

Duurzame warmte gaat ondergronds

Warmteopslag heeft meerwaarde voor warmtenetten: Welke kansen biedt de ondergrond?

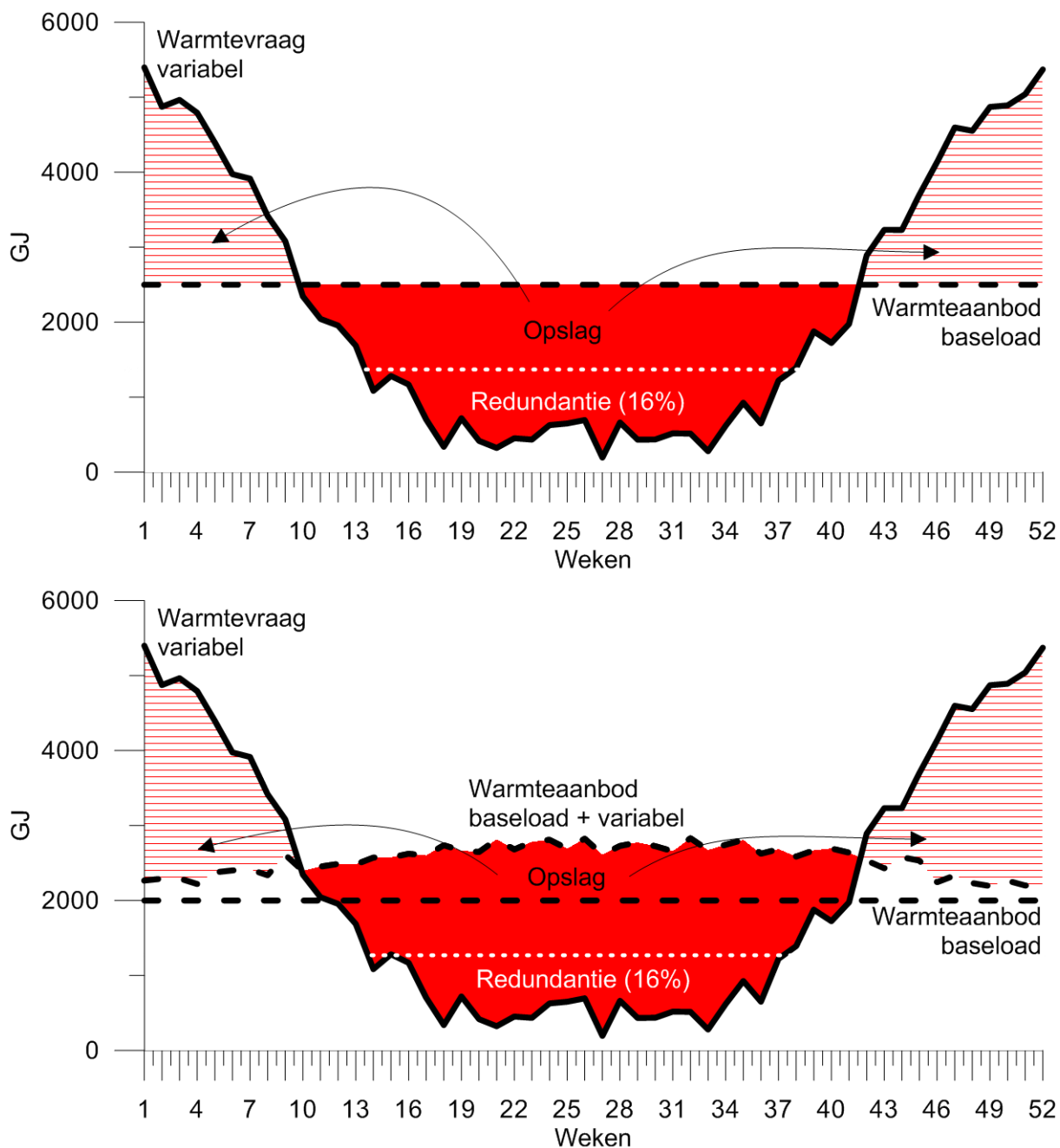
Dr. Niels Hartog – KWR/UU, Ir. Martin Bloemendal – KWR/TU Delft, Ir. Ewald Slingerland – Greenvis, Prof. Dr. Ad van Wijk – KWR/TU Delft

Samenvatting

Warmtenetten maken de distributie van industriële rest- of duurzame warmte mogelijk. Warmtevraag en –aanbod sluiten in de tijd echter niet goed aan. Zo is de vraag naar warmte het grootst in de winter, terwijl productie van industriële restwarmte constant is en die van duurzame zonnewarmte variabel en vooral in de zomer plaatsvindt. Warmteopslag kan de verbindende factor vormen tussen aanbod en vraag. Op de schaal van warmtenetten zijn hiervoor grote opslagvolumes nodig om afstemming tussen vraag en aanbod over seizoenen heen te kunnen realiseren. Ondergrondse zandlagen bieden meer dan voldoende ruimte voor de realisatie van deze benodigde grootschalige warmteopslag. Deze ondergrondse warmteopslag kan de piekvraag naar warmte duurzaam invullen en als back-up voorziening worden ingezet. Hiermee draagt ondergrondse warmteopslag bij om warmtenetten duurzamer, robuuster en toekomstbestendiger te maken.

Warmtebuffering maakt warmtevoorziening flexibel.

Warmtenetten verzorgen de koppeling tussen warmteaangebod en –vraag. Bij veel warmtenetten is de leveringszijde relatief constant, bijvoorbeeld bij warmtekrachtcentrales, het gebruik van industriële restwarmte of geothermie. Dit terwijl de vraag op dag- tot seizoen basis varieert. Het overbruggen van deze temporele mismatch is een belangrijke meerwaarde van warmteopslag (Willemsen, 2016). Zonder warmteopslag verzorgt het continue aanbod (baseload) de basis van de warmtevraag en wordt de variabele vraag opgevangen door conventionele (vaak fossiele) warmtevoorziening, waardoor een groot deel van de continue warmteproductie niet benut wordt. Hoe deze balans voor een warmtenet uitvalt hangt af van hoe de totale warmtevraag zich verhoudt ten opzichte van de warmte die geleverd kan worden. Een complicerende factor is de onzekerheid over de toekomst, zowel aan de warmtevraagzijde (bijv. verbeterde woningisolatie of uitbreiding warmtenet) als aan de aanbodzijde (bijv. verdwijnen industrie of energiecentrale). Vanwege deze onzekerheden én de sterke afhankelijkheid van de warmtevragers op het beschikbaar zijn van voldoende warmte, maakt dat grootschalige warmteopslag ook meerwaarde heeft als buffer voor wanneer er veranderingen optreden in het aanbod of de vraag naar warmte. Denk hierbij ook aan het inzetten van de opslag als back-up voorziening voor wanneer een warmtebron tijdelijk wegvalt of het kunnen verkleinen van de benodigde baseload. Het dan kunnen leveren van redundante warmte (Figuur 1) uit opslag voorkomt dat de back-up gegenereerd moet worden uit conventionele, niet duurzame, warmtebronnen. Redundante warmte is hier warmte beschikbaar in de opslag die normaal gesproken in een jaar niet wordt ingezet. In de toekomst zullen de voor warmtenetten benutbare warmtebronnen duurzamer van aard worden. Waar met geothermiebronnen een redelijk constant warmteaangebod gehandhaafd kan worden, zullen andere duurzame warmtebronnen zoals uit zonnewarmtecollectoren, overschotten uit de glastuinbouw en eventueel power-2-heat (P2H) zorgen voor een variabelere warmteaangebod. Tevens zal hierdoor het niet gelijktijdig optreden van warmteaangebod en –vraag verder vergroot worden doordat een groter deel van de beschikbare warmte juist geproduceerd zal worden in de maanden wanneer de vraag laag is. Voor robuuste warmtelevering en -afname dragen deze ontwikkelingen verder bij aan de noodzaak van grootschalige warmteopslag.



Figuur 1. De badkuip: voorbeeld van seizoen variatie van de warmtevraag gedurende een jaar, de temporele mis match tussen aanbod van en vraag naar warmte. Bovenste figuur: aanbod als constante baseload (bv. restwarmte of geothermie), onderste figuur: baseload + duurzame variabele warmtebronnen. Met warmteopslag kan beschikbare warmte optimaal benut worden door ook in de piekvraag te voorzien. Warmteoverschotten kunnen als redundante warmte opgeslagen worden als back-up voorziening. Met gelijke redundantie (16%) leidt de benutting van variabele duurzame warmtebronnen in dit voorbeeld tot een reductie van de benodigde baseload met 20% (2500GJ naar 2000GJ).

Hogere temperatuur opslag voor een echt duurzame warmtevoorziening.

De warmteopslag die al wordt toegepast in Nederland vindt met name plaats in warmte-koude opslag (WKO) systemen, bij relatief lage temperaturen (<25 °C). Als we kijken naar de bronnen voor huidige duurzame warmteproductie uit bijvoorbeeld industriële restwarmte, dan leveren deze bronnen echter voornamelijk warmte op een temperatuurniveau van 50 tot 80 °C. Ook toekomstige alternatieve en duurzame warmtebronnen voor grootschalige warmtenetten zoals zonnewarmte komen op een vergelijkbaar temperatuurniveau beschikbaar. Een warmtenet met een buffer die dergelijke temperaturen kan opslaan, kan

zonder een warmtepomp de gebouwen van nuttige warmte voorzien. Daardoor wordt de warmtevoorziening duurzamer, omdat er dan geen extra elektriciteit voor de warmtepomp nodig is (in conventionele bodemenergiesystemen kan dit oplopen tot 60% van het energieverbruik (Dekker, 2016). Warmtenetten die niet alleen goed geïsoleerde gebouwen (nieuwbouw, met systemen op lagere afgiftetemperatuur zoals vloerverwarming), maar ook bestaande gebouwen van warmte kunnen voorzien kunnen een grote bijdrage leveren aan de verduurzaming van de gebouwde omgeving, aangezien 80% van de woningen in 2050 er nu al staan. Met een relatief beperkte maatregel zoals het vervangen van bestaande radiatoren door lage temperatuur-radiatoren kan de aanvoertemperatuur van zo'n warmtenet naar 60 °C of lager, zonder dat er verregaande isolatie en vloerverwarming in bestaande woningen toegepast hoeft te worden. Dit kan voor een deel van de woningen in Nederland een goede manier zijn om te kunnen verduurzamen.

Ondergrondse warmteopslag levert grote en goedkope buffercapaciteit voor warmte en koude.

Er zijn veel verschillende manieren om warmte tijdelijk op te slaan. In Tabel 1 zijn de meest bekende vormen van thermische energieopslag opgenomen met hun belangrijkste kenmerken. Hieruit blijkt dat opslag in de bodem een relatief goedkope optie is voor het opslaan van grote hoeveelheden warmte. Bovendien bespaart ondergrondse opslag ruimte bovengronds. Dit terwijl er in Nederland meer dan voldoende geschikte bodemlagen zijn waarin de warmte kan worden opgeslagen.

Bij het gebruik van de ondergrond voor de opslag van warmte wordt water met een hogere temperatuur dan het omringende grondwater via putten geïnjecteerd in ondergrondse zandlagen (aquifers) en weer onttrokken op het moment dat er een verwarmingsbehoefte is. Deze toepassing van de ondergrond is niet nieuw, in Nederland is er al meer dan 25 jaar praktijkervaring met ondergrondse warmte-koude opslag (WKO) systemen, waarvan er inmiddels zo'n 2000 in ons land operationeel zijn (Willemsen, 2016). Het grootste deel van die WKO systemen heeft een opslagvolume tot 500,000 m³, en enkele honderden systemen hebben een opslag van meerdere miljoenen kubieke meters (Bloemendal and Hartog, 2016). Ter vergelijking, dit zijn opslagvolumes die tot 1000 keer groter zijn dan de grootste bovengrondse warmteopslagsystemen, zoals de warmtebuffer (22,000 m³) bij het stadsverwarmingsnet dat door de NUON warmtekrachtcentrale in Diemen gebruikt wordt om te anticiperen op variabele elektriciteitsprijzen. Afhankelijk van de warmtevraag kan er vanuit deze buffer tot een weekend lang geleverd worden (Stam, 2016).

Tabel 1. Eigenschappen verschillende opslag media voor warmte (Ecovat et al., 2016; IEA et al., 2013)

	Capaciteit	Vermogen	Aanleg kosten	Efficiëntie
	[MWh]	[MW]	[€/kWh]	[%]
Phase change materials (PCM)	0,050-0,15	0,001-1	10-50	75-90
Thermo Chemical materials (TCM)	0,012-0,25	0,01-1	8-100	75-100
warm water opties				
Bovengrondse buffertank	500-5.000	0,1-5	0,5-3	75-90
Ondergrondse buffertank	500-5.000	0,1-20	0,1-10	75-90
Open bodemenergie HTO	1.000-500.000	0,5-200	0,05 - 0,1	50-90

Toelichting bij tabel 1.

De PCM's en TCM's kunnen op een vrachtwagen worden getransporteerd en zijn mede door de relatief korte opslag cycli (uren/dagen) flexibel inzetbaar. Door de hoge energiedichtheid zijn deze direct toepasbaar in vloeren, muren en/of plafonds. De warm water opties zijn minder makkelijk te verplaatsen en zijn geschikter voor langere opslag cycli (weken/maanden). Voor de ondergrondse en bovengrondse buffer tanks is naast het IEA rapport ook uit gegaan van gegevens van de buffer van NUON in Diemen en gegevens van Ecovat en Greenvis. De capaciteit en kosten van HTO zijn afgeleid

aan de hand van de spreiding in omvang van de WKO systemen in Nederland. Hierbij is rekening gehouden met het feit dat HTO systemen meer kosten en op een ander temperatuurniveau werken (temperatuurverschil 20 tot 50°C).

Hoewel de opslagvolumes bij WKO-systemen dus veel groter zijn, zijn de temperaturen waarbij de warmte opgeslagen wordt (gewoonlijk <math><16^\circ</math>), vele malen lager dan bij de distributie (en opslag) in een warmtenet. Wettelijk gezien mag er in WKO-systemen zelfs geen water met een temperatuur hoger dan 25°C opgeslagen worden. Hierdoor is bij WKO-systemen de additionele en significante inzet van een warmtepomp nodig om aan de warmtevraag te kunnen voldoen. Bij de toepassing van ondergrondse warmteopslag gekoppeld aan warmtenetten vindt opslag plaats bij hogere temperaturen (>30–100°C) en wordt daarom hoge temperatuur opslag (HTO) genoemd. Met de koppeling van warmtenetten aan HTO-systemen is in het buitenland al beperkte praktijkervaring (bv. de Rijksdag in Berlijn). Ook in Nederland zijn er, ondanks de wettelijke beperking op maximale injectietemperatuur voor WKO-systemen, sinds de jaren 80 al meerdere HTO-pilots gerealiseerd en zijn er ook tegenwoordig meerdere HTO systemen operationeel. De realisatie van nieuwe HTO-systemen in Nederland vindt voornamelijk plaats bij locaties met een duidelijke netto warmtevraag. Ter beperking van risico's voor grondwaterkwaliteit en mogelijke drinkwaterproductie, is de realisatie van recente HTO systemen alleen toegestaan in brakke of zoute aquifers. Dit type aquifers zijn in het grootste deel van de Nederlandse ondergrond aanwezig op tien- of honderdtallen meters diepte, met name in het westelijk deel. Recente realisaties van HTO systemen in het Westland, Wageningen en Haarlem aan dat er een groeiende ruimte is voor HTO met het oog op verdere verduurzaming van Nederland. Het is voor de ontwikkeling van warmtenetten daarom van belang om de meerwaarden van de toepassing van ondergrondse warmteopslag scherp te krijgen als ook de benodigde randvoorwaarden waaronder deze optimaal kan bijdragen aan het functioneren van een warmtenet.

Grote ondergrondse warmtebuffers met hogere temperaturen zijn efficiënter

Voor een goede inpassing van ondergrondse warmteopslagsysteem met een bestaand of te ontwikkelen warmtenet, zijn twee aspecten van belang om de genoemde meerwaarden (overbruggen temporele mis match en warmtebuffercapaciteit) ten volle te benutten. Ten eerste is dat de capaciteit van de warmteopslag (MJ) en ten tweede het vermogen (MW) waarmee warmte uit de ondergrondse opslag geleverd moet kunnen worden. Beiden hangen af van de grootte en aard van de te voorziene warmtevraag. De capaciteit voor warmtelevering uit een ondergrondse warmteopslag wordt bepaald door het volume en het temperatuurverschil van het onttrokken en weer in de bodem geïnfiltreerde water. De opslagtemperatuur moet dus zo hoog mogelijk zijn, en de retourbron zo laag mogelijk, zodat zoveel mogelijk energie kan worden uitgenut. Deze optimalisatie is vooral afhankelijk van de bron van warmte en de temperatuur trajecten in de installaties van de afnemers. In de praktijk is op kleinere schaal de grootste ervaring opgedaan met de ondergrondse opslag bij temperaturen tot 100°C, enkele zelfs daarboven (waarbij de opslag onder druk staat)..

Vanzelfsprekend moeten de verliezen die bij warmte opslag in de bodem optreden zo klein mogelijk zijn. Deze verliezen treden op langs de randen van de opslag in de bodem. Bij grootschalige opslag zullen deze warmteverliezen relatief beperkt zijn omdat met toenemende grootte van de warmteopslag het oppervlak van die randen in verhouding kleiner wordt. Op basis van inzichten uit de Nederlandse WKO praktijk en de relatief kleine HTO pilots zijn voor grootschalige warmteopslag rendementen van rond de 90% te verwachten.

Ter illustratie; bij een opslag temperatuur tot 100°C dan kan met een opslagvolume van meer dan 1 miljoen m³ grondwater enkele maanden worden overbrugd worden op basis van de eerder genoemde kentallen voor de warmtebuffer in Diemen. WKO systemen van deze omvang komen veelvuldig voor in Nederland.

Ondergrondse warmteopslag in de praktijk

Voor een optimale koppeling van een ondergronds warmteopslagsysteem aan een warmtenet zijn er flink wat afwegingen te maken. Hoe deze eruit zien is grotendeels afhankelijk van warmtenet-specifieke condities. Zoals blijkt uit het verkennen van de investeringsafwegingen voor de beoogde verduurzaming van het Amernet (kader Case studie 1) kan het opnemen van ondergrondse warmteopslag bij de ontwikkeling van een warmtenet tot significante reductie van de benodigde leidingdiameters en vergroting van de

investeringsruimte leiden. Ook de optimale technische eigenschappen als temperatuurniveau, capaciteit en benodigd vermogen zijn locatie-afhankelijk. Deze volgen uit de eigenschappen van aanbieders en afnemers van de warmte. Aandacht is nodig voor het bepalen van de locatie van de koppeling van het opslagsysteem met het warmtenet en de vraag of meerdere kleinere opslagsystemen slimmer zijn dan 1 grote.. De geschiktheid van de ondergrond varieert op lokale (gemeente) schaal in de regel weinig, maar kan voor grotere regionale warmtenetten van invloed zijn op de locatiekeuze voor een ondergrondse warmteopslag. Uit een verkenning op basis van kentallen van de woonwijk Leidsche Rijn (kader Case studie 2)blijkt dat verschillen in lokale eigenschappen van de ondergrond in de praktijk tot significante verschillen kunnen leiden voor onder meer het aantal benodigde doublets en de investeringskosten. Uit de twee in de case studie beschouwde scenario's blijkt ook dat ondergrondse opslag slechts een zeer klein deel van de oppervlakte van het voorzieningsgebied nodig heeft.

Ondergrondse warmteopslag op hogere temperatuur; de voordelen

Ondergrondse warmteopslag, bij temperaturen die aansluiten bij die van warmtenetten, lijkt een belangrijke bijdrage te kunnen leveren om warmtenetten duurzamer, robuuster en toekomstbestendiger te maken, want ondergrondse warmteopslag:

- Maakt warmtevoorziening flexibel; vraag en aanbod kunnen eenvoudig met elkaar in evenwicht worden gebracht.
- Kan grote hoeveelheden warmte opslaan, waardoor perioden zonder of weinig warmteproductie dan wel tijdelijk wegvallen van warmtebronnen gemakkelijk kan worden opgevangen.
- Maakt hogere temperatuur warmte opslag (rond 50 °C) mogelijk en daarmee zeer efficiënte warmte opslagsystemen.
- kan eenvoudig en efficiënt duurzame warmtebronnen opslaan, zoals warmte van zonnecollectoren, geothermische bronnen en Power to Heat.
- kan warmtepompen in gebouwen overbodig maken, waardoor geen elektriciteit voor warmtepompen in gebouwen nodig is en daardoor het elektriciteitsnet niet hoeft te worden verzwaaard.

Referenties

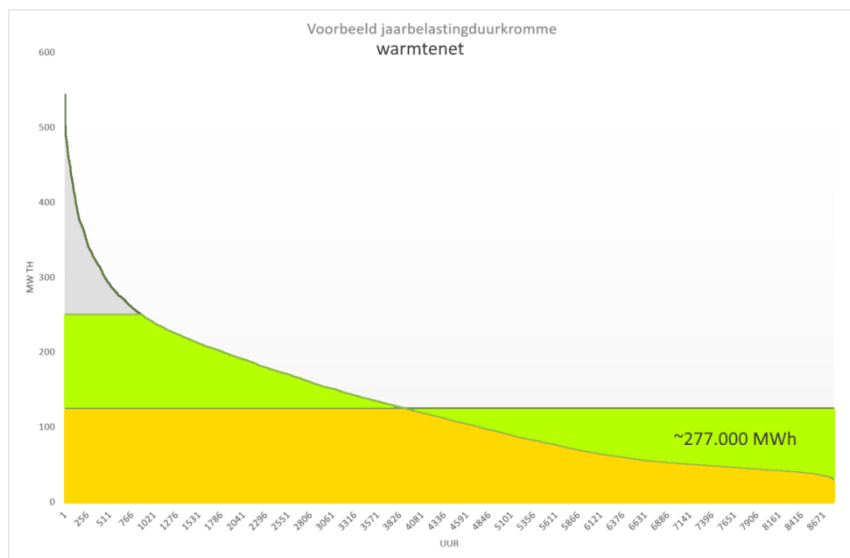
- Bloemendal, M., Hartog, N., 2016. After the boom: Evaluation of dutch ates-systems for energy efficiency, European Geothermal Conference 2016. EGEC, Strassbourg.
- Dekker, L.d., 2016. Bepalende factoren voor goed functionerende WKO, kennisplatform bodemenergie.
- Ecovat, Greenvis, KWR, 2016. gegevens ecovat/HTO.
- ENNatuurlijk, 2016. Verslag bestuurlijke bijeenkomst 30 juni, in: ENNatuurlijk (Ed.).
- IEA, ETSAP, IRINA, 2013. Thermal Energy Storage, Technology Brief. IEA, ETSAP, IRINA.
- Leguijt, C., Schepers, B., 2011. Functioneel ontwerp Vesta CE-Delft, Delft.
- Stam, S., 2016. Enorme opslagtank geeft speelruimte in levering warmte, Energiegids.nl.
- Willemsen, N., 2016. Rapportage bodemenergiesystemen in Nederland. RVO / IF technology, Arnhem.

Case studie 1: Centrale verduurzaming van het Amernet¹

Het huidige Amernet wordt voor 95% voorzien van warmtelevering vanuit centrale opwek. De verwachting is dat na 2024 deze centrale warmtelevering 100% uit duurzaam kan worden opgewekt. Er worden hierin drie mogelijkheden onderscheiden (biomassa in aparte centrale, biomassa in Amercentrale, afvalwarmte Attero en restwarmte industrie (ENNatuurlijk, 2016)). De biomassa varianten zijn in Geertruidenberg voorzien, terwijl de afval- en restwarmte uit Moerdijk dient te komen. In dat laatste geval komt er een transportleiding van Moerdijk naar de huidige plek waar de leidingen naar Breda en Tilburg worden gesplitst ('Hoofd WOS Amernet'), zie ter indicatie onderstaande figuur:



Dit gaat om ruim 500 MW-piekvermogen aan warmte. Wanneer één of enkele grootschalige opslagsystemen gerealiseerd kunnen worden op strategisch goede plekken in of rond Breda en Tilburg, is het mogelijk het transportvermogen van de leiding vanuit Moerdijk te verlagen. Ter illustratie zie onderstaande figuur; bij een verlaging van 250 MW naar 125 MW geldt een verlaging in investeringskosten van ong. 80 miljoen euro (Leguijt and Schepers, 2011). Dit geldt dus als investeringspotentieel voor de grootschalige opslag van ruim 275.000 MWh (≈ 1 PJ). Op basis van een temperatuurverschil in opslag van 40 °C betekent dit een nuttige inhoud van ong. 6 miljoen m³. De investeringsruimte voor een grootschalig ondergronds warmteopslagsysteem bedraagt in dit geval dus 10 tot 15 EUR/m³, dat overeenkomt met 0,25 tot 0,35 EUR/kWh. Op basis van tabel 1 lijkt hier een dergelijk systeem dus rendabel te exploiteren.



¹ Bij inzet van decentrale duurzame warmtebronnen in de omgeving van Breda en/of Tilburg kan ondergrondse warmteopslag eveneens waardevol zijn. Dit is een andere casus met andere uitgangspunten.

Case studie 2: 30.000 woningen met hogere temperatuur ondergrondse warmteopslag

Om een woonwijk van de grootte van Leidsche Rijn (30.000 woningen) volledig vanuit een HTO van warmte te kunnen voorzien hebben we op een rijtje gezet hoe zo'n systeem er ongeveer uitziet en wat de kosten daarvoor zouden zijn. We gaan daarbij uit van 2 verschillende gebieden in Nederland; een aquifer met beperkte dikte (30 m) zoals op de locatie van Leidsche Rijn (Utrecht) en een dikke aquifer (100 m) zoals in Amsterdam.

Voor de energie vraag is uitgegaan van 20GJ per woning per jaar en een conservatief temperatuur verschil tussen opslag en retour bron van 20°C, wat resulteert in een opslag volume van ruim 7 miljoen m³ per jaar. Het aantal bronnen dat nodig is wordt bepaald door maximale piek vermogen dat nodig is om te kunnen leveren, hiervoor is uitgegaan van 2000 vollast uur warmte levering.

	Utrecht	Amsterdam	
Dikte Aquifer	25	100	[m]
Aantal doublets	65	13	[-]
Aanlegkosten	5	4	[M€]
Bovengronds ruimte beslag "footprint"	0,4%	0,1%	[-]

