

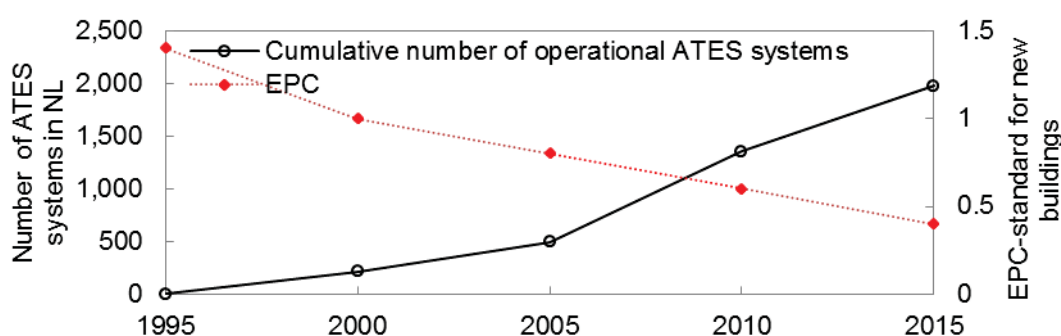
Verwarming en koeling zonder warmtepomp met WKO-triplet

Martin Bloemendal, Ad van Wijk (KWR Watercycle Research Institute, TU Delft), Niels Hartog, Jan Jaap Pape (KWR Watercycle Research Institute, Universiteit Utrecht)

Bodemenergiesystemen worden veelvuldig toegepast om energie te besparen. De warmtepomp van zulke systemen gebruikt echter nog altijd veel elektriciteit, waardoor voor grootschalige toepassing ook grootschalige netverzwaring nodig is. Daarom is het voor de verduurzaming van de gebouwde omgeving belangrijk om alternatieve duurzame technieken voor verwarming en koeling van gebouwen te vinden. Het WKO-‘triplet’-systeem vermijdt elektriciteitsverbruik door de warmtepomp door warmte en koude op het gewenste temperatuurniveau in te vangen en in de bodem op te slaan met (bijvoorbeeld) zonnecollectoren en droge koelers. Het primair energieverbruik van een tripletsysteem is ongeveer 5% van een conventioneel systeem.

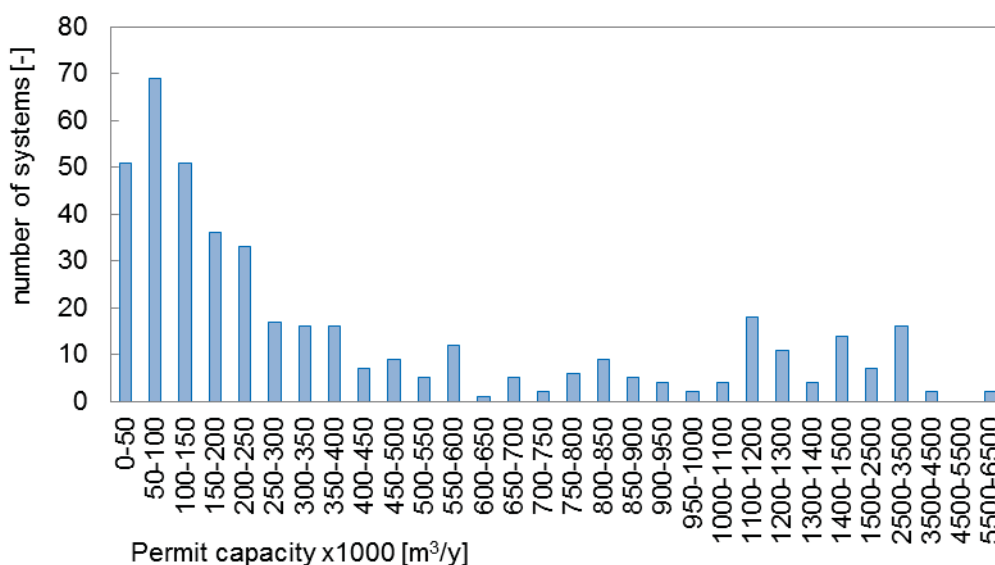
Ongeveer 25 tot 40 procent van alle energie die we in Nederland gebruiken is nodig voor het koelen en verwarmen van gebouwen [1]. In de gebouwde omgeving zou dus veel energie bespaard kunnen worden. Sinds kort is hier veel aandacht voor door de verduurzaming van de energievoorziening [2], [3]. De Nationale Energieagenda [4] stelt dat er in 2050 geen aardgas meer wordt gebruikt voor het verwarmen van gebouwen. Dit artikel gaat in op een nieuwe techniek die daaraan kan bijdragen.

Door de variatie in seizoenen hebben gebouwen in Nederland in de zomer een warmteoverschot waardoor er gekoeld moet worden, terwijl er in de winter een warmtetekort is en we onze gebouwen verwarmen. Afhankelijk van zowel de eigenschappen van het gebouw als de variaties in weer en seizoen is de warmtevraag in de winter vrijwel nooit precies even groot als het overschot in de zomer. Maar over een heel jaar bekeken blijft er een beperkte netto vraag naar verwarming of koeling over, en dat is slechts een klein deel van wat we in de winter en zomer nodig hebben. We kunnen het energieverbruik voor verwarmen en koelen dus significant verminderen door warmte en koude tijdelijk op te slaan. Dit gebeurt ook al veelvuldig in Nederland door middel van warmte-koudeopslag- (WKO) of bodemenergiesystemen. De toepassing hiervan is de afgelopen decennia sterk gestegen onder invloed van steeds strengere eisen voor de energieprestatiecoëfficiënt (EPC) van nieuwe gebouwen (afbeelding 1).

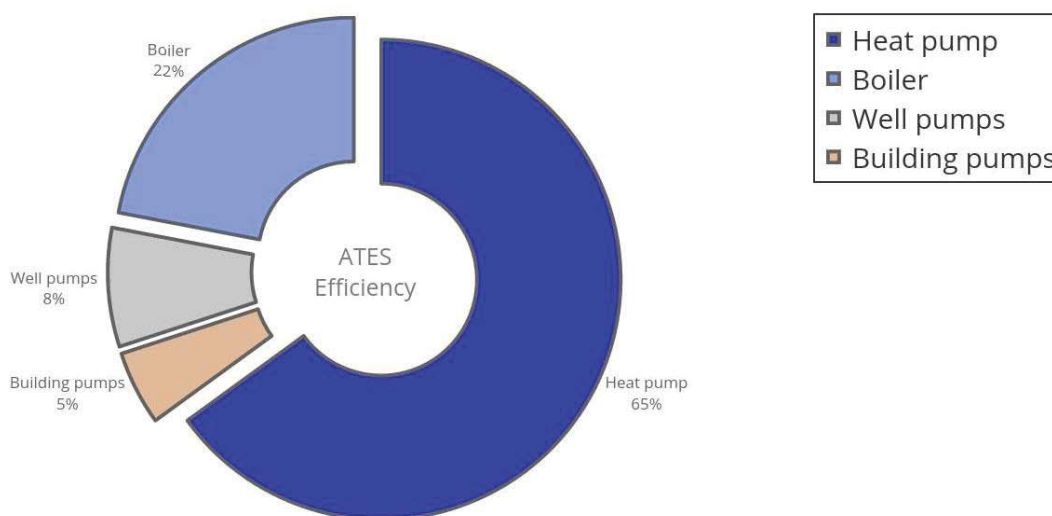


Afbeelding 1. Ontwikkeling van aantallen WKO-systemen en de EPC-eis voor nieuwe gebouwen

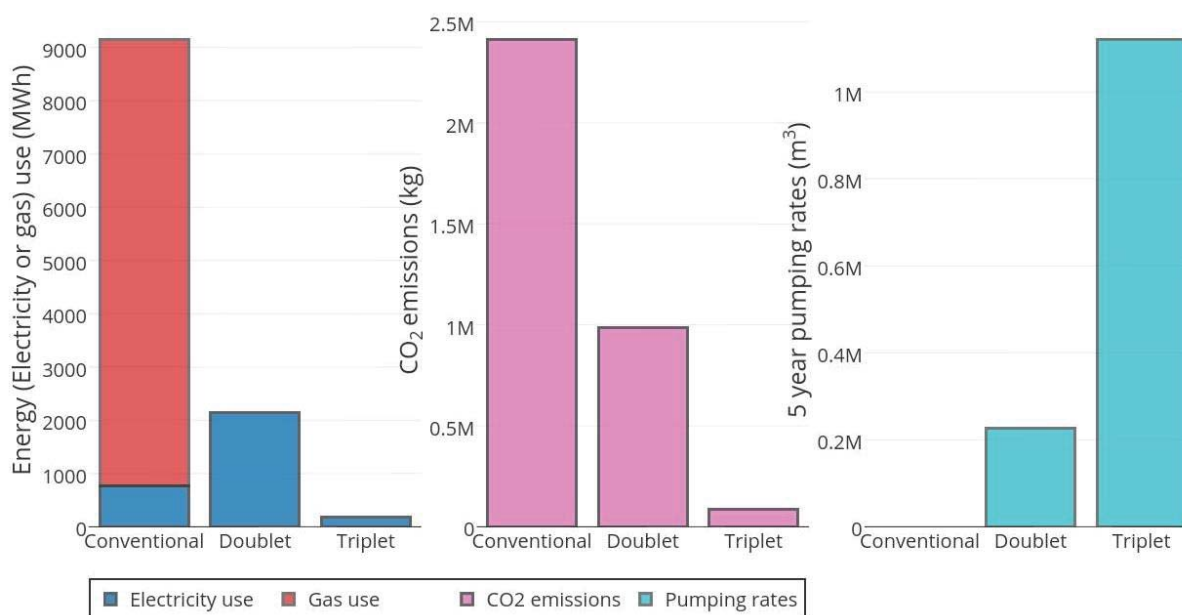
Als gevolg is er in Nederland al meer dan 25 jaar praktijkervaring met deze bodemenergiesystemen, waarvan er in ons land inmiddels zo'n 2.200 operationeel zijn [5]. Het grootste deel van die systemen heeft een opslagvolume tot 500.000 m³, enkele honderden systemen hebben een opslag van meerdere miljoenen kubieke meters (zie afbeelding 2) [6]. Door in de praktijk beter rekening te houden met de verliezen die optreden door warmtegeleiding en afstroming kan de efficiëntie waarmee koude en warmte wordt teruggewonnen, nog sterk verbeterd worden. Zo kan de diepte waarover opgeslagen wordt geoptimaliseerd worden [6]. Als inzet van een warmtepomp overbodig wordt, levert dit een belangrijke energiebesparing op (afbeelding 3) ten opzichte van conventionele WKO-systemen (afbeelding 4).



Afbeelding 2. Frequentieverdeling van vergunde opslagcapaciteiten van de 434 WKO-systemen in 5 provincies [6]



Afbeelding 3. Efficiëntie van een conventioneel WKO-doublet [7]



Afbeelding 4. Totaal energieverbruik, CO₂-emissies en pompdebieten voor conventionele energievoorziening (fossiel), conventioneel WKO-systeem (doublet, met warmtepomp) en een WKO-tripletsysteem (zonder warmtepomp) [7]

Ondergrondse warmtebuffer met hogere temperaturen voorkomt inzet van warmtepomp

Bij conventionele WKO-systemen is vooral de toepassing van koeling voordelig: er kan namelijk direct uit de koude grondwaterbron worden gekoeld. De *Coefficient of Performance* (COP, een quotiënt van geleverde en gebruikte energie) van deze manier van koelen varieert van 10 tot wel 30, een significante verbetering ten opzichte van een koelmachine, die een COP van circa 3 heeft. Tijdens het koelen wordt echter maar een beperkte temperatuursprong gemaakt in het grondwater. Als een gebouw moet worden gekoeld naar ongeveer 20°C kan het grondwater per definitie niet verder worden opgewarmd dan circa 18°C zonder er extra energie aan toe te voegen. Maar met het opgeslagen warme grondwater van maximaal 18°C kan er in de winter nog niet worden verwarmd. Daarom wordt er een warmtepomp toegepast die de temperatuur van 18°C opkrikt naar 40-45°C. Dit is efficiënter dan verwarmen met een gasketel.

Deze huidige toepassing van WKO is ten opzichte van conventionele koelmachines en ketels dus al een flinke verbetering. Deze systemen gebruiken echter nog steeds best veel energie: de warmtepomp gebruikt ongeveer 60% van alle energie die nodig is in zo'n WKO-systeem [8]. Door de warmte bij 40°C of meer in de bodem op te slaan is een warmtepomp niet meer nodig, waardoor de warmtevoorziening verder wordt verduurzaamd.

Verwarming en koeling met een WKO-tripletsysteem

De in de bronnen van een WKO-systeem opgeslagen energie is direct gekoppeld aan de vraag naar warmte en koude. Als er wordt gekoeld wordt er warmte opgeslagen voor het volgende seizoen en vice versa. Omdat een warmtepomp wordt gebruikt is de temperatuur van de warme bron niet zo belangrijk. Maar bij verwarming direct uit de warme bron wordt de kwaliteit van de warme bron ook van belang.

Zowel bij WKO als WKO-triplet is de temperatuur van de koude bron belangrijk, omdat daaruit direct wordt gekoeld. De kwaliteit van de koude bron is dan essentieel. Maar ook zonder warmtepomp (die bij het WKO-systeem voor de lage temperatuur van de koude bron zorgt) is de kwaliteit van de koude bron belangrijk.

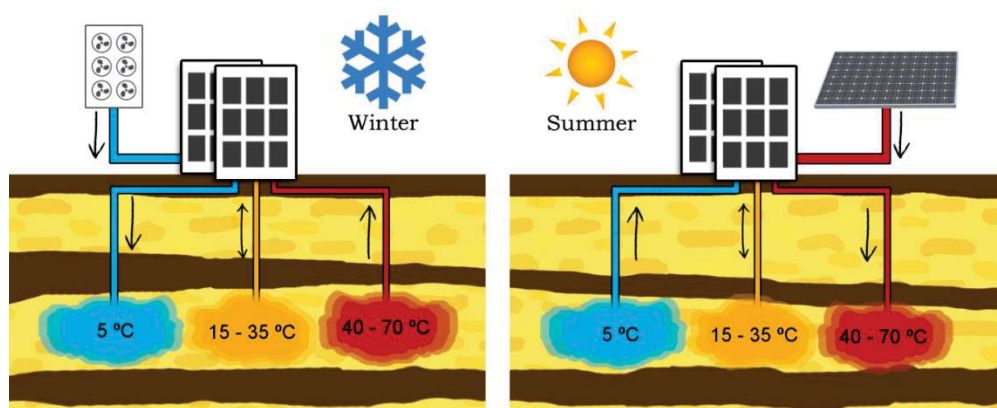
Winter

Als het gebouw wordt verwarmd om een temperatuur van 20°C te bereiken, kan de temperatuur van het water dat hiervoor is gebruikt nooit laag genoeg zijn om direct in de koude bron te stoppen, zodat er in de zomer mee kan worden gekoeld. Hiervoor is een temperatuur van maximaal 10°C nodig en liever nog lager. Als het buiten koud genoeg is kan het water dat uit het gebouw terugkomt via droge koelers op het dak tot de gewenste koudebrontemperatuur (circa 5°C) worden gekoeld. Er zullen echter tijden in het jaar zijn dat er wel verwarming nodig is, maar het buiten niet koud genoeg is om de gewenste koudebrontemperatuur te bereiken. In zulke perioden is er een bufferbron nodig om vervuiling van de koude bron te voorkomen. Als het buiten koud genoeg is kan het water uit de bufferbron alsnog worden opgepompt om af te koelen en te worden opgeslagen in de koude bron.

Zomer

In de zomer geldt een vergelijkbare situatie. Het gebouw wordt gekoeld naar ongeveer 20°C, waardoor de temperatuur van het gebruikte water dus nooit hoog genoeg kan zijn voor opslag in de warme bron. Als de zon genoeg schijnt kan het retourwater meteen met zonnecollectoren op het dak worden opgewarmd naar de gewenste temperatuur, alvorens in de warme bron te worden opgeslagen. Als de zonnecollectoren onvoldoende warmte produceren, is weer tijdelijke opslag in de bufferbron nodig, totdat voldoende warmte kan worden geproduceerd.

In plaats van een warmtepomp zijn er dus aanvullende voorzieningen nodig om op een duurzame manier extra verwarmings- en koelingscapaciteit in te vangen. Daarnaast is er ook een derde grondwaterbron nodig, die als buffer kan dienen tussen de koude en warme bron, namelijk een WKO-tripletsysteem (Afbeelding 5).



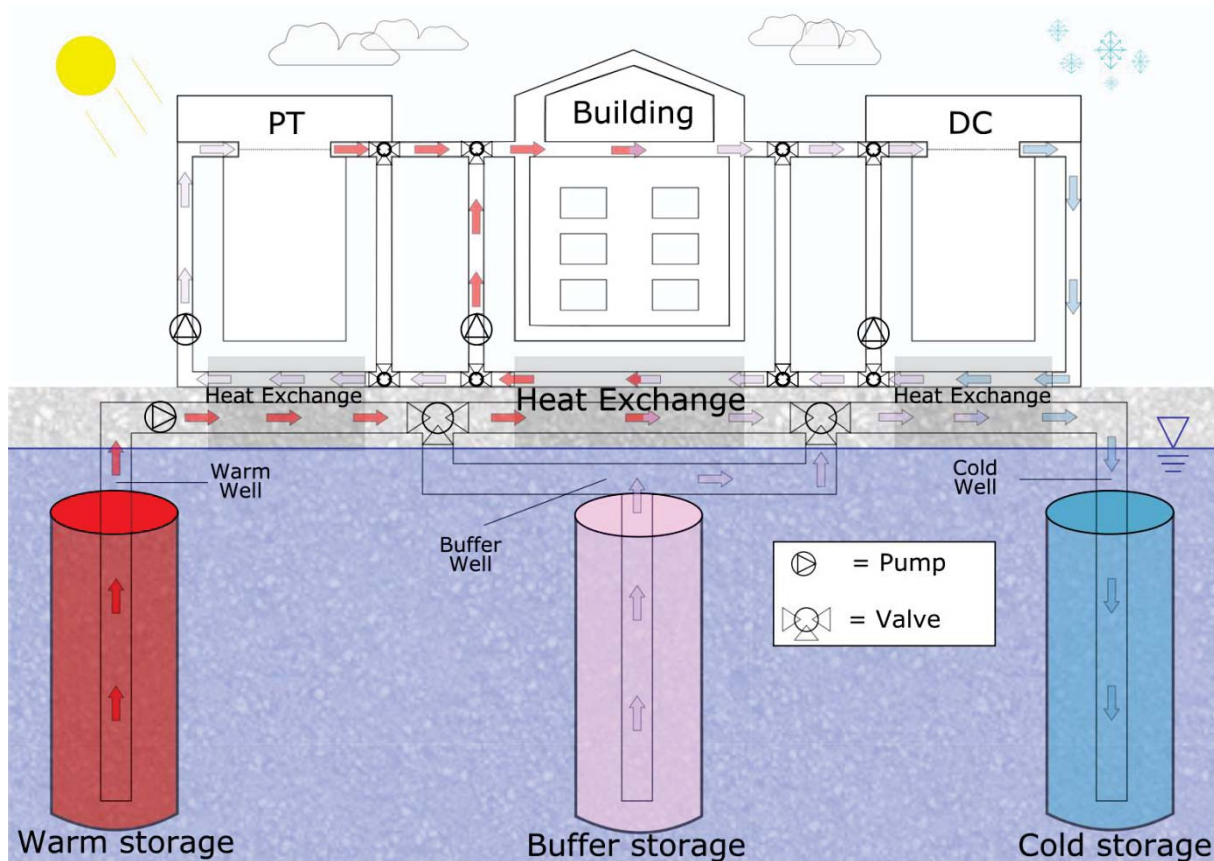
Afbeelding 5. Schematische weergave van een WKO-tripletsysteem zonder warmtepomp

Voor een goede inpassing van een ondergronds warmteopslagsysteem bij een bestaand of te ontwikkelen gebouw, zijn twee aspecten van belang bij het ontwerp. Ten eerste de capaciteit van de warmteopslag (in megajoules, MJ) en ten tweede het vermogen (in megawatt, MW) waarmee warmte uit de ondergrondse opslag geleverd moet kunnen worden. Beiden hangen af van de grootte en aard van de 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 in de warme, en zo laag mogelijk in de koude bron. Deze optimalisatie is vooral afhankelijk van de bron van (omgevings-)warmte/koude en de temperatuurtrajecten in de installaties van de afnemers.

Vanzelfsprekend moeten de verliezen die bij warmteopslag 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 naar verhouding kleiner wordt [6]. Op basis van inzichten uit de Nederlandse WKO-praktijk en de relatief kleine pilots met hogetemperatuuropslag zijn voor grootschalige warmteopslagsystemen rendementen van rond de 70-90% te verwachten. Wettelijk gezien mag er in WKO-systemen geen water met een temperatuur hoger dan 25°C worden opgeslagen. Gezien de duurzame energiedoelstellingen staan provincies positief tegenover pilotprojecten met opslag bij een hogere temperatuur.

Meer flexibiliteit

Afhankelijk van de exacte condities kan er tijdens koelen of verwarmen ook nog gelijktijdig uit de bufferbron worden gepompt. Dit kan handig zijn om tijdens het verwarmen bij een koude buitentemperatuur extra koelcapaciteit in de koude bron op te slaan. Gelijktijdig water in de bufferbron pompen kan ook. Zo kan een deelstroom naar de bufferbron worden gestuurd als het niet koud genoeg is om de energiestroom uit het gebouw volledig naar de gewenste koudebrontemperatuur terug te koelen. Soortgelijke situaties kunnen zich ook voordoen tijdens het koelen. Of deze optreden is afhankelijk van de klimatologische condities en de capaciteit van de droge koelers en zonnecollectoren. Om al deze verschillende werkingscondities mogelijk te maken is er een hydraulische koppeling nodig tussen de verschillende bronnen en systeemcomponenten. Met regelkleppen kan dan worden geregeld welke componenten bijdragen aan de uitwisseling van energie, schematisch weergegeven in Afbeelding 6.



Afbeelding 6. Werkingsprincipe van een WKO-triplet tijdens de winter, waarbij er zowel vanuit de warme bron als vanuit de bufferbron koude wordt opgeslagen [7]

Door de zonnecollectoren en droge koelers kan de opslag van energie ook worden losgekoppeld van de vraag naar energie van het voorgaande seizoen. Je hoeft er alleen maar voor te zorgen dat er voldoende energie is opgeslagen voor het komende seizoen en eventuele tekorten en overschotten kunnen worden vereffend in de bufferbron. Afhankelijk van de gebouweigenschappen en weersituatie ontstaat er dan een warmteoverschot of -tekort in de bufferbron.

De in deze beschrijving genoemde bronnen voor warmte en koude kunnen ook vervangen worden door alternatieve bronnen. In plaats van zon-thermisch kan ook restwarmte van nabijgelegen industrie worden gebruikt om de warme bron op de gewenste temperatuur te krijgen, of oppervlaktewater voor koude. Alleen als beide bronnen gegarandeerd beschikbaar zijn kan de bufferbron achterwege worden gelaten.

Hoe hoger de temperatuur van het opgeslagen water, hoe meer gebouwen van verschillende typen en leeftijden gebruik kunnen maken van de techniek. Waar WKO-systemen vooral bij nieuwe gebouwen kunnen worden toegepast, kunnen door de hogere opslagtemperatuur ook oudere, minder goed geïsoleerde, gebouwen worden verwarmd, die niet voor lagetemperatuurverwarming in aanmerking komen. Met een (beperkte) isolatiemaatregel kan de aanvoertemperatuur van de warmtevoorziening van zo'n bestaand gebouw naar 60 °C of lager. Dat scheelt in veel gevallen een ingrijpende verbouwing. Dit kan voor een deel van de gebouwen in Nederland een goede manier zijn om duurzamer te worden. En dat is erg hard nodig, want de belangrijkste verduurzamingsopgave ligt in de bestaande bouw. Dit zijn miljoenen gebouwen.

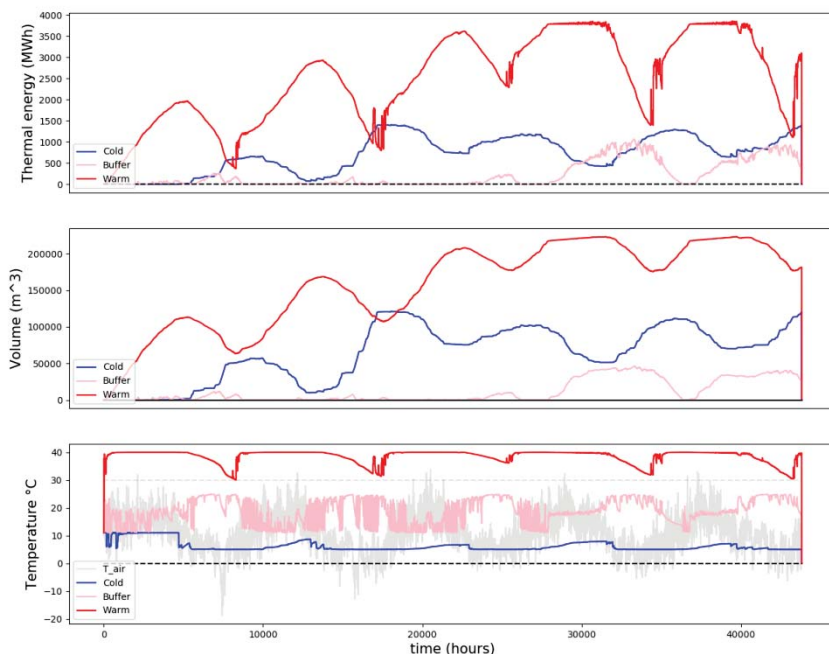
WKO-tripletsysteem in de praktijk

Er zijn veel afwegingen nodig om een ondergronds warmteopslagsysteem optimaal te kunnen koppelen aan de voorzieningen om warmte en koude in te vangen bij een gebouw. Hoe deze eruit zien is grotendeels afhankelijk van de energievraag van het gebouw, de eigenschappen van de aanwezige installatie en het klimaat. Voor een fictief kantoorgebouw van 50.000 m² bruto vloeroppervlak is op basis van vijf jaar klimaatdata voor De Bilt (2011-2015) inzichtelijk gemaakt wat de totale kosten (total costs of ownership, TCO) voor een conventioneel, een doublet-WKO- en een WKO-tripletsysteem zijn. Hiervoor zijn de energiestromen in en uit elke bron bepaald met een tijdsresolutie van 1 week, zodat ook het energieverbruik van de circulatie-/bronnepompen kon worden vastgesteld. Op basis van de benodigde energievraag is vastgesteld hoeveel droge koelers en zonnecollectoren nodig zijn, en welke investering daarmee gemoeid is. De belangrijkste toegepaste kentallen zijn weergegeven in tabel 1, de resultaten staan in afbeelding 4.

De resultaten laten zien dat een tripletsysteem qua businesscase vergelijkbaar is met een WKO-systeem, maar dat de emissies lager zijn. Voor de exploitatiekosten is naast de energiekosten uitgegaan van 5 procent van de investeringskosten per jaar. Er is in totaal circa 2.000 m² aan zonnepanelen nodig, en het vermogen van de droge koeler die nodig is om voldoende koude te kunnen invangen moet ruim 1 MW zijn.

Omdat de verwarmingsvraag groter is dan de koelingsvraag is in Afbeelding 7 te zien dat er structureel meer water moet worden onttrokken aan de bufferbron om in de zomer voldoende water te kunnen opslaan. Het verloop in de bufferbron volgt daarom sterk dat van de koude bron. Als die wordt ingezet voor koeling moet er warmte worden opgeslagen in de warme bron. Omdat het debiet vóór koelen dan niet toereikend is moet tegelijkertijd ook de tussenbron worden aangesproken. De zonnecollectoren en droge koelers slaan tot maximaal 20 procent meer thermische energie op dan de jaarlijkse te verwachten verwarmings- en koelvraag om te kunnen inspelen op variaties in de seizoenen. De grootte van de droge koeler en het aantal zonnepanelen is zo gekozen, dat de hoeveelheid energie die in elke bron wordt opgeslagen in de gesimuleerde periode van 5 jaar nooit kleiner is dan nul. Omdat de gemiddelde temperatuur over de jaren 2011-2015 sterk oploopt, zien we ook een onbalans ontstaan in de warme bron. Er wordt veel meer opgeslagen dan wordt terug gewonnen. In het vijfde jaar wordt voor het eerst pas de gewenste 20 procent overcapaciteit bereikt in de warme bron. In de wintermaanden wordt de tussenbron veelal als dag/nachtbuffer ingezet. Als het overdag warmer is dan 4°C kan er onvoldoende koude worden gewonnen voor opslag in de koude bron. Gedurende de nacht is het kouder en kan de bufferbron weer worden ontladen. Gedurende de zomer is dit niet aan de orde, omdat er tijdens koeling ook de meeste zon is, en er dus direct/simultaan warmte kan worden opgeslagen.

De resterende benodigde elektriciteit zou ook nog met zonnepanelen (fotovoltaïsch, PV) kunnen worden opgewekt om een volledig duurzaam systeem te krijgen.



Afbeelding 7. Resultaat van test case 50.000m³ kantoor. a) thermische energie (MWh), b) Volumes (m³), c) onttrekkingstemperatuur (°C) [7]

Conclusies

In dit artikel is een eerste beschouwing gegeven van de mogelijke werking van een WKO-tripletsysteem. Zo'n systeem lijkt een veelbelovende techniek. Nadere uitwerking van de volgende aspecten is nodig om de haalbaarheid verder te evalueren:

- Hoe alternatieven voor het invangen van koude (droge koelers) en warmte (zonnecollectoren) kunnen worden ingepast, omdat er ook ander (combinaties van) technieken moeten kunnen worden gebruikt voor invang van warmte/koude.
- De energiebalans van het systeem moet nader worden onderzocht. Hoewel er met realistische (klimaat-)data is gewerkt, moet toch op gedetailleerder niveau worden gekeken naar temperatuurtrajecten in het gebouw, schakelschema's tussen de bronnen en systeemcomponenten.
- Hogetemperatuuropslag in de bodem is nog geen bewezen techniek; zeker bij temperaturen hoger dan 45°C liggen daar nog uitdagingen ten aanzien van recovery-efficiëntie en chemische putverstopping. In dat kader is het schaalniveau ook van belang: water met een hoge temperatuur in de bodem opslaan lukt het beste op grote schaal, waardoor een WKO-tripletsysteem vooral goed zal werken voor grote gebouwen of een groep van gebouwen.

Tabel 1. Belangrijkste uitgangspunten/kentallen

Warmte vraag	energie	57	kWh/m ²	capaciteit	57	W/m ²
Koelvraag	energie	35	kWh/m ²	capaciteit	45	W/m ²
CO₂ emissie	gas	1,8	kg CO ₂ /m ³	elektra	0,46	kg CO ₂ /kWh
Kosten	warmtepomp	200	€/kW	droge koeler	80	€/kW
Kosten	ketel	60	€/kW	zonnepanelen	0,2	€/kWh
Kosten	elektra	0,2	€/kWh	gas	0,65	€/m ³
Temperatuur verwarmen	aanvoer	40	°C	retour	20	°C
Temperatuur koelen	aanvoer	5	°C	retour	20	°C

Referenties

1. Jong, K.de (2016). *Warmte in Nederland*. Hilversum, Stichting Warmtenetwerk.
2. Kamp, H. (2015), *Warmtevisie*, Den Haag, Ministerie van Economische zaken.
3. SER, Sociaal-Economische Raad (2013), *Energie Akkoord*. Den Haag, Sociaal-Economische Raad.
4. Ministerie van Economische zaken (2016). *Energieagenda, Naar een CO₂-arme energievoorziening*. Den Haag, Ministerie van Economische zaken.
5. Willemsen, N. (2016). *Rapportage bodemenergiesystemen in Nederland*. Arnhem, RVO/IF technology.
6. Bloemendal, M. and Hartog, N. (2017) Analysis of the impact of storage conditions on the thermal recovery efficiency of low-temperature ATES systems. *Geothermics* 17(C): p. 306-319.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0375650517302067>
7. Pape, J.J. (2017). *Feasibility study of an ATES triplet*. Utrecht, Utrecht University, MSc thesis.
8. Dekker, L.d. (2016). *Bepalende factoren voor goed functionerende WKO*. Slides van een presentatie op bijeenkomst van het Kennisplatform bodemenergie 2016