarnemingen beschikbaar in Dino. Omdat er maar een beperkt aantal
257 grondwaterstandswaarnemingen zijn, is het lastig te beoordelen welke bron het meest
258 betrouwbaar is.
- 259 • In deze analyse zijn niet alle sub-lagen meegenomen maar veelal de hele laagdikte (voor Boxtel,
260 Beegden en Breda). De sub-lagen kunnen andere lithologische eigenschappen, die het resultaat
261 zouden kunnen beïnvloeden.
- 262 • Voor dit onderzoek is het REGIS II model gebruikt. Dit is een benadering van de werkelijke
263 laagopbouw op basis van beschikbare boringen in het gebied. De werkelijke laagopbouw kan
264 plaatselijk afwijken van de laagopbouw in REGIS II. Zeker rond de breuken zijn er afwijkingen
265 mogelijk.
- 266 • De verticale reistijd is onafhankelijk bepaald. Voor de bepaling van de verticale reistijden is
267 uitgegaan van stationaire verticale stroming met een vast vochtgehalte per laag in de
268 onverzadigde zone. De verticale reistijd blijkt het meest bepalend te zijn voor de totale reistijd.
- 269 • In tegenstelling tot de verticale reistijden konden de horizontale reistijden niet onafhankelijk
270 worden bepaald. Het bleek niet mogelijk om alleen op basis van de laagopbouw en
271 eigenschappen van de aquifer te komen tot een goede inschatting van de parameters die nodig
272 waren om de reistijdverdeling te benaderen.
- 273 • Door de beschikbaarheid van tritiumgehalten in de bronnen, kon met de verticale reistijd als
274 input, toch een inschatting gemaakt worden van de benodigde parameters voor de bepaling van
275 de horizontale reistijd.
- 276 • De gemeten tritiumgehalten konden goed benaderd worden.

277 Conclusies

- 278 • De berekende verticale reistijden zijn grofweg 2x groter dan de horizontale reistijden in de
279 deelgebieden.
- 280 • Ondanks de veel grotere lengte van deelgebied 1 zijn de berekende horizontale verblijftijden in
281 dit gebied kleiner dan in deelgebied 2 en 3. De berekende mediane reistijd, de tijd waarbinnen
282 50% van het geïnfiltreerde water aankomt in de bronnen, is 17 jaar voor deelgebied 1 en 21 jaar
283 voor deelgebied 2 en 3.

284 Verder onderzoek

- 285 • In dit project is een algemene methode ontwikkeld. Met deze methode kijken we naar de
286 resultaten van een klein stukje van Zuid Limburg. De intrekgebieden van de bronnen van het
287 Bunderbos en Elsloërbos. De verticale reistijden en de dikte van de verzadigde zone zijn
288 (gedeeltelijk) voor heel Zuid Limburg berekend en kunnen met weinig inspanning compleet
289 gemaakt worden.
- 290 • De methode kan gemakkelijk toegepast worden in andere gebieden in Zuid-Limburg of geschikt
291 gemaakt worden voor andere regio's met grote verblijftijden in de onverzadigde zone.
- 292 • De ontwikkelde methode heeft een schat aan makkelijk ontsluitbare ruimtelijke gegevens
293 opgeleverd, welke mogelijk interessant kunnen zijn voor vele toepassingen.

- 294
295
296
297
298
299
300
301
302
303
304
305
306
307
308
309
310
311
- De reistijden zijn heel bepalend voor de termijn waarop maatregelen van invloed zijn op de concentraties in de bronzones. Er kunnen deelgebieden bepaald worden waarin maatregelen (of andere veranderingen) sneller en minder snel effect hebben op de bronnen. Deze ruimtelijke informatie gecombineerd met ruimtelijke informatie over landgebruik, en de bijbehorende grondwateraanvulling (infiltratie) en uitspoelings-concentraties kan van pas komen bij strategische keuzes (bijv. het kiezen van gebieden waar maatregelen het meest effectief zijn).
 - In de methode is nu uitgegaan van gemiddelde grondwateraanvulling per deelgebied. Een verdere verfijning van het ruimtelijke beeld van de verblijftijden kan bereikt worden wanneer ruimtelijke verschillen in de grondwateraanvulling meegenomen worden.
 - De deelgebieden worden gescheiden door breuken waardoor een abrupt verschil in lithologische lagen en hun dikte optreedt. Dit kan gevolgen hebben voor de rekenresultaten. In dit onderzoek is niet gekeken naar de aard van deze gevolgen en het zou interessant zijn om dit wel te doen.
 - Het verdient aanbeveling om de ingeschatte aquiferdiktes, horizontale en verticale verblijftijden nogmaals goed onder de loep te nemen samen met de beschikbare gegevens. Dit kan nieuw inzicht geven op de grondwaterstroming en wat hiervoor van belang is. Mogelijk kan dit ook leiden tot een methode van onafhankelijke bepaling van de horizontale reistijd.

312 **Bijlage I – berekening verticale reistijd**

313

314 1. Voor elk van de 5 lagen worden twee aparte kaartlagen meegenomen. De eerste van de
 315 bovenkant van de laag $L_{X_{BOV}}$ ($m + NAP$) en de tweede van de onderkant van de laag $L_{X_{OND}}$
 316 ($m + NAP$).

317 2. Om de dikte van de onverzadigde zone van elke laag te bepalen wordt de volgende formule
 318 gehanteerd:

319

320
$$L_{ONV} = (L_{BOV} - FREAT) - (L_{OND} - FREAT)$$

321

322 waarbij geldt dat:

323 $(L_{BOV} - FREAT) = 0$ als $(L_{BOV} - FREAT) < 0$, en

324 $(L_{OND} - FREAT) = 0$ als $(L_{OND} - FREAT) < 0$

325 3. De verticale reistijd van elke laag kan nu bepaald worden met de formule:

326

327
$$T_L = (L_{ONV} * L_{VOCHT}) / AANV$$

328 4. De verticale reistijd van de hele onverzadigde zone kan dan worden bepaald door alle lagen te
 329 sommeren met formule:

330
$$T_{ONV} = \sum T_{L(N)}$$

331

332 In bovenstaande formules gelden de volgende afkortingen:

333 FREAT > hoogte freatisch vlak > hoogte bovenkant laag X (m t.o.v. NAP)

334 AANV > grondwateraanvulling (m/t)

335 L_{BOV} > hoogte bovenkant laag X (m t.o.v. NAP)

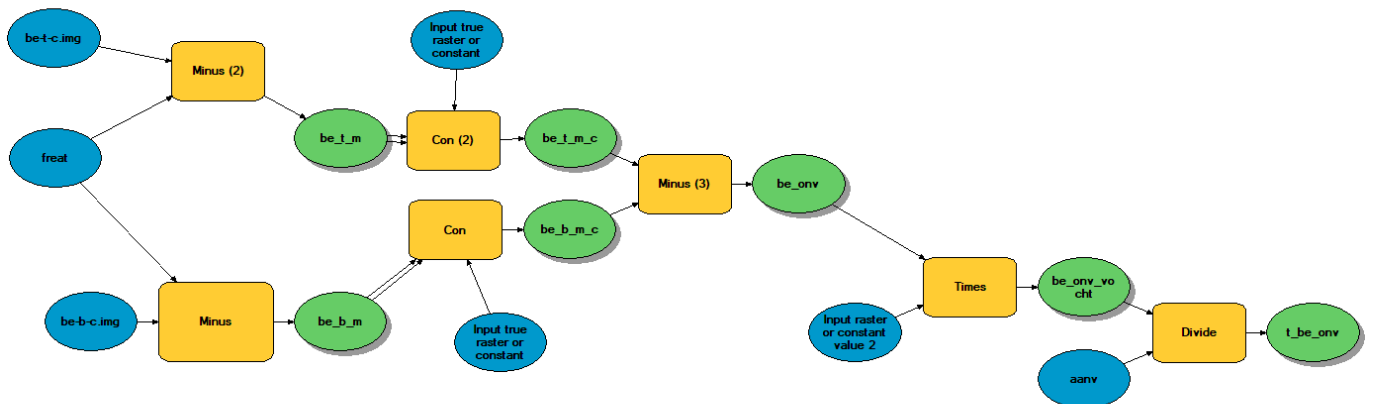
336 L_{OND} > hoogte onderkant laag X (m t.o.v. NAP)

337 L_{ONV} > dikte van onverzadigde laag X (m)

338 L_{VOCHT} > vochtgehalte van laag X (-)

339 T_L > reistijd door laag (t)

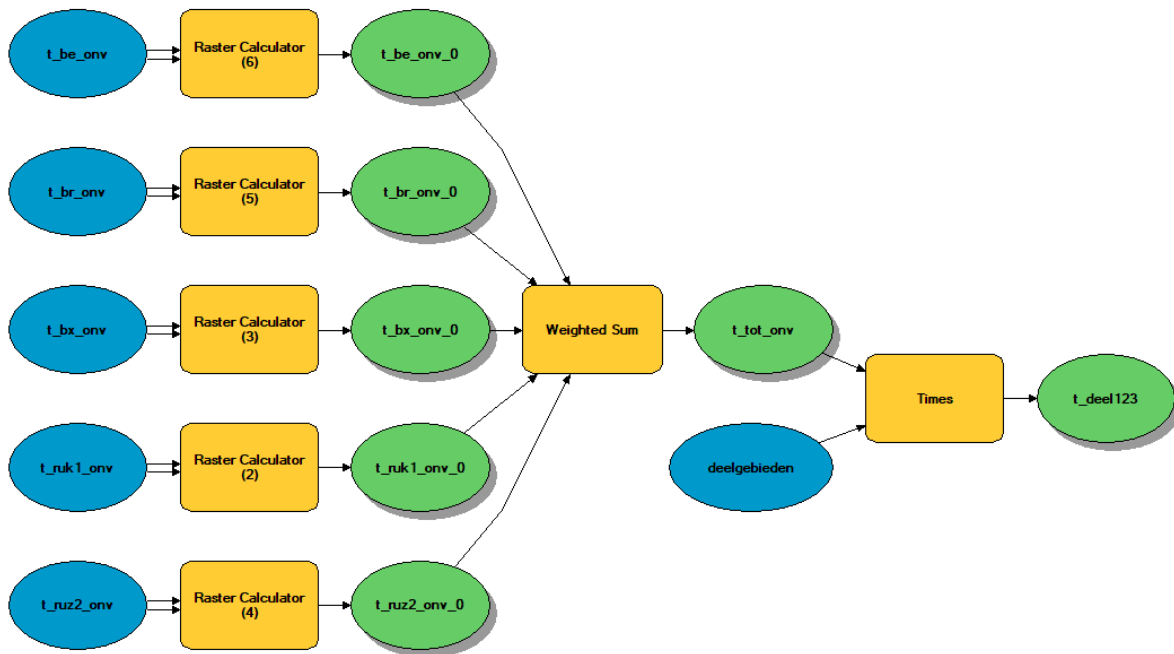
340 T_{ONV} > reistijd door onverzadigde zone (t)



341

342 *Figuur 12 Modeloverzicht van hoe reistijd van het onverzadigde deel van de formatie van Beegden wordt bepaald.*
 343 *Eerst worden de boven en onderkant van de laag toegevoegd. Dan wordt per cel het freatisch vlak eraf getrokken.*

344 Met een conditional statement wordt elke negatieve cel (lees verzadigde cel) gelijk gemaakt aan 0. Vervolgens
 345 wordt de onderkant afgetrokken van de bovenkant wat resulteert in de onverzadigde dikte van de laag. Deze
 346 wordt vermenigvuldigd met het vochtgehalte van de laag en uiteindelijk gedeeld door de aanvulling. Resultaat is de
 347 reistijd van het grondwater door de laag.



348
 349 *Figuur 13 Modeloverzicht van hoe de reistijd van het gehele onverzadigde zone wordt bepaald. Eerst worden de*
 350 *berekende reistijden per laag toegevoegd. De cellen met 'NoData' worden op 0 gezet. De lagen worden*
 351 *gesommeerd, waarbij elke laag een weegfactor van 1 krijgt. Tot slot worden allen de cellen binnen het*
 352 *studiegebied meegenomen.*

353 Bijlage II – berekening dikte verzadigde laag

354

355 1. Uit het DGM is de boven- en onderkant (m+NAP) van de drie bovenste lagen gebruikt.
356 Lithologisch waren de verschillen binnen de lagen niet groot genoeg om onderscheid te maken.

- 357 a. Fm. van Boxtel,
358 b. Fm. van Beegden,
359 c. Fm. Van Breda.

360

361 2. Uit REGIS II is de boven- en onderkant (m+NAP) meegenomen van alle 5 sub-lagen uit de Rupel
362 formatie. Dit omdat de Rupel lithologisch behoorlijk verschilt (zand / klei).

- 363 a. 2^{de} zandlaag van Rupel Fm.
364 b. 1^{ste} kleilaag van Rupel Fm.
365 c. 3^{de} zandlaag van Rupel Fm.
366 d. 2^{de} kleilaag van Rupel Fm.
367 e. 4^{de} zandlaag van Rupel Fm.

368

369 3. Voor elk van deze acht lagen worden twee aparte kaartlagen meegenomen. De eerste van de
370 bovenkant van de laag $L_{X_{BOV}}$ (m+ NAP) en de tweede van de onderkant van de laag $L_{X_{OND}}$
371 (m+NAP).

372

373 4. Om de verzadigde dikte van elke laag te bepalen kan in feite vrijwel dezelfde formule gebruikt
374 worden die eerder is opgesteld om de onverzadigde laagdikte te berekenen. Het verschil is dat
375 eerst gekeken werd naar de laagdikte boven het freatisch vlak (onverzadigd) en nu naar de
376 laagdikte onder het freatisch vlak (onverzadigd). In formulevorm:

377

$$378 L_{VER} = (L_{BOV} - FREAT) - (L_{OND} - FREAT)$$

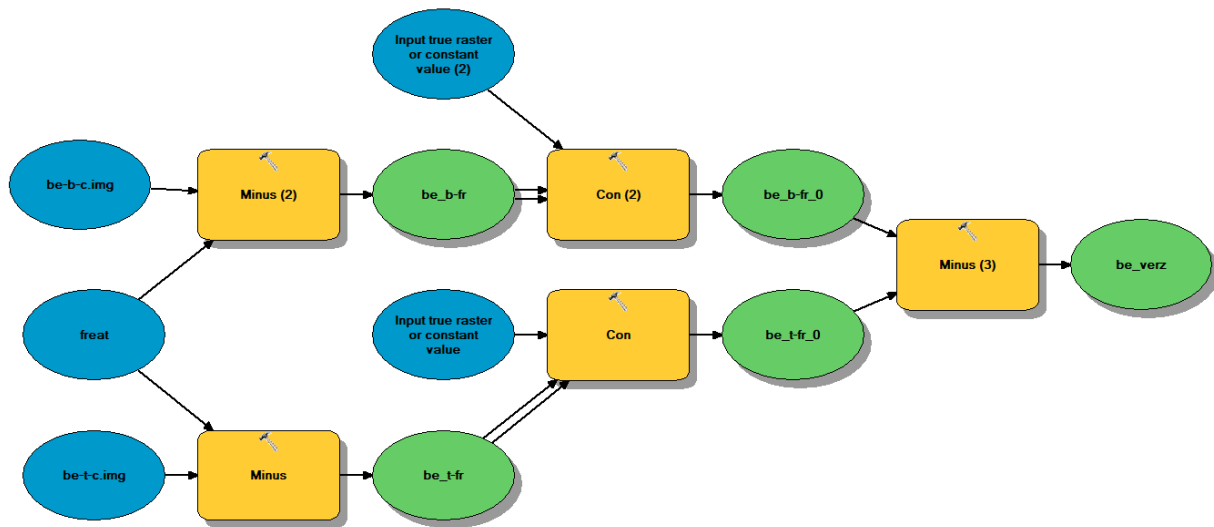
379

380 waarbij geldt dat:

$$381 (L_{BOV} - FREAT) = 0 \text{ als } (L_{BOV} - FREAT) > 0, \text{ en}$$

$$382 (L_{OND} - FREAT) = 0 \text{ als } (L_{OND} - FREAT) > 0$$

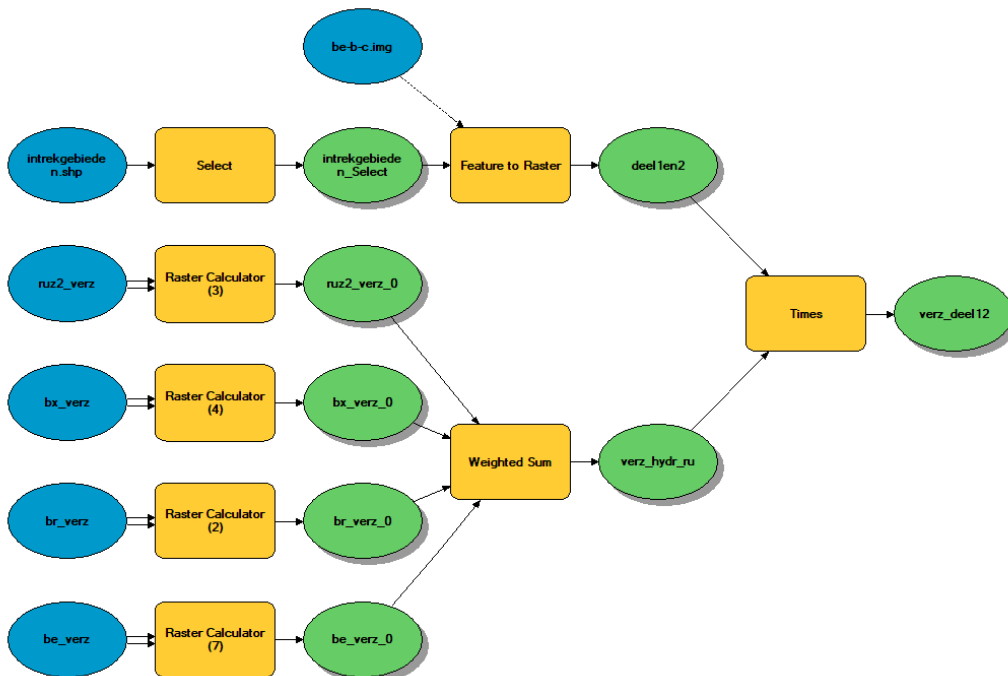
383
384



385

386 *Figuur 14 Modeloverzicht van hoe dikte van onverzadigde deel van de formatie van Beegden wordt bepaald. Eerst*
387 *worden de boven en onderkant van de laag toegevoegd. Dan wordt per cel het freatisch vlak eraf getrokken. Met*
388 *een conditional statement wordt elke positieve cel (lees onverzadigde cel) gelijk gemaakt aan 0. Vervolgens wordt*
389 *de onderkant afgetrokken van de bovenkant wat resulteert in de verzadigde dikte van de Beegden laag.*

390



391

392 *Figuur 15 Modeloverzicht van hoe de dikte van de verzadigde zone voor de deelgebieden 1 en 2 wordt bepaald.*
393 *Eerst worden de eerder berekende verzadigde laagdiktes toegevoegd. De cellen met 'NoData' worden op 0 gezet.*
394 *De lagen worden gesommeerd, waarbij elke laag een weegfactor van 1 krijgt. Tot slot worden allen de cellen*
395 *binnen het deelgebieden 1 en 2 meegenomen.*

396 5. De dikte van de verzadigde zone wordt nu simpelweg bepaald door het optellen van de
397 verzadigde diktes per laag. Wel moet er nog een correctie plaatsvinden omdat de deelgebieden
398 een andere hydrologische basis hebben. Voor deelgebied 1 en 2 is deze het eerste kleipakket
399 van de Rupel formatie voor deelgebied 3 is deze de formatie van Tongeren (Goudsberg klei). Dit
400 betekent dat voor deelgebied 1 en 2 vier lagen van belang zijn (nml. Boxtel, Beegden, Breda en
401 de bovenste zandlaag van Rupel). Voor deelgebied 3 zijn acht lagen van belang (nml. Boxtel,
402 Beegden, Breda en alle eerder vermelde Rupel sub-lagen).
403
404

CONCEPT