



**Vincent Leclercq**  
CRUX Engineering BV  
Delft



**Marco Gerola**  
Dipartimento di Scienze della Terra  
"A. Desio", Università degli studi di Milano



**Oskar de Kok**  
Bodembouw B.V.  
Uden



**Korneel de Jong**  
CRUX Engineering BV  
Delft



**Francesco Cecinato**  
Dipartimento di Scienze della Terra  
"A. Desio", Università degli studi di Milano

# CUTTER SOIL MIX ENERGIEWAND TESTOPSTELLING PRESENTATIE

## Inleiding

De vraag naar duurzame warmteproductie (en energie in het algemeen) neemt wereldwijd toe [1]. Klassieke geothermische bronnen zijn vaak duur [2] vanwege de vereiste boordiepte (0,5-1,5km bij ondiepe geothermie) en de beperkte beschikbare ruimte voor deze systemen die in een stedelijke omgeving sterk afneemt als gevolg van de onderlinge bron beïnvloeding (bij bron afstanden kleiner dan ca 500m [3]). Ondiepe geothermische warmtewisselaars bestaande uit thermisch geactiveerde geotechnische constructies vormen daarom een interessant alternatief door het combineren van primaire civieltechnische functie met een warmtebron als secundaire functie [2].

De CSM (Cutter-Soil-Mix [3]) Energiewand is een innovatieve thermisch geactiveerde geotechnische constructie door een warmtewisselaar aan te brengen op de wapeningsbalken van de CSM wand. Naast de fundering en grondkerende functie van de CSM wand wordt zo tevens een warmte/koude bron gecreëerd.

In Amstelveen is een testlocatie opgezet waar dit systeem gedurende 1 jaar (vanaf augustus 2023) zal worden getest financieel ondersteund door een MIT-subsidie. Het doel van deze pilot is om zowel de thermische efficiëntie als het thermomechanische gedrag van het systeem te beoordelen. Numerieke modellen worden hiervoor gevalideerd aan de monitoringsdata van de pilot. In dit artikel zijn, vooruitlopend op de daadwerkelijke meetdata, het CSM Energiewand systeem, de proefopzet bij Amstelveen, en de resultaten van verkennende numerieke modellen gepresenteerd.

## Systeembeschrijving en installatiewijze

Een CSM wand is een in de grond gevormde grond- en waterkerende wand. Deze is gerealiseerd door middel van een CutterSoilMix frees die de aanwezige grond vermengd met cement en water. De CSM wand wordt veelal toegepast in zandige ondergronden, maar kan ook worden toegepast bij cohesieve lagen. De wand wordt gemaakt in overlappende panelen (met breedte

van de frees). Wapeningsbalken (veelal IPE profielen) worden opgehangen in het nog onverharde CSM materiaal. Naast de grond en waterkerende functie kan de wand ook worden ingezet als funderingselement.

De CSM Energiewand is een ondiepe geothermische bron die naar verwachting geschikt is voor levering van warmte en koude. Het systeem bestaat uit PE-lussen (diameter 25mm à 40mm) die verbonden zijn aan de wapeningsbalken van de CSM wand. De lussen zijn aangesloten op een warmtepomp. De warmtepomp circuleert een koudemiddel (water+glycol) door de lussen in de CSM wand dat wordt opgewarmd door de omliggende grond en grondwater. De warmte wordt vervolgens opgewaardeerd naar bruikbare temperaturen door de warmtepomp en afgegeven aan het afgifte systeem. Andersom is de CSM Energiewand ook geschikt voor koeling van gebouwen in de zomer wanneer de bodem kouder is dan het gebouw.

De lussen zijn geïnstalleerd op de wapeningsprofielen voordat deze in de CSM wand worden aangebracht. De lussen zijn onderaan de profielen gebogen met een halfrond profiel om knik van de leiding te voorkomen. Een minimale boogstraal van 15 cm is hierbij wenselijk om drukweerstand in de leidingen te beperken. De lussen zijn daarmee te installeren in alle gangbare maten van wapening van CSM wanden. Aan de bovenkant worden de lussen in EPS ingebed om zo de leidingen na uitharden van de wand eenvoudig met een flauwe bocht uit de wand te kunnen geleiden. De lussen zelf zijn tijdens het inbrengen gevuld met water en afgedopt zodat de lus niet vervormt onder de druk van het ongeharde CSM materiaal. Na het installeren worden de individuele lussen op druk gebracht om zo eventuele lekkages vooraf aansluiting te detecteren. Omdat de suspensie van het CSM



**Figuur 1** – Lussen uit de IPE profielen in CSM wand (links); Verbinding van lussen op IPE profiel (rechts).

## SAMENVATTING

De CSM (Cutter-Soil-Mix) Energiewand is een innovatieve thermisch geactiveerde geotechnische constructie door een warmtewisselaar aan te brengen op de wapeningsbalken van de CSM wand. Naast de fundering en grondkerende functie van de CSM wand wordt zo een warmte/koude bron gecreëerd. In Amstelveen is een testlocatie opgezet waar dit systeem gedurende 1 jaar zal

worden getest. Hierbij wordt de thermische efficiëntie en het thermomechanische gedrag van het systeem beoordeeld. In dit artikel zijn, vooruitlopend op de daadwerkelijke meetdata, het CSM Energiewand systeem, de proefopzet bij Amstelveen, en de resultaten van verkennende numerieke modellen gepresenteerd.

materiaal stroperig is en eventuele verhardingen in de grond vermalen zijn door de frees is kans op schade aan de lussen tijdens het inbrengen van de wapeningsbalken zeer beperkt. 1 toont de verbinding van de lussen aan de IPE-wapeningsbalken en de geïnstalleerde CSM Energiewand.

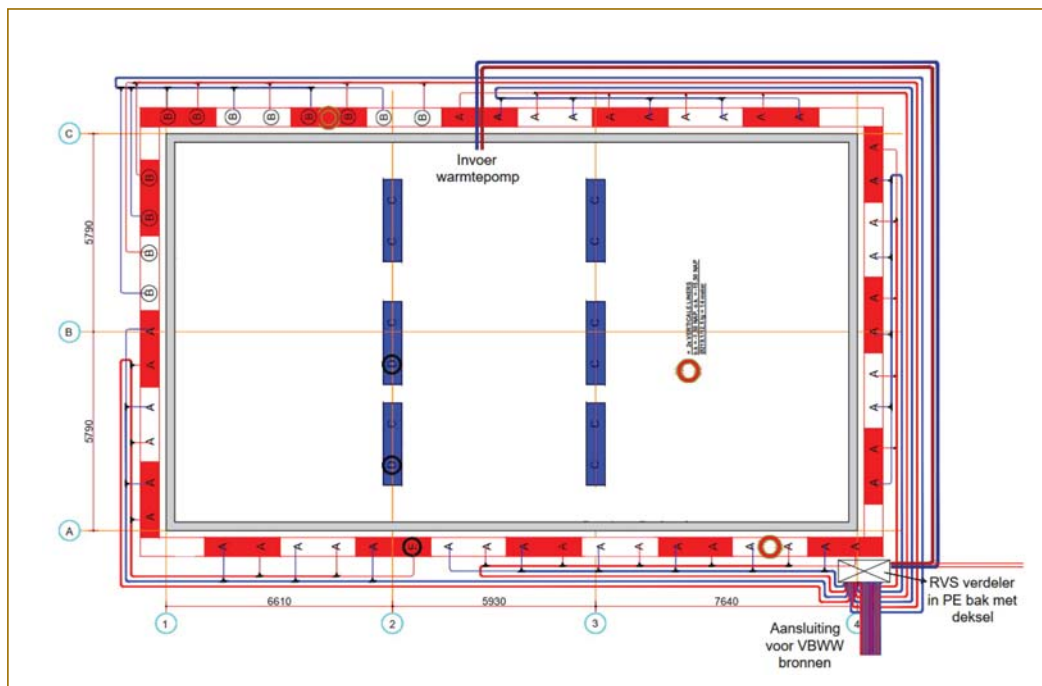
De lussen zijn onderling verbonden in subgroepen waarbij het aantal lussen dat onderling wordt verbonden in subgroepen afhankelijk is van het gewenste temperatuur verschil tussen in- en uitgang van de warmtepomp. In de pilot zijn twee lussen in serie geplaatst. Wanneer meer lussen in serie zijn aangesloten, wordt de uitgaande temperatuur verhoogd, maar neemt het debiet door de leidingen af. Indien een van de lussen schade heeft opgelopen wordt de subgroep (van 2 lussen) afgesloten van het circuit.

In de winter is de warmtepomp ingesteld om warmte te onttrekken aan de ondergrond voor de verwarming van het gebouw en tapwater. Hierdoor koelt de ondergrond naast de wand en in de kuip af en ontstaat een zogenaamde koudebel. Om de lange termijn prestatie van het systeem te waarborgen moet deze koudebel in de zomer weer herstellen. Hiervoor zijn twee opties die beide getest worden op de pilotlocatie.

- Passieve regeneratie, waarbij de warmtepomp en circulatiepomp uit staan. De koudebel warmt enkel op door toestroom van warmte uit de omgeving;
- Actieve regeneratie met koude-onttrekking, waarbij de vloeistof door de lussen koude onttrekt aan de bodem en levert aan het gebouw. De koudebel wordt hierbij extra opgewarmd vanuit de lussen omdat de vloeistof in de lussen wordt opgewarmd met warmte uit het gebouw.

### Proefopstelling - Amstelveen

In Amstelveen is een CSM Energiewand pilot opgezet waarbij de wand tijdens de bouw fase functioneert als grondkering voor de aanleg van de kelder. Na de bouw functioneert de CSM Energiewand zowel als funderingselement, kelderwand en als bron van warmte en koude. Activatie lussen zijn aangebracht op alle IPE300 wapeningsbalken van de wand (totaal 56 profielen, hart op hart afstand 1,1m). Hiervan zijn 44 lussen geïnstalleerd tot circa NAP-15,5m met een lengte van circa 14m (lussen genummerd A in figuur 2 hierna genoemd diepe lussen) en 12 lussen geïn-



Figuur 2 – Proefopstelling inrichting.

stalleerd tot circa NAP-11,0m met een lengte van circa 9,5m (lussen genummerd B in figuur 2 hierna genoemd ondiepe lussen). De CSM moten binnen de kuip (onderdeel van de fundering) zijn niet thermisch geactiveerd. De bodemopbouw op de locatie is kenmerkend voor Amsterdam, met een zandige toplaag tot circa NAP-3,5m een holoceen pakket tot circa NAP-11,0m met daaronder de Eerste zandlaag. De grondwaterstand bedraagt circa NAP-2,0m. Het vermogen uit de ondiepe lussen bedraagt het onttrekbare vermogen uit het Holoceen pakket. Het verschil in vermogen tussen de ondiepe en diepe lussen levert het vermogen specifiek vanuit de Eerste zandlaag.

De lussen zijn onderling verbonden in subgroepen van 2 lussen. Deze zijn verbonden in 5 hoofdgroepen van 6 subgroepen die op een verdeler zijn aangesloten. Deze bevindt zich net buiten de kuip. Vanuit de verdeler gaan 2 hoofdleidingen richting de warmtepomp in de meetcontainer die zich op een ponton bevindt op het naastliggende water. Tijdens de pilot wordt de gewonnen warmte afgefakkeld.

De monitoring opstelling is samengevat in figuur 2. De volgende onderdelen worden gemeten tijdens de pilot:

- Temperatuur van vloeistof in de lussen bij de in- en uitgang van de verdeelput met behulp van PT-100 thermowells;
- Debiet door de lus groepen bij de verdeler met flowmeters;
- Totaal debiet, temperatuur en geleverde warmte met een energiemeter op de hoofdleidingen bij de warmtepomp;
- Ondergrond temperatuur in de wand, binnen de kuip (op 2,5m en 5m uit de wand) en buiten de kuip (op 5m uit de wand) met behulp van thermistor strings;
- Verbruikte elektrisch vermogen van de warmtepomp en broncirculatiepomp.

Het vermogen van de warmtepomp die gebruikt wordt tijdens de pilot is lager dan het verwachte bronvermogen. Tijdens de pilot worden daarom maar 3 van de 5 groepen geactiveerd om het onttrokken vermogen aan te laten sluiten op het vermogen van de warmtepomp. Indien blijkt dat de lussen gedurende de looptijd minder vermogen leveren dan verwacht kunnen meer groepen open worden gedraaid in de verdeler. De minimale uitgangstemperatuur uit de warmtepomp is gesteld op 0 °C om eventuele bevriezing van de grond te vermijden. De pilot zal lopen van augustus 2023 tot september 2024. De fasering is hieronder

samengevat:

Fase 0 – Testfase (duur: circa 1 maand): De warmtepomp wordt aangezet om te testen of het systeem naar toebehoren functioneert.

Fase 1 - Continue warmteonttrekking (duur: 1 maand, augustus). De warmtepomp wordt continue aangezet om data te verzamelen voor de model kalibratie.

Fase 2 – Passieve regeneratie (duur: 1 maand, september): De warmtepomp en circulatiepomp worden uitgezet om de ondergrond temperaturen te regenereren voorafgaand de winteractivatie.

Fase 3 – Winteractivatie (duur: 7 maanden, tussen oktober en april): De warmtepomp wordt ingesteld op basis van een stooklijn. Hierbij wordt het onttrokken vermogen ingesteld op basis van de buitentemperatuur.

Fase 4 – Passieve regeneratie (duur 2 maanden, mei en juni): De warmtepomp en circulatiepomp staan uit.

Fase 5 – Actieve regeneratie op basis van stooklijn (duur 2 maanden, juli en augustus): De warmtepomp onttrekt koude aan de grond. Hiermee wordt de ondergrondtemperatuur actief hersteld en wordt het gebouw gekoeld.

Fase 6 – Passieve regeneratie (duur 1 maand –

september): Warmtepomp en circulatiepomp worden uitgezet. / Einde pilot.

Doel van het onderzoek is om de thermische potentie van de CSM Energiewand in de praktijk vast te stellen. Vooruitlopend op de pilot is een eindig elementen model opgezet in COMSOL Multiphysics om het theoretische vermogen van het systeem te voorspellen. De fasering van de activatie tijdens de pilot is overgenomen in het model. De ondergrond temperatuur-metingen, en debiet en temperatuurmetingen van de vloeistof in de leidingen tijdens de pilot worden gebruikt om de thermische eigenschappen van de grondlagen in het model verder te kalibreren. Hiermee wordt een basis gelegd voor een referentiemodel. Dit model zal worden gehanteerd voor de verdere optimalisatie van het systeem. Ten tijde van het schrijven van deze paper is de proef nog niet gestart en kan dus nog geen conclusie worden getrokken over het onttrekbare vermogen.

### Thermische eigenschappen CSM materiaal

Ondanks het algemene gebruik van de CSM wand

is er weinig informatie beschikbaar over de thermische eigenschappen van het materiaal. Voor een beter begrip van het mechanische en thermische gedrag van het CSM materiaal zijn 11 CSM kernen van de testlocatie bemonsterd. Eerst zijn computergestuurde tomografische (CT) scantests uitgevoerd op de kernen om een beter inzicht te krijgen in de materiaalsamenstelling en de macroporiënstructuren (zie figuur 3). Vervolgens is een reeks druksterkteproeven en "hot disk tests" uitgevoerd. Hiermee zijn druksterkte (UCS) en de thermische eigenschappen van de kernen beoordeeld. Figuur 3 toont de samenstelling van het CSM materiaal, gekenmerkt door een veelvoud aan materialen met verschillende dichtheden. Ondanks deze variatie is de thermische geleidbaarheid van de verschillende kernen vrij homogeen en gelijk aan 1,1 W/mK. De gemiddelde verkregen UCS-waarde bedraagt 9,2 MPa als laagste gemeten waarden 7,5 MPa.

### Comsol modellering

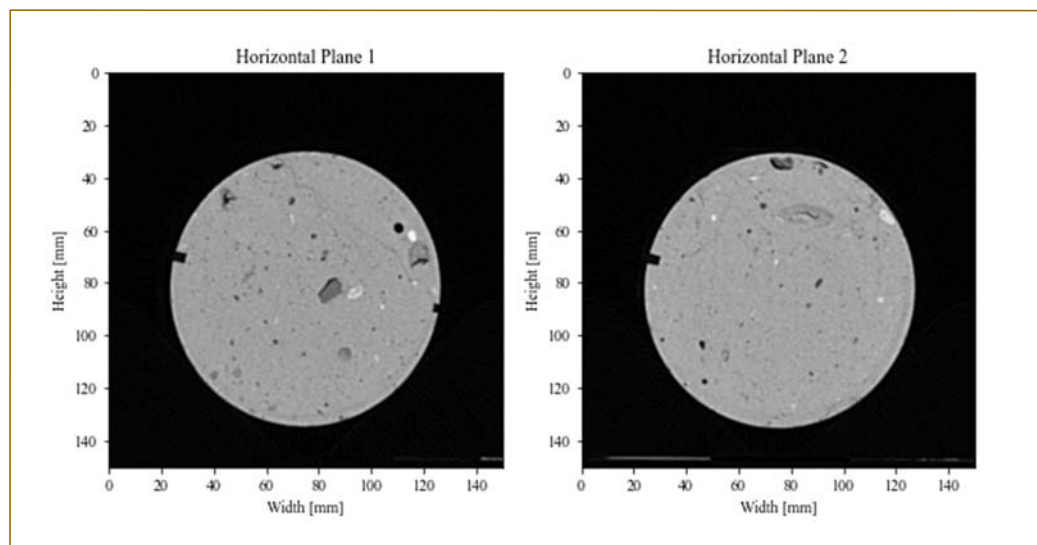
Een COMSOL model is opgezet waarin de proefopzet is nagebootst. De ondergrond parameters zijn gekozen op basis van literatuur en ervaringsdata vanuit onder andere de Energiedamwand pilot bij de Zweth Gerola, M., Cecinato, F., Haasnoot, J.K., Vardon, P.J. (2023). Cutter Soil Mixing (C.S.M.) Numerical modelling of Energy Quay Walls to assess their thermal behaviour. Proceedings of the Symposium on Energy Geotechnics Accelerating the energy transition, 3-5 October 2023, Delft, the Netherlands., waar grondlagen aanwezig zijn die vergelijkbaar zijn met die van Amstelveen. Een simulatie van 10 jaar is gedraaid voor 2 varianten:

Variant 1 – Passieve regeneratie

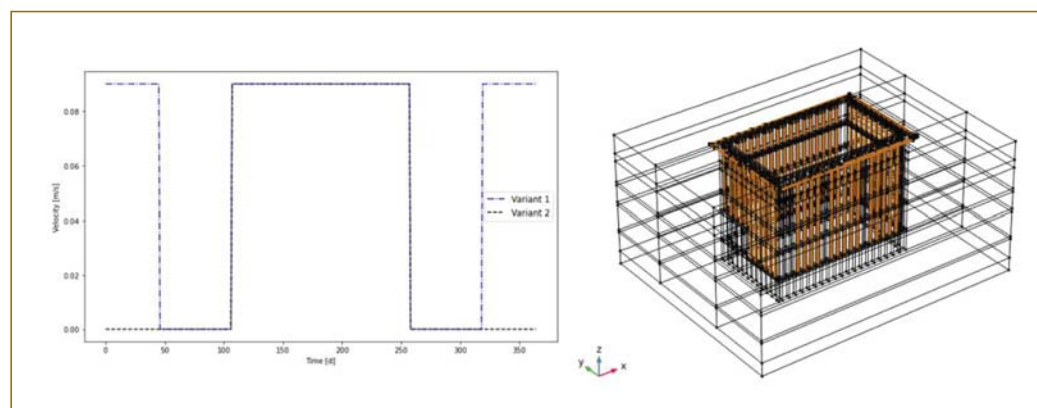
Variant 2 – Actieve regeneratie met koude onttrekking.

De model geometrie en activatie modus is getoond in figuur 4. In beide varianten is in de winter continu warmte onttrokken tijdens 152 dagen. In praktijk zal warmte niet continu worden onttrokken. Dit betreft dus een conservatief uitgangspunt om de uiterste prestaties van de CSM Energiewand te beproeven. De uitgaande temperatuur van de warmtepomp is vastgezet op 0 °C. Bij Variant 1 - passieve regeneratie is in de overige periode zowel de circulatie als warmtepomp uitgeschakeld. Bij Variant 2 - actieve regeneratie met koude onttrekking volgt, na de warmteonttrekking, een periode van 60 dagen passieve regeneratie. Hierna is een periode van 93 dagen koude onttrekking gemodelleerd, waarbij de warmtepomp een uitgangstemperatuur van 22 °C levert. Hierna volgt weer een periode passieve regeneratie van 60 dagen.

De resultaten van het verkennend numeriek model zijn getoond in 5 en 6. Het onttrokken



**Figuur 3 – Voorbeeld van CT-scan van een van de CSM kern: dichtheidsverdeling in grijs tinten van twee verschillende snedes.**



**Figuur 4 – Comsol model geometrie en activatie modus.**

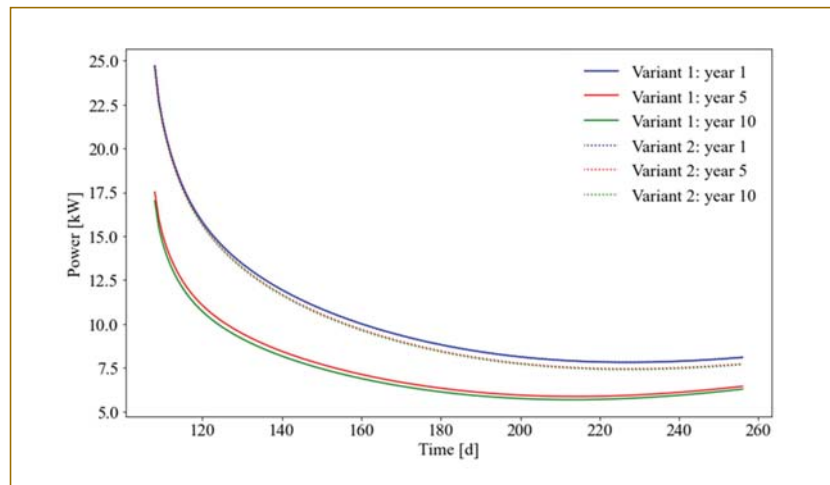
vermogen is maximaal aan de start van de activatie omdat de ondergrondtemperaturen dan het hoogst zijn. Na verloop van tijd koelt de ondergrond rondom de lussen, waardoor het temperatuurverschil tussen lus en grond en daarmee de warmteoverdracht naar de lus vermindert. In Variant 1 - passieve regeneratie neemt het uit de bodem onttrokken vermogen na 5 jaar af met 28%. Dit komt omdat de ondergrondtemperatuur bij passieve regeneratie niet voldoende tijd heeft om te herstellen, en dus een onbalans ontstaat tussen warmte in en uitstroom. Bij variant 2 - actieve regeneratie met koude-onttrekking is het vermogen na 10 jaar vrijwel identiek aan het vermogen van het eerste jaar. Dit laat zien dat het systeem in balans is. Een vermogen van 10,5 W/m<sup>2</sup> CSM Energiewand is berekend wanneer het systeem in balans is. Dit komt voor de wand van de pilot circa overeen met de verwarming van een 187 m<sup>2</sup> gebouw met energielabel A++ of 125m<sup>2</sup> gebouw met energielabel A [4]. Het wordt benadrukt dat het model nog niet is gekalibreerd aan de meetdata van de pilot. Wanneer het model gevalideerd is aan de meetdata tonen de resultaten uit de proef van De Zweth dat het onttrekbare vermogen goed is te voorspellen. Bij gebrek aan validatie zijn de voorspellingen van het vermogen nog niet definitief.

### Conclusies en vervolgstappen

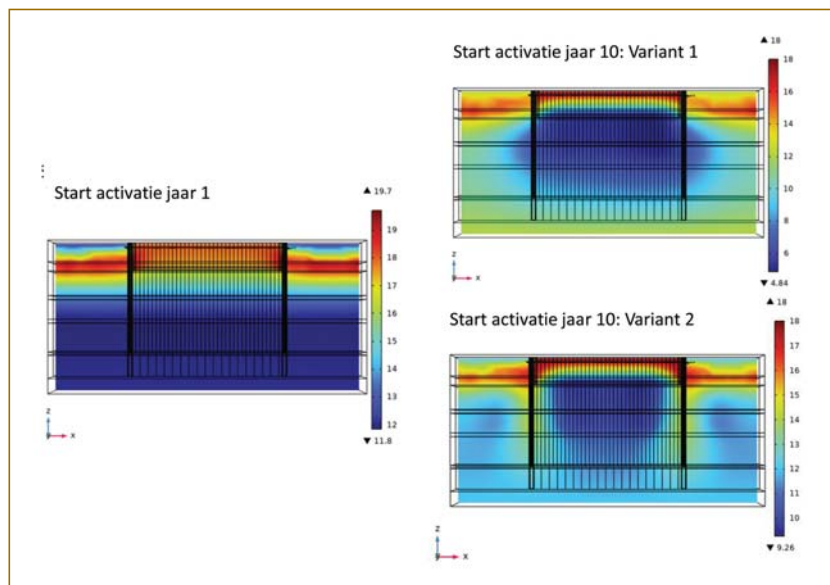
De CSM Energiewand is een innovatieve thermisch geactiveerde geotechnische constructie door een warmtewisselaar aan te brengen op de wapeningsbalken van de CSM wand. Naast de fundering en grondkerende functie van de CSM wand wordt zo tevens een warmte/koude bron gecreëerd.

De CSM Energiewand proefopstelling in Amstelveen is met succes opgezet en klaar om opgestart te worden. De installatie zelf is eenvoudig verlopen dankzij de robuustheid van het systeem. De pilot zal naar verwachting een jaar duren. Tijdens de pilot wordt het onttrokken vermogen en invloed op de temperatuur van de omliggende bodem nauwlettend gemonitord. Het doel van de pilot is drieledig, namelijk het onttrekbare vermogen experimenteel vaststellen, de thermomechanische eigenschappen van het CSM materiaal in het laboratorium beproeven en het numerieke COMSOL model te valideren.

De thermische en sterkte eigenschappen van het CSM materiaal is beproefd. De bodemopbouw op de proeflocatie (met aanwezigheid van klei, veen en zand) is representatief voor de meeste grondsoorten van Nederland. De thermische geleidbaarheid van het materiaal is redelijk homogeen rond de 1,1 W/mK. De gemiddelde verkregen UCS-waarde bedraagt 9,2 MPa als laagste gemeten waarden 7,5 MPa. De eerste resultaten van het rekenmodel tonen aan dat een



**Figuur 5 –** Berekend totaal vermogen.



**Figuur 6 –** Ondergrondtemperatuur aan de start van de eerste en 10e activatie fase (einde zomer) bij passieve en actieve regeneratie.

vermogen van 10,5 W/m<sup>2</sup> CSM Energiewand kan worden behaald. Dit komt op de pilot locatie overeen met de verwarming van een gebouw van 125 m<sup>2</sup> met energielabel A. Deze resultaten worden gevalideerd aan de hand van de proefresultaten. Het gevalideerd numeriek model gaat als basis dienen voor verdere systeem optimalisaties. In de loop van dit jaar wordt een tweede proefopstelling gerealiseerd in Amsterdam nabij het Vondelpark. De conclusies vanuit de pilot in Amstelveen worden meegenomen in de inrichting van deze tweede pilot.

### Referenties

[1]. Loveridge, F., McCartney, J. S., Narsilio, G. A., & Sanchez, M. (2020). Energy geostructures: A review of analysis approaches, in situ testing and model scale experiments. *Geomechanics for Energy and the Environment*, 22. <https://doi.org/10.1016/j.gete.2019.100173>.  
 [2]. Stefánsson, V. (2002) Investment cost for geothermal power plants. *Geothermics*, Volume 31, Issue 2, 263-272 ISSN 0375-6505, [https://doi.org/10.1016/S0375-6505\(01\)00018-9](https://doi.org/10.1016/S0375-6505(01)00018-9)  
 [3]. Ondiepe Geothermie. Innoforte (2021).

[www.innoforte.nl/warmtebronnen/geothermie/ondiepe-geothermie/](http://www.innoforte.nl/warmtebronnen/geothermie/ondiepe-geothermie/).

[4]. Brandl, H. (2006). Energy foundations and other thermo-active ground structures. *Geotechnique*, 56(2), 81–122. <https://doi.org/10.1680/geot.2006.56.2.81>.  
 [5]. Fiorotto, R., Schöpf, M., Stötzer, E. (2005). Cutter Soil Mixing (C.S.M.) An innovation in soil mixing for creating cut-off and retaining walls. *Proceedings of the 16th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, pp. 1185 – 1188. doi:10.3233/978-1-61499-656-9-1185.  
 [6]. Hoeveel verwarming heb ik nodig voor een ruimte? De Groene Hoed Duurzaam. (2023). [www.groenehoedduurzaam.nl/kennisbank/verwarming-en-koeling/warmtevraag-bepalen-voor-een-losse-ruimte/](http://www.groenehoedduurzaam.nl/kennisbank/verwarming-en-koeling/warmtevraag-bepalen-voor-een-losse-ruimte/).  
 [7]. Gerola, M., Cecinato, F., Haasnoot, J.K., ardon, P.J. (2023). Cutter Soil Mixing (C.S.M.) Numerical modelling of Energy Quay Walls to assess their thermal behaviour. *Proceedings of the Symposium on Energy Geotechnics Accelerating the energy transition*, 3-5 October 2023, Delft, the Netherlands. ●