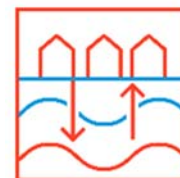


WINDOW *fase 1*



Koppeling model warmtenet met ondergrond

Prototype

door

Deltares

25 november 2020

Koppeling model warmtenet met ondergrond - prototype



Dit rapport is opgesteld door Deltares.
Auteurs: Johan Valstar, Anton Heinsbroek
Kwaliteitsborging: Ivo Pothof

25 november 2020

Dit project is mede gefinancierd door TKI-Energie en TKI-Watertechnologie uit de Toeslag voor TopConsortia voor Kennis en Innovatie (TKI's) van het ministerie van Economische Zaken en Klimaat.
WINDOW is een acroniem voor Warmtevoorziening In Nederland Duurzamer met Ondergrondse Warmteopslag. Doel van het WINDOW-programma is het wegnemen van technische, juridische en bedrijfseconomische belemmeringen en beter inzicht krijgen in de effecten voor het verantwoord toepassen van ondergrondse warmteopslag, zodat ondergrondse warmteopslag na 2025 als bewezen techniek kan worden toegepast en kan bijdragen aan kostenreductie van collectieve warmtesystemen op systeemniveau.

Projectnummer
11205001

Keywords
Ondergrondse warmteopslag, HTO

Jaar van publicatie
2020

Meer informatie
Johan Valstar
E Johan.Valstar@Deltares.nl

November 2020 ©

Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag worden vervoelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevens bestand, 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.

Inhoudsopgave

1	Inleiding	4
2	Functioneel ontwerp	5
2.1	Inleiding	5
2.2	Aanpassingen WANDA	6
2.3	Aanpassingen SEAWAT	11
3	Validatie berekeningsmethodiek ondergrond	12
3.1	Opzet axisymmetrisch model	12
3.2	Validatie axisymmetrisch model	13
4	Literatuur	16

1 Inleiding

Hoge Temperatuur opslag (HTO) kan een belangrijke schakel zijn in de optimale koppeling van warmtevraag enerzijds en duurzame warmte anderzijds. Door warmte van duurzame bronnen in de zomer op te slaan en deze in de winter weer te gebruiken, kunnen duurzame bronnen het hele jaar door zo optimaal mogelijk worden ingezet en kan in de winter (een deel van) de piekvraag worden ingevuld.

Om het gedrag van een warmtenet gekoppeld met een of meerdere HTO-bronnen te kunnen simuleren, bijvoorbeeld ten behoeve van ontwerp en optimalisatie, is het wenselijk om zowel het warmtenet als de HTO-bronnen in een gekoppeld model te kunnen doorrekenen. Voor het doorrekenen van zowel warmtenetten als thermisch transport in de ondergrond bestaat modelsoftware waar ruim ervaring mee is opgedaan, zoals bijvoorbeeld WANDA HEAT (voor warmtenetten) en SEAWAT (voor thermisch transport in de ondergrond) (Langevin et al., 2007). Een koppeling tussen deze modelsoftware ontbreekt tot op heden.

Een voordeel van een koppeling is dat de interactie tussen de pijp van de HTO-bron en de ondergrond op een fysiek juiste manier kan worden meegenomen. Het drukverloop in de pijp heeft immers invloed op de verticale verdeling van de debieten over het filtertraject. Ook wordt de teruglopende temperatuur van de HTO-bron direct doorgegeven aan het model voor het warmtenet. Deze interactie tussen HTO-filterbuis en het grondwater is essentieel voor het optimaliseren van het thermisch rendement van het HTO-systeem onder invloed van dichtheidsstroming in de ondergrond en ontwerpverbeteringen in de filterbuis om de flowverdeling langs het filter te beïnvloeden. Enkele mogelijke ontwerpverbeteringen van de filterbuis (MPPW, PDW) zijn in werkpakket C1 (Brontechniek) geïnventariseerd; zie hiervoor (Bloemendal et al., 2020).

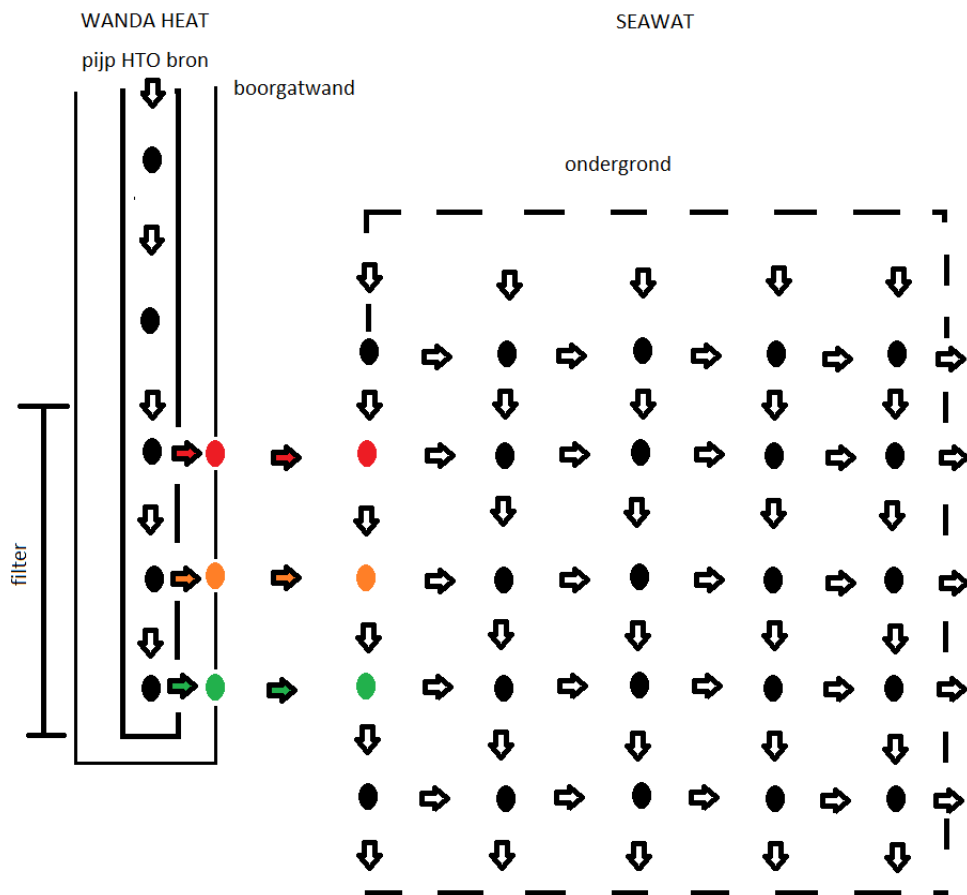
Modelberekeningen van thermisch transport in de ondergrond worden normaliter voor een 3-dimensionaal domein gedaan. De rekentijden voor zulke modellen zijn over het algemeen langer dan de rekentijden voor de 1-dimensionale modellen voor een warmtenet. Om grote rekentijden van het gekoppelde model te voorkomen is het wenselijk om de rekentijden van het ondergrondmodel te beperken. Dit kan door gebruik te maken van de axiale symmetrie van de stroming rondom een HTO-bron en door de ondergrond-software te integreren in de warmtenet-software.

Binnen het WINDOW project is een prototype van de koppeling tussen WANDA HEAT en SEAWAT ontwikkeld. Deze wordt in dit rapport beschreven. Tijdens het vervolg project Warming Up zal de koppeling verder worden geoptimaliseerd en toegepast bij het ontwerp van de HTO bronnen in combinatie met een warmtenet. Tevens zal de modelsoftware worden gedeeld met de projectpartners.

2 Functioneel ontwerp

2.1 Inleiding

Voor een goede koppeling tussen de modelcodes WANDA HEAT en SEAWAT is het noodzakelijk dat beide deelmodellen een identieke waarden voor een aantal grootheden hebben op de interface tussen de modeldomeinen. Dit interface is het filter van de HTO-bron. Voor elk modelknooppunt van dit filter geldt dat de waterdruk op de boorgatwand identiek moet zijn aan de waterdruk in het corresponderende modelknooppunt in de ondergrond, te weten het knooppunt op de boorgatwand op dezelfde diepte. Daarbij geldt ook dat het debiet dat bij het modelknooppunt de pijp van de HTO-bron uit- of instroomt gelijk is aan het debiet dat op het modelknooppunt de ondergrond in- of uitstroomt en ook de temperatuur van dit water dient voor beide modeldomeinen gelijk te zijn. De koppeling is visueel weergegeven in Figuur 2-1.



Figuur 2-1 Schematisatie koppeling tussen WANDA HEAT en SEAWAT; cirkels zijn de knooppunten waarop druk en temperatuur worden uitgerekend, met uitzondering van de boorgatwand in WANDA HEAT, waar alleen een druk wordt uitgerekend, pijlen zijn de debieten (water en energie) tussen 2 knooppunten. Voor de rode, oranje en groene knooppunten geldt dat de druk in beide modeldomeinen gelijk moet zijn. Bij de rode, oranje en groene pijp geldt dat het debiet en de temperatuur over de interface voor beide modeldomeinen gelijk moet zijn.

Als uitgangspunt van het gekoppelde model is de modelcode van WANDA HEAT genomen. Hieraan zijn extra routines toegevoegd die de uitwisseling met de ondergrond meenemen.

2.2 Aanpassingen WANDA

WANDA is een pipeline simulatieprogramma, waarmee instationaire stromingsverschijnselen in netwerken van pijpleidingen, pompen, kleppen en andere componenten kunnen worden berekend. WANDA kent verschillende domeinen. Naast het vloeistofdomein (WANDA LIQUID) bevat het programma onder andere ook het domein van het warmtetransport (WANDA HEAT). De LIQUID en HEAT componenten kunnen samen in 1 model bestaan. Voor het hier te bouwen model zal het HEAT domein gebruikt gaan worden.

De basis toestandsgrootheden waarmee gerekend wordt in het HEAT domein zijn:

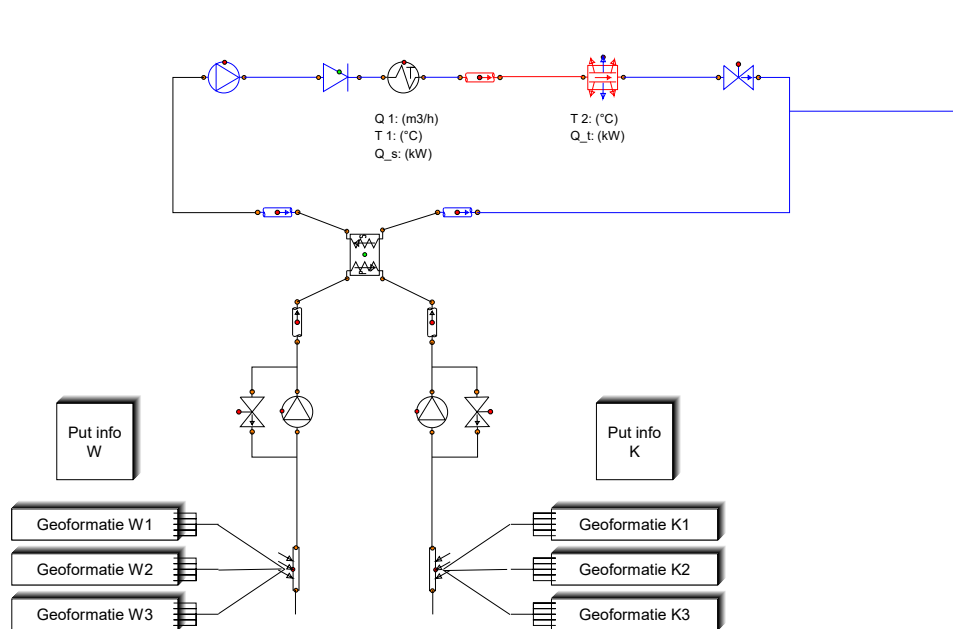
- Massaflux [kg/s]
- Druk [Pa]
- Energiedichtheid [J/kg]

In de User Interface worden de volgende grootheden gepresenteerd voor een WANDA Heat-leiding:

- Debiet [m³/s]
- Energieniveau (head) [m]
- Druk [Pa]
- Stroomsnelheid [m/s]
- Dichtheid [kg/m³]
- Temperatuur [C]
- Massaflux [kg/s]

Via de connectiepunten communiceren de componenten de basis toestandsgrootheden en de karakteristieke vergelijkingen (verbanden tussen de basisgrootheden en behoudswetten, van massa en energie).

In Figuur 2.2 is een typisch voorbeeld van een model in WANDA-HEAT weergegeven.



Figuur 2-2 Voorbeeld van een eenvoudig WANDA-HEAT model met principe van aansluiting van het grondlaagmodel op de filterpijp.

De volgende nieuwe WANDA Heat componenten worden ontwikkeld:

1. Geofilter. Dit is een pijpcomponent met radiale instroom vanuit Geoformation componenten, die met deze pijpcomponent zijn verbonden via het derde connectiepunt.
2. Geoformation. Dit is een component met eigenschappen van 1 geologisch homogene laag. Een HTO-bron zal meerdere Geoformation componenten bevatten: de geologische lagen die gekoppeld zijn aan een Geofilter, maar ook de onder- en bovenliggende en eventueel tussenliggende formaties. Voor de HTO-bron worden met deze Geoformaties automatisch een SEAWAT model opgezet dat gekoppeld is aan WANDA-HEAT. De grens tussen beide componenten ligt op de boorgatwand, zodat het SEAWAT model alleen grondlagen hoeft te simuleren.

Geofilter

De WANDA-HEAT filterpijp modelleert uitsluitend het filterdeel van een bron. Hydraulisch wordt deze poreuze pijp gemodelleerd als quasi-stationaire weerstand (evt. als starre kolom) in de lengterichting. In de radiale richting bevat de Geofilter-component de weerstand over de buiswand (tgv open fractie) en over de annulus met filtergrind. Thermisch gaan we uit van een perfecte isolatie. Het Geofilter wordt verdeeld in een aantal rekenelementen, te specificeren door de modelleur/gebruiker, waarvan de hoogteligging bekend is. Deze interne punten van de pijp worden op de juiste hoogtes aan de grondlagen van Geoformations rekenkundig aangesloten, zodat uitwisseling van druk, massastroom en temperatuur wordt bewerkstelligd.

De temperatuurafhankelijke eigenschappen zijn binnen WANDA-HEAT globaal bekend in het fluid properties window. De temperatuurtabel staat voor een deel weergegeven in Figuur 2-3. De beschikbare waarden voor de temperatuur lopen op tot 300 °C.

	Temperature (°C)	Density (kg/m³)	Kin. viscosity (m²/s)	Vapour pressure (bar.a)	Specific heat (J/kg.K)	Ther Cond. coef. (W/m.K)
1	0	999.80	1.7920e-6	0.0081100	4217.0	0.55200
2	1.0000	999.90	1.7310e-6	0.0065700	4213.0	0.55450
3	2.0000	999.90	1.6740e-6	0.0070500	4210.0	0.55700
4	3.0000	1000.0	1.6200e-6	0.0075700	4207.0	0.55950
5	4.0000	1000.0	1.5690e-6	0.0081300	4205.0	0.56200
6	5.0000	1000.0	1.5200e-6	0.0087200	4202.0	0.56450
7	6.0000	1000.0	1.4730e-6	0.0093500	4200.0	0.56700
8	7.0000	1000.0	1.4290e-6	0.010010	4198.0	0.56950
9	8.0000	999.90	1.3860e-6	0.010720	4196.0	0.57200
10	9.0000	999.90	1.3460e-6	0.011470	4194.0	0.57450
11	10.0000	999.80	1.3080e-6	0.012270	4192.0	0.57700
12	11.0000	999.70	1.2710e-6	0.013120	4191.0	0.57950
13	12.0000	999.60	1.2370e-6	0.014020	4189.0	0.58200
14	13.0000	999.50	1.2030e-6	0.014970	4188.0	0.58450
15	14.0000	999.30	1.1710e-6	0.015970	4187.0	0.58700
16	15.0000	999.20	1.1400e-6	0.017040	4186.0	0.58950
17	16.0000	999.00	1.1100e-6	0.018170	4185.0	0.59200
18	17.0000	998.90	1.0820e-6	0.019360	4184.0	0.59450
19	18.0000	998.70	1.0550e-6	0.020630	4183.0	0.59700
20	19.0000	998.50	1.0300e-6	0.021960	4182.0	0.59950
21	20.0000	998.30	1.0050e-6	0.023370	4182.0	0.60200
22	22.0000	997.90	9.5700e-7	0.026420	4181.0	0.60450
23	24.0000	997.40	9.1340e-7	0.029820	4180.0	0.60700
24	26.0000	996.90	8.7370e-7	0.033600	4179.0	0.61186
25	28.0000	996.30	8.3610e-7	0.037790	4179.0	0.61671
26	30.0000	995.70	8.0140e-7	0.042420	4178.0	0.62157
27	35.0000	994.10	7.2430e-7	0.056220	4178.0	0.62643
28	40.0000	992.30	6.5810e-7	0.073750	4179.0	0.63129
29	45.0000	990.20	6.0190e-7	0.095820	4180.0	0.63614
30	50.0000	988.00	5.5360e-7	0.12340	4181.0	0.64100
31	55.0000	985.70	5.1130e-7	0.15740	4183.0	0.64580

Figuur 2-3 Temperatuur tabel WANDA-HEAT. De temperatuurwaarden lopen door tot 300 °C. De waarden in deze tabel zijn gebaseerd op zoet water, voor simulaties met brak grondwater dienen deze nog aangepast te worden.

Voor het grondlagenmodel zijn met name de soortelijke warmte (Specific heat) en de thermische geleidbaarheid (Ther.Cond.coef.) van belang.

De Geofilter component krijgt de volgende invoervelden:

Grootheid		Eenheid (default)	Opmerkingen
Inner diameter / binnen diameter		m	
Friction model / wrijvingsmodel		{DW-k; DW-f}	
Wall roughness / wandruwheid (if DW-k)		mm	
Friction factor / wrijvingsfactor (if DW-f)		[-]	
Length / filterlengte		m	
Void fraction filter / open fractie filter		[-]	Deze parameter bepaalt de hydraulische weerstand over de buiswand
Well diameter / diameter put		m	Well diameter > Inner diameter; controle met error-melding.
Grain size filter / Korreldiameter		mm	Space = 0.5 * (well – inner); Grain size < Space. Controle met error-melding.
Filter porosity / porositeit filter		[-]	De filterporositeit en korreldiameter bepalen de hydraulische radiale weerstand tussen boorgatwand en buiswand
Maximum annual injection volume / Volume maximaal te injecteren per jaar		m ³	Deze parameter wordt gebruikt voor het definiëren van het modelgrid van SEAWAT.

Geoformation

De componenten Geoformation worden in WANDA-HEAT gebruikt voor de invoer van de benodigde parameters voor SEAWAT. Een Geoformation-component heeft 3 connectiepunten: 2 connectiepunten voor verbinding met boven- en onderliggende lagen, 1 connectiepunt voor de radiale verbinding met een Geofilter-component. Elk Geoformation beschrijft een constante set ondergrondparameters, alsmede het aantal rekenlagen waarin de Geoformation wordt gediscretiseerd bij het opzetten van het ondergrondmodel. Dit bepaalt dan de geometrische discretisatie waarmee de grondlagen en de filterpijp met elkaar “communiceren”. Voor elke Geoformation zullen via de WANDA-HEAT user interface de volgende invoerparameters worden gespecificeerd door de gebruiker:

Grootheid	Eenheid (SI)	Opmerking
Hoogte bovenkant geoformatie / Top formation layer	m	Meestal t.o.v. NAP; alleen bovenste Geoformatie
Number of layers / Aantal rekenlagen	-	
Layer thickness / Dikte per laag	m	Alle Geo-formation componenten, die radiaal verbonden zijn met een Geofilter moeten dezelfde dikte per laag hebben om de lagen op de juiste hoogte aan de Geofilter-component te koppelen. Controle met error-melding.
Background temperature / Achtergrond temperatuur	°C	
Initial state/ Initiële temperatuurverdeling		Ruimtelijke verdeling temperatuur in ondergrond moet nog uitgewerkt worden
Porositeit formation	-	
Horizontal conductivity / Horizontale doorlatendheid bij initiële temperatuur	m/dag	Dit is de doorlatendheid bij de achtergrondtemperatuur
Vertical conductivity / Verticale doorlatendheid bij initiële temperatuur	m/dag	Dit is verticale doorlatendheid bij de achtergrondtemperatuur
Bulk dichtheid afzettingsmateriaal	kg/m ³	
Soortelijke warmte afzettingsmateriaal	J/(kg°C)	
Thermische geleidbaarheid afzettingsmateriaal	W/(m°C)	
Longitudinale dispersiviteit	m	
Horizontale transversale dispersiviteit	m	
Verticale transversale dispersiviteit	m	

2.3 Aanpassingen SEAWAT

De modelcode SEAWAT, waarmee stroming van water en transport van warmte in de ondergrond wordt uitgerekend is aangepast, zodat de initialisatie en het doorrekenen van een enkele tijdstap in aparte subroutines zijn opgenomen. Hierdoor kan het op commando van WANDA direct 1 enkele tijdstap doorrekenen. Voor deze tijdstap geeft WANDA voor elke modellaag, het injectie/onttrekkingsdebiet van de HTO-bron door en bij injectie ook de temperatuur.

De gegevens die SEAWAT dan terug aan WANDA levert zijn de druk en in geval van onttrekking ook de temperatuur. Omdat WANDA gebruik maakt van een iteratieve numerieke solver roept WANDA SEAWAT meerdere keren tijdens een tijdstap aan. Alleen nadat er convergentie is bereikt, worden de toestandsvariabelen in de ondergrond (stijghoogte, als maat voor druk, en temperatuur) daadwerkelijk aangepast.

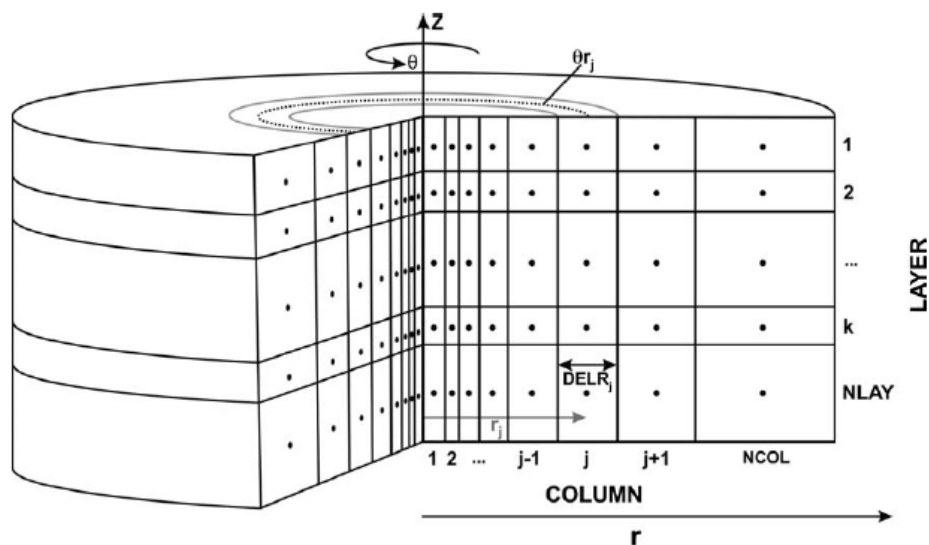
Bij de initialisatie is de invoer die SEAWAT normaal gebruikt zoveel mogelijk gehandhaafd. De invoerfiles worden nu wel vanuit een extra subroutine automatisch weggeschreven op basis van gegevens die in de Geoformations van WANDA zijn ingevoerd. De gegevens over de tijdsduur van de simulatie, tijdstapgrootte en de debieten van de HTO-bron worden nu overruled door de waarden die WANDA aanlevert.

3 Validatie berekeningsmethodiek ondergrond

Om het gekoppelde model van het warmtenet en de ondergrondse opslag snel te laten rekenen is het wenselijk om de berekening van het ondergrondse deel niet volledig 3-dimensionaal door te rekenen. Er is gekozen om gebruik te maken van een axisymmetrisch model. Hierin wordt aangenomen dat de warmte zich in radiale richting en verticale richting verspreid. Er is geen transport van warmte in de horizontale richting loodrecht op de radiale as omdat door symmetrie de gradiënt van zowel warmte als druk in die richting nul is. Deze methode is ook gebruikt bij de snelle berekeningen in de verkenningen van Werkpakket A.

3.1 Opzet axisymmetrisch model

In Figuur 3-1 is de opzet van het grid van een axisymmetrisch model weergegeven. De breedte van de modelcellen neemt lineair toe met de afstand tot de put. In de huidige modelcode SEAWAT, die de basis is voor de koppeling met het warmtenetmodel WANDA, is het helaas niet mogelijk om de breedte van de cellen zelf te variëren. Het is wel mogelijk om de toenemende breedte te verwerken in een aantal modelparameters, te weten de porositeit, de doorlatendheid, de bergingscoëfficiënt en de bulkdichtheid. Deze parameters worden vermenigvuldigd met 2π maal de radiale afstand. Hierdoor wordt exact dezelfde berekening opgezet als dat de breedte van de modelcel in radiale richting toeneemt. Voor meer details wordt verwezen naar Langevin (2008). In het gekoppelde model gebeurt de aanpassing van deze parameters automatisch, zodat de gebruiker die niet zelf hoeft in te voeren.



Figuur 3-1 Opzet axisymmetrisch model (uit Langevin, 2008)

3.2 Validatie axisymmetrisch model

Ter validatie is voor een axisymmetrisch model en een volledig 3-dimensionaal model dat hetzelfde systeem simuleert de doorbraak van de temperatuur in de hete put gesimuleerd.

3.2.1 Beschrijving generiek deel model

De opslag die gesimuleerd is, bevindt zich een watervoerende pakket dat wordt aan de onder- en bovenkant wordt afgeschermd door dikke kleilagen. Aan de onder- en bovenkant geldt een 'no flux' randvoorwaarde voor zowel water als temperatuur. Aan de zijkant worden randvoorwaarden met vaste stijghoogte en temperatuur opgelegd. In het midden van het modelgebied wordt in het gehele watervoerend pakket afwisselend water onttrokken en geïnjecteerd. De gebruikte modelparameters worden weergegeven in Tabel 3-1.

dikte zandlaag	60 m
dikte kleilagen onder en boven	254 m
dikte modellaag zand	2 m
dikte modellaag klei	2 m olopend tot 128 m
lengte modelcel horizontaal	5 m
horizontale doorlatendheid zand	10 m /dag
verticale doorlatendheid zand	5 m/dag
horizontale doorlatendheid klei	0.001 m/dag
verticale doorlatendheid klei	0.001 m/dag
debiet	afwisselend 1500 m ³ /dag injectie en onttrekking gedurende 182.5 dagen (?)
temperatuur injectie	90 °C
initiële temperatuur ondergrond	13 °C
longitudinale dispersie	0.5 m
transversale dispersie	0.05 m
porositeit zand	0.41
porositeit klei	0.6
dichtheid water (0 °C)	1000 kg/m ³
bulk dichtheid zand en klei	2640 kg/m ³
soortelijke warmte water	4183 J/kg °C
soortelijke warmte zand	710 J/kg °C
soortelijke warmte klei	1381 J/kg °C
thermische diffusie coëfficiënt zand	0.08 m ² /d
thermische diffusie coëfficiënt klei	0.05 m ² /d
gradiënt dichtheid water met temperatuur ¹	-0.5385 kg/(m ³ °C)

Tabel 3-1 Generieke modelparameters in het axisymmetrische model en het 3D model

3.2.2 Opzet axisymmetrisch model

Het axisymmetrisch model bestaat uit 50 modelcellen in radiale richting keer 44 cellen in verticale richting. De put bevindt zich in de eerste cel van de radiale as en in de laatste cel is de constante stijghoogte en temperatuur als randvoorwaarde opgelegd.

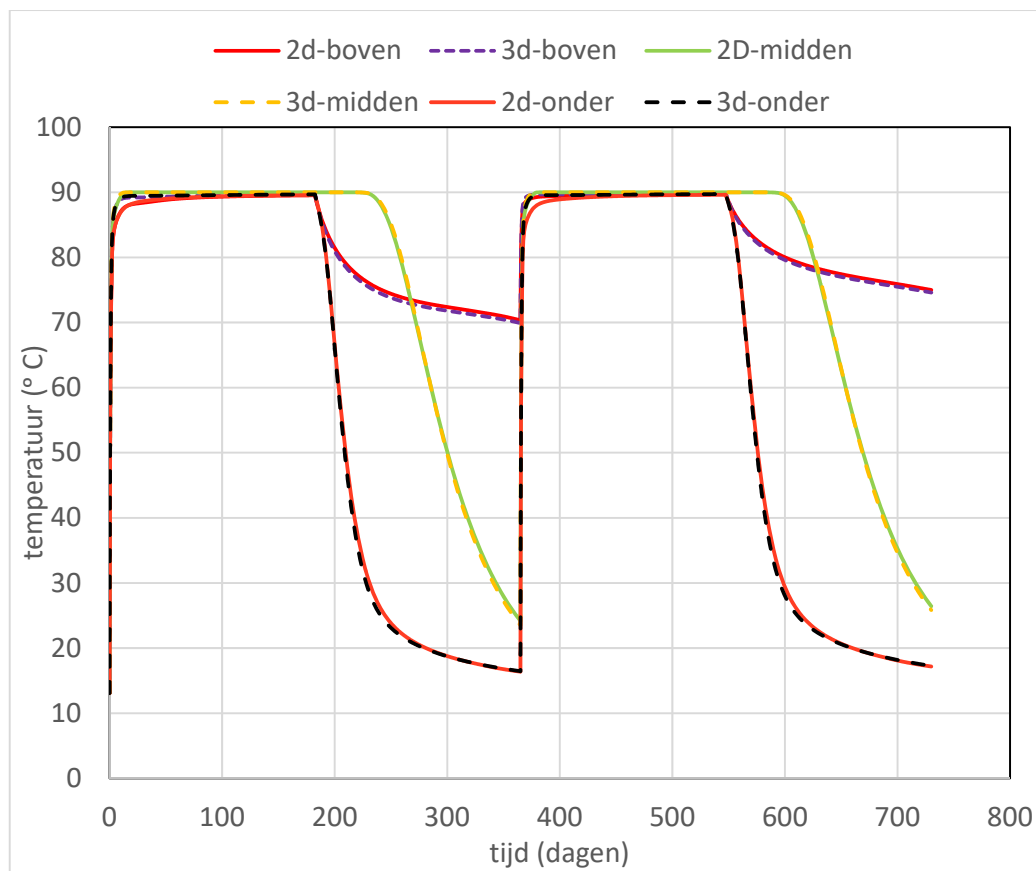
¹ De standaard versie van SEAWAT is gebaseerd op een lineaire relatie tussen dichtheid en concentratie/temperatuur. De code zal nog worden aangepast zodat de relaties volgens WANDA-HEAT zal worden toegepast. De waarde die hier is gebruikt is gebaseerd op de uiterste temperaturen van de simulatie: 13 en 90 °C.

3.2.3 Opzet volledig 3D model

Het 3 dimensionaal model bestaat uit 99 x 99 modelcellen in beide horizontale richting keer 44 modelcellen in de verticale richting. De put bevindt zich in de middelste cel; de vaste randvoorwaarden gelden voor alle cellen, waarvan het centrum zich op een afstand groter dan 250 m van de put bevindt. Daardoor is de afstand tot de randvoorwaarde in alle richting vrijwel gelijk aan het axisymmetrische model.

3.2.4 Resultaten

In Figuur 3-2 wordt de temperatuur in de modelcel met de HTO-bron voor de bovenste, onderste en middelste modelcel waarin de filters van de HTO bron zit weergegeven voor beide modellen.



Figuur 3-2 Temperatuur in modelcellen met HTO bron voor 2d axisymmetrisch model en 3D model

Hieruit blijkt dat de doorbraakcurves van het axisymmetrische model vrijwel gelijk zijn aan die van het 3-model.

De rekestijden waren 30 seconden voor het axisymmetrische model en 1 uur voor het 3D-model.

De conclusie van deze validatie is dat het axisymmetrische model geschikt is voor de koppeling met WANDA.

4 Literatuur

Bloemendal, M., van Lopik, J., Jansen, F., Drijver, B., van Bergen, F., Koenen, M., Corina, A.N., Pothof, I., van der Most, L. & Khoshnevis, N., (2020). WINDOW werkpakket C1 Literatuurstudie Brontechniek

Langevin, C.D., Thorne, D.T., Jr., Dausman, A.M., Sukop, M.C., & Guo, Weixing, (2007). SEAWAT Version 4: A Computer Program for Simulation of Multi-Species Solute and Heat Transport: U.S. Geological Survey; Techniques and Methods Book 6, Chapter A22, 39 p.

Langevin, Christian D.; (2008). Modeling Axisymmetric Flow and Transport; Groundwater Vol. 46, No. 4; July–August 2008; p. 579–590