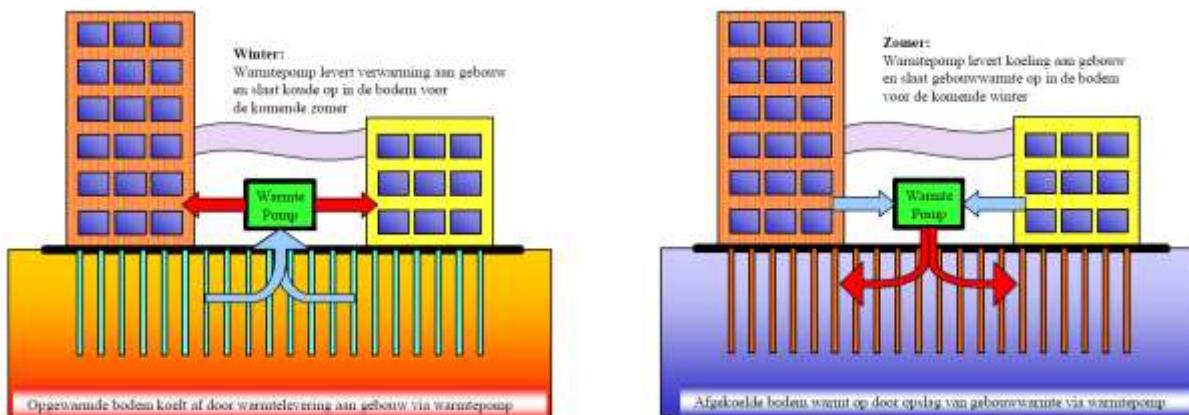


Hoofdstuk 7 – Energiepalen

7.1. Principe

7.1.1. Inleiding

Een energiepaal combineert de functie van fundering en middel om warmte of koude uit de bodem te halen of in de bodem op te slaan. Daarvoor zijn over de lengte van de paal kunststof slangen aangebracht, waardoor een mengsel van water en antivries stroomt. Er bestaan verschillende typen palen en verschillende configuraties voor het plaatsen van de slangen. De stroming van gekoeld of verwarmd water door de slangen laat toe warmte aan de omringende bodem te onttrekken of toe te voeren.



Figuur 1. Seizoenswerking energiepalen (TNO 2003)

Thermo-active circuits for energy foundations (Brandl 2009):

"A thermo-active system consists of the primary circuit below ground and the secondary circuit in the building. The primary circuit contains closed pipework in earth-contact concrete elements through which a heat carrier fluid (water, water with antifreeze or a saline solution, with additives to prevent corrosion) is pumped that exchanges energy from the building with the ground. Once cast, the pipings within the underground-contact concrete elements are individually joined to a header and manifold block. They are joined by connecting pipes which are normally laid within the blinding beneath the base slab. The secondary circuit is a closed fluid-based building heating or cooling network (secondary pipework) embedded in the floors and walls.

Commonly, primary and secondary circuits are connected via a heat pump that increases the temperature level, typically from 10–15°C to a level between 25°C and 35°C. All that is required for this process is a low application of electrical energy for raising the originally non-usable heat resources to a higher, usable temperature."

7.1.2. Kostprijs/Rendement van energiepalen

Volgens TNO 2003 is de belangrijkste voorwaarde voor een succesvolle toepassing van energiepalen dat de verhouding tussen de bruto vloeroppervlakte en het stempeloppervlak van het gebouw niet te groot is. Situaties waar zowel verwarming als koeling nodig is, zijn ook gunstiger.

Zoals voor andere types van grond gekoppelde verwarming/koelingsystemen (vooral met warmtepompen) is het van belang de behoefte aan verwarming en koeling te minimaliseren, en geschikte afgifte systemen te gebruiken (lage temperatuur verwarming- en hoge temperatuur koelingsystemen). Ook de dimensionering van de warmtepomp is van belang voor de kostprijs, omdat deze proportioneel met het gevraagde vermogen toeneemt.

Volgens TNO (2003) dient voor de levering en montage van een energiepalensysteem ten opzichte van normale palen (in het geval van heipalen) rekening te worden gehouden met een meerprijs van +/- 600 € per kW onttrekkingsvermogen (exclusief fiscale voordelen, en in 2003). Er wordt hierbij uitgegaan van een onttrekkingsvermogen van 35 kW per meter thermisch effectieve paallengte (TNO, 2003).

Basisprincipes voor een goed rendement van het systeem : (SIA 2005)

- Verdeelde temperatuur dicht bij de vloeistoftemperatuur aan de uitgang van de paal
- Geen/ beperking van bijkomende hulpenergie
- Een hoog aantal vollasturen per jaar
- Energiebalans tussen warmte- en koude-gebruik van de structuur
- Laag elektrisch vermogen voor de warmte-/koude overdracht naar het gebouw
- Lage energiestroom e verdeeld per lengte/oppervlakte-eenheid (= Toepassing van een lage temperatuur warmte afgiftesysteem of een hoge temperatuur koelingssysteem)
- « Gestion chaud-froid à l'intérieur de la géostructure effectuée par principe de stratification thermique plutôt que par mélange » - ?Warmtewisseling in de geostrcutuur eerder door laminaire stroming dan door turbulente stroming ??
- Goed ontwerp van de warmtewisselaar

Brandl 2009:

- The economically minimum length of piles, barrettes or diaphragm wall panels is about 6 m. Dry soil makes deeper piles and a larger area of the heat exchanger necessary.
- Usually, a temperature difference of only $\Delta T = 2^\circ\text{C}$ between absorber fluid inflow and return flow from the primary circuit is sufficient for an economical operation of the energy system. Experience has shown, that the electricity required for operating the entire system commonly varies between 20 to 30% of the total energy output. If no heat pump is necessary (e.g. for free cooling) this value drops to 1 to 3% for merely operating a circulation pump.
- The drop out rate of properly installed energy piles is negligible and occurs practically only during construction. In Austria the failure rate usually is less than 2% of the required usable energy output of the entire energy system. If it is more, the construction firms have to pay for reduced quality. However, for safety reasons the energy foundations are commonly designed as if an energy loss of 10 % might occur. This over-design covers failures during the construction period that cannot be repaired and possible long-term failures or losses in the primary and secondary circuit of the energy system. Long-term failures within energy piles can be excluded if they are operated properly. Once, energy piles have passed positively the acceptance tests, no long-term failures could be observed until now.

7.1.3. Toepassingsgebied en beperkingen

In bijlage 1 worden de schema's uit TNO (2003) en COFOE (2007) gegeven, waarbij het hele proces van oorspronkelijk idee om energiepalen eventueel toe te passen tot het uiteindelijke beheer zijn weergegeven. De onderstaande Tabel 1 geeft een samenvatting van parameters en criteria m.b.t. de selectie van potentiële gebieden voor energiepalen (zie ook bijlage).

Tabel 1: Parameters en criteria voor identificatie en selectie van potentiële gebieden (COFOGE 2007)

Criteria	Parameters te bepalen
M.b.t. de uitvoering van de funderingen	- Grondmechanische eigenschappen (drukweerstand, wrijvingshoek en cohesie,...). Een lage grondweerstand tot een diepte van 5 tot 8m vanaf de oppervlakte is gunstig voor het gebruik van energiepalen.
M.b.t. de uitrusting van de funderingen met warmtewisselaars	- Eigenschappen van de watervoerende laag (diepte, dikte, gradiënt en grondwater stromingssnelheid) - Thermische eigenschappen van de grond (thermische geleidbaarheid > 1.3 W/mK (indien mogelijk > 1.8 W/mK) en warmte opslagcapaciteit)
Beperkingen voor het gebruik van energiepalen/funderingen	- Mogelijkheid tot kortsleutingen tussen watervoerende lagen, of vorming van een hydraulische barrière. - Locatie van de site ten opzichte van waterbeschermingszones. - Evaluatie van de thermische storing (invloed op water viscositeit, inhoud in opgelost gas, chemische en biologische eigenschappen, enz.)

COFOGE 2007 : La valeur limite de la vitesse de Darcy est de 0.5 à 1 m/jour :

- Met een grondwaterstroming sneller dan 0.5 tot 1m per dag, wordt de grond warmte op een natuurlijke wijze terug geladen. Een warmte of koude opslag is dan meestal onmogelijk .
- Met een grondwaterstroming trager dan 0.5 tot 1m per dag wordt een thermische lading van de grond nuttig om een constante grondtemperatuur op de lange termijn te garanderen. Idealiter wordt er dan een gecombineerd systeem met verwarming en koeling toegepast.

« Ainsi, idéalement, pour un système combiné de chauffage et de refroidissement, il faut un faible écoulement de l'eau souterraine pour empêcher le gel du sol en hiver, mais cet écoulement doit être limité pour éviter la perte de l'énergie stockée. Dans ce cas, avec une recharge thermique de 70 à 90 % de l'énergie extraite et une conductibilité thermique du terrain de 2.3 [W/mK] (correspondant à des sables ou graviers saturés), l'extraction de chaleur par les pieux est de 30 à 35 W par mètre linéaire de pieu échangeur ou de 65 à 80 [kWh/m an]. L'injection de chaleur dans les pieux (refroidissement) doit être d'au maximum 30 [W/m] en moyenne, soit approximativement 20 à 60 [kWh/m an] (Fromentin et al., 1999). »

Een aantal risico's m.b.t. het milieu zijn aangegeven in de onderstaande kader uit COFOGE (2007). Volgens Brandl (2009) wordt de grondwatertemperatuur met meer dan +/- 1°C veranderd op een afstand van minder van 5 tot 10m van de structuur.

COFOGE (2007) :

« Risques liés à l'exploitation thermique du terrain : risque lié au gel du terrain (perte de portance des pieux géothermiques, conséquences néfastes sur les eaux souterraines : modification des constantes d'équilibre des substances minérales, diminution de l'activité des germes aérobies). L'injection de chaleur dans le sol peut aussi entraîner des conséquences préjudiciables pour le terrain et les eaux souterraines : décollement du terrain (pour les parois), tassements différentiels et fissuration (pour les dalles), réchauffement des eaux qui peut conduire à la prolifération de germes pathogènes. Il est donc fortement recommandé de limiter la modification moyenne de la température des eaux souterraines à moins de 1 °C.

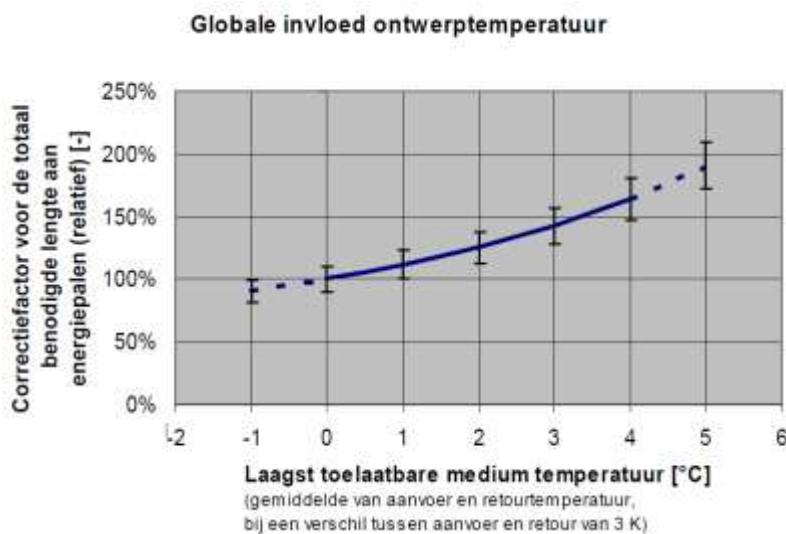
Risques liés aux fuites de fluide caloporeur : Une fuite peut se produire lors du remplissage du circuit ou lors de travaux de percement ou de transformations. La planification de l'aménagement du territoire ne doit pas se réduire à l'échelle de la surface du bâtiment à construire, et doit envisager le sol comme une ressource globale en énergie, en eau et en matériaux exploitée par la ville. Cette échelle de planification est nécessaire afin d'éviter tout risque d'incompatibilités d'usage des ressources ou une densité de fondations géothermiques trop importantes. La conception des fondations géothermiques doit absolument tenir compte des conditions hydrogéologiques du terrain, non seulement pour le dimensionnement du système mais aussi pour éviter les effets de barrière des eaux souterraines ou de by-pass entre deux aquifères. Un contrôle des conditions géologiques du terrain durant l'exécution des fondations géologiques est aussi nécessaire afin de vérifier le système *a priori*. Ce premier niveau de vérification permet de réadapter le projet avant de causer tout dommage irréversible au terrain. La maintenance des fondations géothermiques ne doit pas être négligée non plus sur le plan environnemental. Elles doivent faire l'objet d'un contrôle régulier : étanchéité des circuits, purge des circuits caloporeurs si nécessaires.

Protection des nappes souterraines : Les éventuelles sources de pollution d'une nappe souterraine par la réalisation de fondations thermoactives sont de quatre types :

- Court circuit entre aquifères ;
- Contamination provenant de la surface ;
- Contamination lors de la construction ;
- Fuites de liquide caloporeur. »

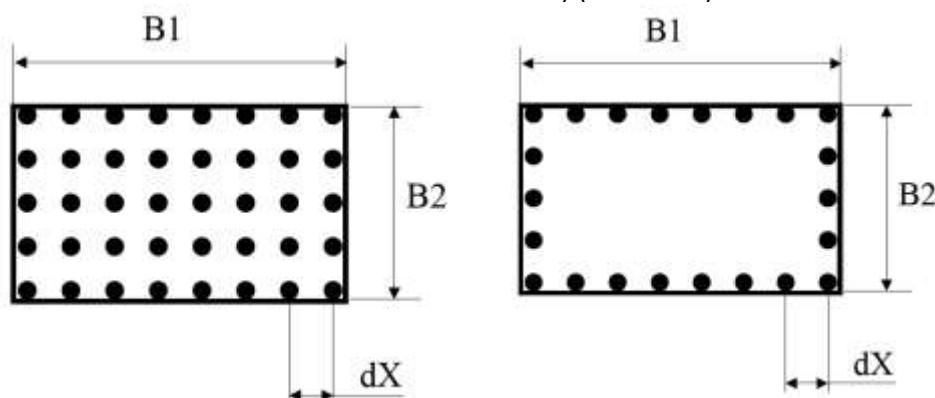
7.1.4. Invloedsfactoren op de prestatie van energiepalen

1. Mediumtemperatuur: volgens de TNO handboek (2003) is de temperatuur van het medium (water met antivries) dat door de palen stroomt de belangrijkste factor voor het vermogen van energiepalen: Hoe lager de mediumtemperatuur, hoe hoger (lager) het ontrokken vermogen voor verwarming (voor koeling). Figuur 2 toont de invloed van de toelaatbare temperatuur op de totaal benodigde lengte aan energiepalen.



Figuur 2 Globale invloed ontwerptemperatuur op de benodigde energiepalen lengte (TNO 2003)

2. Het aantal equivalente vollasturen (verhouding tussen de hoeveelheid ontrokken warmte en het maximale vermogen waarmee dit gebeurt): hoe hoger het aantal equivalente vollasturen, hoe lager het specifieke vermogen [W/m] van de energiepalen.
3. Regeneratie van de bodem: de prestaties van energiepalen zijn beter naarmate de hoeveelheid warmte die aan de bodem wordt ontrokken (voor verwarming) en toegevoerd (voor koeling) meer in evenwicht zijn.
4. Opstellingsvorm: gevulde matrix of randopstelling (zie Figuur 3): in de situatie zonder regeneratie levert de randopstelling hogere vermogens per meter energiepaal (maar uiteraard zijn er dan wel minder meters energiepaal beschikbaar). De onderlinge afstand van de energiepalen moet gemiddeld minstens 3 tot 3.5m zijn (een groter afstand van ca. 5m is aanbevolen wanneer alleen warmte wordt ontrokken) (TNO 2003).



Figuur 3 Opstellingsvorm: (a) gevulde matrix; (b) randopstelling (TNO 2003)

5. Onderlinge afstand tussen de energiepalen: wanneer er geen regeneratie plaatsvindt, heeft een te korte afstand tussen de energiepalen een negatieve invloed op hun rendement. Die invloed is gering bij volledige regeneratie.
6. De bodemsoort (doorlatendheid, watergehalte, aanwezigheid van dikke veenlagen, ...).
7. Grondwaterstroming: wanneer er geen regeneratie plaatsvindt, heeft grondwaterstroming een positieve invloed, terwijl bij volledige regeneratie (de bodem heeft een opslagfunctie) grondwaterstroming een negatieveinvloed heeft (afhankelijk van de snelheid).
8. Luchttemperatuur en zoninstraling: hebben een (beperkte) invloed, met name voor systemen met randopstelling.

Brandl 2009: Local climate, ground properties, technological level, specific use of a building, seasonal fluctuations, environmental conditions and actual energy prices are the main influence parameters of an optimised design.

7.2. Uitvoeringsmethode

7.2.1. Energiepaal

Verschillende types palen kunnen gebruikt worden als energiepaal. Het type paal hangt vooral af van geografische markten en gewoonten.

- In België: geboorde palen (Janssen Pharmaceutica, KVIV prijs), schroefpalen (OCMW van Leuven, bouwkroniek 2010)
- In Duitsland: cast in place, precast piles (Katzenbach et al. 2011)
- In Finland: stalen buispalen (Uotinen et al. 2012)
- In Frankrijk: (COFOGE 2007): prefab palen, geboerde palen
- In Nederlands (TNO 2003): meestal heipalen (prefab voorgespannen betonnen palen)
- In UK (ARUP 2005, GSHP 2012): Rotary bored piles (proven), CFA piles (trials only)
- In Zwitserland (SIA 2005): prefab heipalen of drukpalen, boorpalen, injectiepalen (“pieux injectés/enrobés”)

Natuurlijk zijn constructieve aspecten sterk afhankelijk van het type paal.

a) Algemeenheden

Installation of absorber pipes in deep energy foundations (focussed on bored piles) (Brandl 2009)

“Installing reinforcement cages fitted with absorber pipes in deep foundations requires the following measures:

- *Protection from mechanical and thermal (during reinforcement welding) damaging*
- *Exact positioning of the reinforcement cages (orientation of the connecting box)*
- *Constructing stiff reinforcement cages for deep foundations (e.g. welding of helical reinforcement to vertical rebars of deep piles, barrettes etc.).*
- *Lifting long reinforcement cages at both ends to prevent damage to the pressurised absorber pipe loops.*
- *Use of full tremie pipes to place concrete in pile bores; also for dry rotary-bored piles, where commonly self-compacting concrete is placed via a short tremie pipe from the ground surface. Upon the completion of the pipe work fixing on the reinforcement cage, a visual check on the final location of the pipes is imperative to ensure that the flow of the wet pile concrete through the reinforcement cage would not be impaired. The pipe ends near the bottom of the cage should be placed at different levels to help this.*
- *Very long reinforcement cages fitted with absorber pipes have to be installed in sections which should be coupled by screwing and not welding. The pipes are extended/coupled by electrically welded sleeves. Welding of the reinforcement sections is only unavoidable if a lightening protection element is attached. In such cases the absorber pipes have to be protected during welding by welding mats.*
- *Cautious insertion and withdrawal of the tremie pipes.*
- *Protection from torsion and heave of the reinforcement cage during concreting and steel pipe withdrawal.*
- *Sufficient distance of the absorber pipes from the reinforcement on head and toe of the foundations.*

Special precautions have to be taken for energy piles or diaphragm walls used for cut and cover tunnels or retaining walls if they are covered by a secondary lining. In order to avoid damage of the absorber pipes when installing the connecting nails or dowels, the pipes should be protected by twin bars. The absorber pipes in the foundation elements shall be kept under pressure in all construction stages. This enables prompt localisation of possible defects and repair in time. The collectors or distributors respectively of the absorber pipes should be fitted with optical flow meters for long-term monitoring of the fluid circulation in the geothermal system.

Special emphasis should be plain on the interface between energy piles and building. It has proved suitable to collect the absorber pipes leading away from the pile heads to the header block in special boxes in order to minimise the openings through foundation rafts. Sealing with resin is also required then.”

(COFOGE 2007) : Les tubes échangeurs de chaleur doivent permettre un échange thermique facile avec le terrain. En effet, une résistance thermique accrue de l'échangeur (exprimée en K/Wm) dans le sol conduira à une augmentation de l'écart de température entre évaporateur et condenseur de la pompe à chaleur, et donc à une chute du rendement thermique de l'ensemble. Il serait donc théoriquement souhaitable de mettre un grand nombre de tubes sur la périphérie des pieux. Mais, pour des raisons de faisabilité technique, le nombre et la dimension des tubes doivent être limités.

Une analyse plus approfondie, menée par ailleurs, nous amène à considérer la mise en place de tubes PEHD de diamètre 25/32, en forme de U :

- pour des pieux de 30 à 50 cm : 2 tubes en U
- pour des pieux de 50 à 80 cm : 3 tubes en U
- pour des pieux > 80 cm : 4 tubes en U

L'incidence de la mise en place de ces tubes dépendra en grande partie du mode de réalisation des pieux.

b) Prefab palen (TNO 2003)

Tijdens de fabricage van de paal (prefab) zijn twee afzonderlijke PE-lussen aan de vier voorgespannen wapeningskabels in de hoeken van de paal gevlochten. De twee lussen kruisen elkaar onder in de paalpunt. De uiteinden van de twee lussen worden aan één zijde van de paal uit de paal gevoerd (uittredepunt). In een later stadium worden de twee lussen aangesloten op het hydraulisch systeem. Onder het uittredepunt wordt een stalen beschermingsprofiel aangebracht die de slangen tijdens het heien beschermen.

Doordat bij heipalen de uittredehoogte van de slangen vastligt, is bij het gebruik van dit type energiepalen de fijnmazigheid van de sonderingsmetingen heel belangrijk. Het heien moet ook nauwkeuriger worden uitgevoerd dan bij normale palen door het risico van beschadiging van de slangen.

Meer praktische aspecten (heiplan, bepaling uittredepunt van de slangen uit de energiepalen, werktekeningen, horizontaal slangensysteem, en hydraulische koppeling) zijn gedetailleerd in TNO (2003).

In Frankrijk worden ook holle prefab betonpalen gebruikt (COFOGE 2007).

COFOGE (2007) : La Figure 4 montre l'exemple de l'équipement de tubes dans des pieux préfabriqués creux. La mise en place pose peu de problèmes dans ce cas. Les tubes doivent être suffisamment lestés à la base pour éviter la remonté du tube lors de la mise en place du coulis de scellement. A signaler que dans ce cas les tubes sont positionnés dans l'axe des pieux, ce qui constitue un handicap à un bon échange de chaleur avec le terrain environnant.



Figuur 4 : Installation de tubes PEHD dans Pieux Préfabriqués creux (source : www.zent-frenger.de)

c) Boorpalen - Baretten (SIA 2005, COFOGE 2007, Banks 2009)

Met een geothermische fundering dient de wapeningskorf van bijkomende slangen (warmtewisselaars) voorzien te zijn. Dat veroorzaakt een additionele moeilijkheid voor het storten van het beton. Daarom moeten de eigenschappen van het beton tot het einde van de uitvoering van de paal zeer goed gecontroleerd worden. Figuur 5b toont een paalkop van 300mm diameter, voorzien met 2 U-buizen met een interne diameter van 25mm. Na uitvoering van de paal wordt een test gedaan om de waterdichtheid (en integriteit) van de U-buizen te controleren.



Figuur 5a : a) Wapeningskorven voorzien met slangen (bron : www.zent-frenger.de) geboorde/schroefpalen en b) Wapeningskorf met slangen voor panelen (brone : Stent – Balfour Beatty) (COFOGE 2007)



Remplissage à l'eau, et mise en pression des tubes

Figuur 5b : Geboorde (CFA) palen met warmtewisselaars (bron : Soléhanche Bachy) (COFOGE 2007)

d) Stalen buispalen (Uotinen et al. 2012)

Volgens Uotinin et al. (2012) vormen de energiepalen een nieuw toepassing voor stalen buispalen in Scandinavia. Beide geheid en geboorde stalen palen zijn geschikt zonder opmerkelijke wijziging in paal componenten en uitvoering van de paal.

"Steel pipe piles are very suitable to use as energy piles because installation of the heat collecting pipes into the pile due to hollow structure of the pile is easy. Another benefit is that steel has a good thermal conductivity which reduces the thermal resistance of energy pile. Steel pipe piles can be driven or drilled piles. With modern and small diameter heat collecting pipes even piles with outer diameter 88.9 mm (RR90) can be used as an energy pile. For small diameter < 300 mm steel pipe piles the only modification is to enable installation of collecting pipes through bearing plates. With larger diameter steel pipe piles or piles without bearing plate, there is no difference between normal foundation pile and energy pile. Mechanical pile splices, rock shoes in driven piles and casing shoes / ring bits in drilled piles are exactly the same than normally and installation is executed in a normal way. Steel pipe piles which will be reinforced with reinforcement bars or cages can be equipped with heat collecting pipes attached to reinforcement."

One interesting energy pile application is a combination of geothermal well and drilled foundation pile, a hybrid energy pile. Geothermal well can be drilled with rock drill equipment through the bottom of the pile into desired depth. Minimum diameter which can be used as a hybrid energy pile can be 168.3 mm or 219.1 mm, which depends on casing shoe/ring bit dimensions and diameter of geothermal well. Drilled pile acts as a normal end-bearing pile and can also utilize heat energy stored in soil layers and at the same time geothermal wells can be located under the building. Demanding soil conditions and underlaying bedrock can be utilized in efficient way even in very narrow plots."

According to modellings in Nordic soil conditions, suitable minimum distance between piles should be 4 - 5 meters. (...) Pile length should be at least 10 meters or advisably at least 15 meters. With shorter piles, exploitable energy amount remains too low level.

Despite that initial soil temperature is low there are potentials to utilize steel piles as energy piles even in cold climate region like Finland. When pile lengths are 15 meters or more, building has well balanced cooling heating ratio, energy consumption of the building is low due to good thermal insulation and HVAC-system it's possible to obtain renewable energy from ground cost efficiently with steel piles." (Uotinin et al. 2012)

e) CFA palen (ARUP 2005)

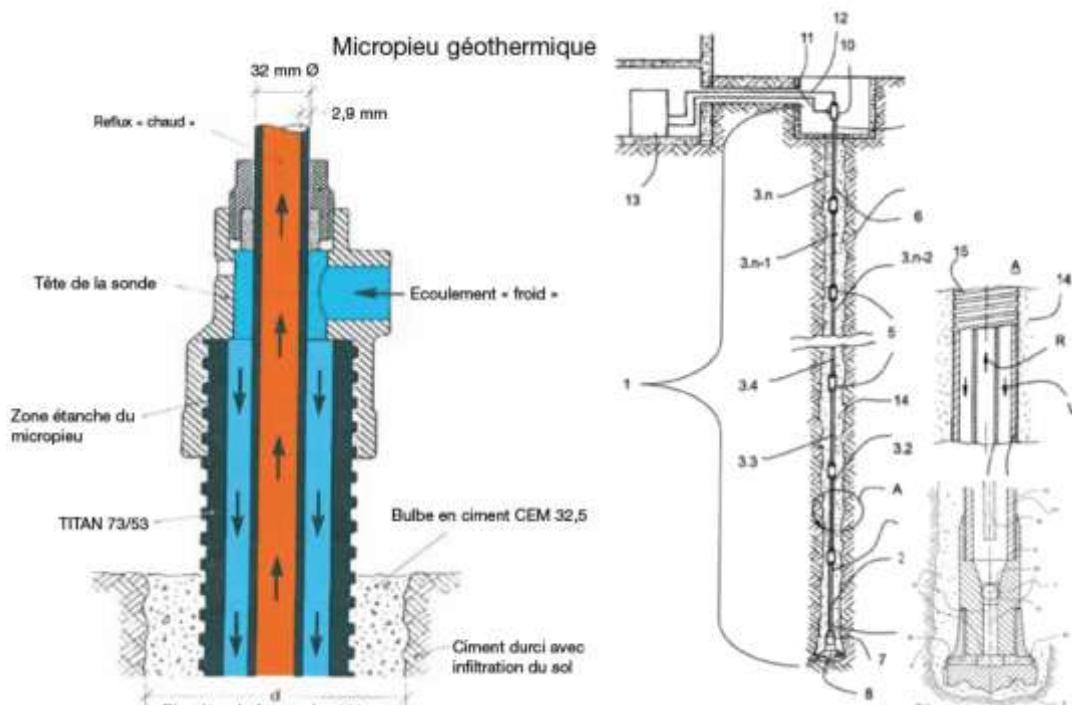
Volgens Arup (2005) hebben proeven met Continuous flight Auger (CFA) palen aangetoond dat:

- Meer proeven nuttig zijn om meer ervaring met dit type paal te krijgen
- Het plaatsen van de slangen tot grote dieptes (>20m) is (voorlopig) niet mogelijk in CFA palen

f) Andere toepassingen in geostructuren

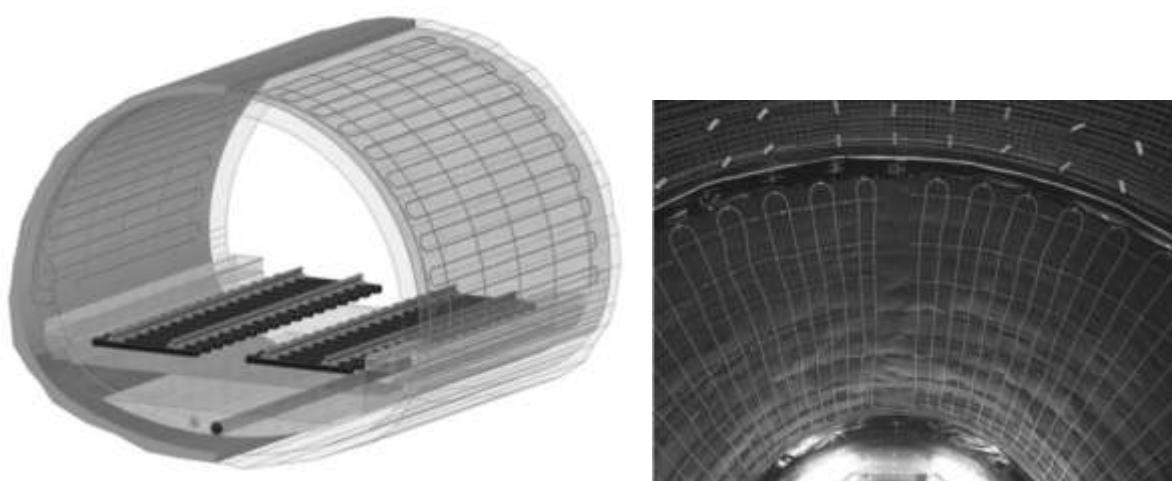
Recent ziet men ook andere toepassingen op de markt verschijnen waarbij warmtewisselaars in geostructuren worden geïntegreerd. Voorbeelden daarvan zijn:

- Toepassingen in beschoeiingswanden (palenwanden en diepwanden)
- Micropaalssystemen met zelfborende stangen (cfr. Ischebeck gepatenteerd systeem, Figuur 6a)



Figuur 6a. Ischebeck systeem (EP 2 060 860 A2)

- *Integratie van warmtewisselaars in tunnels en/of prefab-tunnelelementen. Deze toepassingen bevinden zich echter nog in een experimentele fase (figuur 6b)*



Figuur 6b. Test zone Fasanenhofftunnel (DE° - Schneider et al 2011)

7.2.2. Warmtetransportmedium

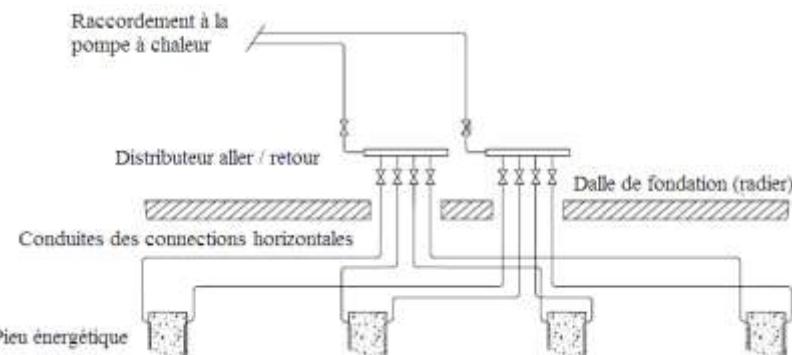
De aanvoertemperatuur naar het energiepalensysteem wordt begrensd om ijsvorming op het oppervlak van de energiepaal te vermijden (om de bouwkundige functie te garanderen, vooral in het geval de draagkracht op kleef berust). Doordat het verschil tussen aanvoer- en retourtemperatuur normaal gesproken ca. 4K is, dient de aanvoertemperatuur begrensd te worden op -2°C voor de levering van relatief korte piekvermogens, en op 0°C voor periodes van meer dan ca. 12 uur (TNO, 2003). De toevoeging van een antivriesmiddel (bij voorkeur propyleenglycol) is ook noodzakelijk om beschadiging van de verdamper te voorkomen.

De maximale mediumaanvoertemperatuur naar het energiepalensysteem wordt bepaald om lekkage aan de HDPE drukleidingen te voorkomen (temperaturen hoger dan 35 à 40°C zullen normaal gesproken niet voorkomen, zie TNO 2003).

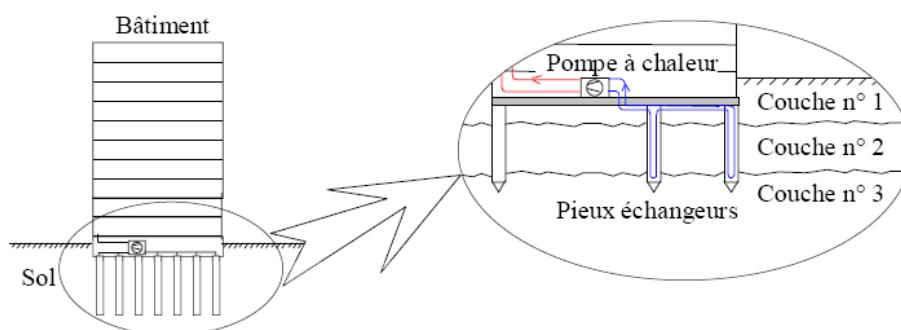
"Some guidelines recommend creation of turbulent flow in the absorber pipes. However, in the case of longer heat extraction (or storage) the critical point is not the heat transfer but the quantity of heat energy economically extracted from or stored in the surrounding soil. High performance pumps, required to create turbulent conditions would therefore reduce the seasonal performance factor (SPF) of the overall geothermal system" (Banks, 2009).

7.2.3. Integratie in het gebouw (TNO 2003, COFOGE 2007)

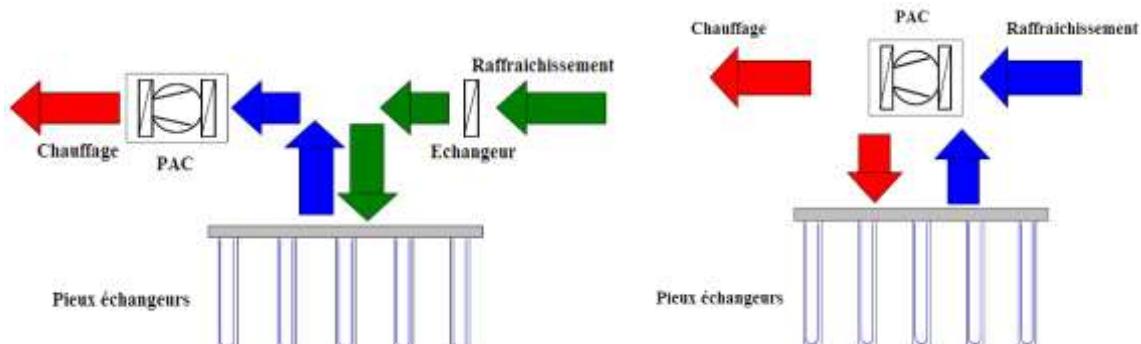
De koppeling van de energiepalen met de warmtepomp is beschreven in TNO (2003) en COFOGE (2007) en geïllustreerd in Figuren 7 tot 9.



Figuur 7 : Illustratie van horizontale aansluitingen tussen de palen en de warmtepomp



Figuur 8 : Illustratie van energiepalen voor de verwarming van een gebouw



Figuur 9 : a) Gebruik van energiepalen voor directe koeling en b) Gebruik van energiepalen voor actieve koeling

« Le rafraîchissement est réalisé de deux manières différentes : rafraîchissement direct ou avec une machine de refroidissement. Le rafraîchissement direct consiste à relier le circuit des pieux au circuit de distribution de froid »

par un échangeur de chaleur conventionnel. Ceci exige que les besoins de rafraîchissement puissent être satisfaits par une température relativement élevée (16 à 20 °C). Si on doit extraire l'humidité de l'air par refroidissement, une autre machine frigorifique doit être utilisée pour les plus faibles températures. Dans ce cas aussi, un système de refroidissement "bivalent" est le meilleur compromis. Il est possible aussi de combiner les deux modes de refroidissement. On peut alors échanger entre refroidissement direct et actif selon le besoin. Mais cette solution n'est pas conseillée car le contrôle du système devient de plus en plus compliqué et le gain en rendement n'est pas assez important. De plus, il est déconseillé d'utiliser une partie des pieux avec une machine frigorifique et l'autre moitié pour le rafraîchissement direct. La totalité des pieux doit être connectée à une pompe à chaleur, à une machine frigorifique (refroidissement actif) ou bien au circuit de distribution de froid par un échangeur de chaleur conventionnel (refroidissement direct). Si un écoulement d'eau dans le sous-sol est présent et suffisamment important, une régénération naturelle du sol est réalisée. En conséquence, la quantité de chaleur extraite en hiver (pour le chauffage), ne dépend plus de la quantité injectée en été (pour le refroidissement). Un stockage saisonnier de chaleur n'est plus nécessaire et le système des pieux peut être alors conçu pour le refroidissement ou le chauffage. » (COFOGE 2007)

7.2.4. Andere aspecten

- Om belastingsverschillen tussen energiepalen te vermijden is het onderling balanceren van de paalgroepen noodzakelijk (zie TNO 2003).
- Om beschadiging (lekkage) aan de HDPE drukleidingen te voorkomen, dient de maximale druk binnen het energiepalensysteem te worden beperkt (meestal op 3 bar tot de atmosferische druk, TNO 2003).

7.3. Dimensioneren

7.3.1. Globale haalbaarheid

De geschikbaarheid van de ondergrond voor het toepassen van energiepalen hangt vooral af van de bodemopbouw en van eventuele grondwaterstromingen, energieopslag (aquifer) of aangrenzende bodemwarmtesystemen in de nabije omgeving.

Volgens TNO (2003) is het aan te bevelen rekening te houden met de volgende uitgangspunten:

- Laagst toelaatbare mediumtemperatuur: 0 °C (gemiddelde van aanvoer en retour bij een verschil van 3 tot 4 K; de laagst toelaatbare aanvoertemperatuur van de warmtepomp-verdamper naar de energiepalen bedraagt dus -2 °C, bij een retourtemperatuur van +1 tot +2 °C).
- Hoogst toelaatbare mediumtemperatuur: +35 °C; let hierbij op de toe te passen drukklasse van de kunststof buizen (meestal MDPE of HDPE).
- Pompvermogen bodemsysteem bedraagt maximaal 2 tot 4% van bodempiekvermogen; de pompvermogens verlagen de COP van de warmtepomp met ca. 5 tot 10% .
- Bij variabel of meertraps warmtepomp-vermogen toerengeregelde bodempomp toepassen; regelen op constante dT van 3-4 K bij warmte-onttrekking en passieve koeling en 6-8 K bij actieve koeling (toevoer condensorwarmte aan de bodem).
- Bij voorkeur mono-propyleenglycol als antivries toepassen; vermijd het gebruik van giftige antivriesmiddelen zoals ethyleen-glycol.

7.3.2. Vuistregels

TNO (2003) stelt voor specifieke waarden voor de warmtevraag op basis van het bruto vloeroppervlak en voor nieuwbouw kantoren:

	Vermogen W/m ² b.v.o. (*)	Behoefte kWh/m ² b.v.o. per jaar
Ontwerp (excl. opwarmtoeslag)	25-40	
Netto (na aftrek interne warmtelast)	15-30	20-40

(*) b.v.o. = bruto vloeroppervlak; het gebruiksvloeroppervlak (A_g) zoals gedefinieerd in de EPN is normaliter 90 tot 95% van het b.v.o.

Deze waarden zijn natuurlijk ter indicatie en hangen af van de specifieke omstandigheden. Voor gebouwen die volgens de minimale eisen zijn geïsoleerd ($R_c = 2,5 \text{ Km}^2/\text{W}$) gelden bv. tabelwaarden die ca. 50% hoger liggen. Voor vertaling naar de warmtevraag aan het bodemsysteem en met een warmtepomp met COP=5 dienen deze waarden met 0,8 te worden vermenigvuldigd.

TNO (2003) stelt ook voor de volgende globale uitgangspunten:

- Specifiek maximum vermogen van de energiepalen: 30 W/m tot 35 W/m,
- Lengte van energiepalen (15 - 25 m, afhankelijk van opgave door constructeur),
- Onderlinge afstand van de energiepalen: neem gemiddeld minimaal 3,5 m (10 tot 12 m²) per energiepaal. Indien er meer heipalen zijn, dienen de overige palen niet geactiveerd te worden.

Typische waarden worden ook door SIA (2005) en Banks (2009) aangegeven.

Exploitatievorm van de geproduceerde energie, temperatuurniveaus en thermische vermogen overdracht per lengte-eenheid. (SIA 2005)

Exploitatievorm	Temperatuurniveau (in de paal)	Vermogen per lengte-eenheid	Gebruikerstemperatuur
Free-cooling	10 à 16°C	20 à 40 W/m	+12 à +20°C
Active koeling	25 à 35°C	50 à 100 W/m	+8 à +12°C
Warmtepomp	2 à 15°C	40 à 60 W/m	+28 à +45°C

(*) groteerde ≠ ontwerwaarden

(Banks 2009): For general feasibility studies/pre-design, the following assumptions can be made regarding the

energy volume that can be extracted:

- *Pile foundations with piles D = 0.3 to 0.5 m: 40 to 60 W/m run*
- *Pile foundations with piles D ≥ 0,6 m: 35 W/m² earth-contact area*
- *Diaphragm walls, pile walls (fully embedding the soil): 30 W/m² earth-contact area*
- *Base slabs: 10 to 30 W/m².*

Rekenvoorbeeld (TNO, 2003)

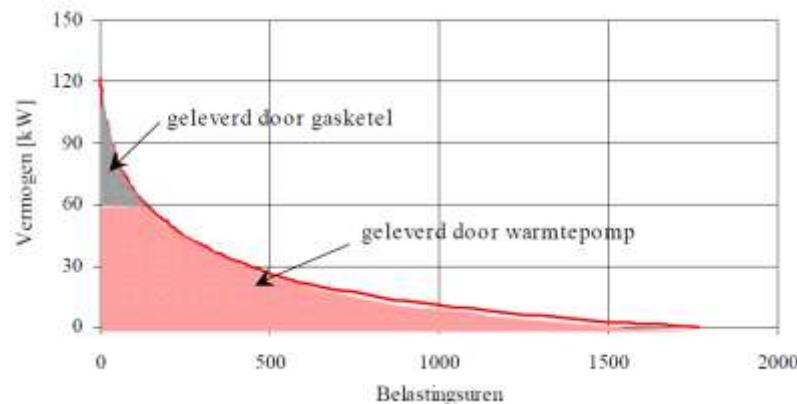
– Uitgangspunten:

- Kantoor: langgerekt gebouw, goede isolatie (meer dan minimaal vereist), bruto vloer oppervlak 3000 m²
- Footprint. of stempeloppervlak: ca. 1000 m²
- De warmtepomp dient ca. 50% van het maximum vermogen te leveren.
- Ontwerpvermogen voor verwarming ca. 40 W/m² (120 kW), en netto maximum vermogen ca. 30 W/m² (90 kW).
- De warmtepomp dient 50% aan het gebouw te leveren; het aan de bodem te onttrekken vermogen is dan $45 * 0,8 = 36$ kW.
- Bij een specifiek vermogen van 30 W/m is dan 1200m lengte aan energiepalen nodig. Bij een bruto paallengte van 22 m is de effectieve energiepaallengte ca. 20 m. Er zijn dus 60 energiepalen nodig.
- Bij gelijkmatige verdeling over de footprint van het gebouw is 17 m² per energiepaal beschikbaar.
- Dit is meer dan het minimum van 10 . 12 m² per energiepaal.

Conclusie uit deze eerste benadering:

het is technisch mogelijk met een energiepalensysteem (en een warmtepomp) ca. 50% van de piek vraag voor verwarming te verzorgen; daarmee kan normaal gesproken ruim 90% van de jaarlijkse behoefte worden gedekt (zie figuur onderaan).

Jaarbelasting-duur kromme



7.3.3. Dimensionering

De thermische prestaties van energiepalen hangen af van een groot aantal parameters. De belangrijkste zijn (CFOGE 2007) :

- De geologische en hydrogeologische omstandigheden
- De ontrokken en geïnjecteerde vermogens
- De bijkomende thermische overdracht die onder het gebouw gegenereerd worden (isolatie noodzakelijk of niet)
- De thermische behoeften
- De temperatuurniveaus voor verdeling van koude en warmte
- De verspreiding en geometrie van geothermische funderingen

Alle deze factoren dienen in rekening genomen te worden om het aantal, lengte en configuratie van de geothermische funderingen te bepalen en voor het ontwerp van de warmtepomp (en eventuele koelmachine).

Het ontwerp is bepaald door de toegelaten temperatuurwisselingen van de stromende vloeistof (in de funderingen). Deze temperatuurwisselingen hangen af van korte (integratie in het systeem, ontwerp van de warmtepomp/koelingmachine) en lange (thermische overbelasting van het terrein) termijneffecten. De lange termijneffecten (zonder belangrijke grondwaterstroming en voor een gegeven configuratie van het systeem : aantal, lengte en geometrie van de funderingen) zijn vooral bepaald door het jaarlijkse evenwicht tussen ontrokken en geïnjecteerde warmte.

De moeilijkheid bestaat in de optimalisatie van het systeem, terwijl tegelijkertijd voldoende flexibiliteit om bedrijfsondernemingen of parameters die kunnen afwijken van de ontwerpwaarden tegemoet te komen. Daarom zijn simulaties die het mogelijk maken om de gevoeligheid ten opzichte van de parameters te evalueren, zeer nuttig.

7.3.3.1. Stappenplan van TNO (2003)

Stap1: Bepaal de netto warmte en koude vraag van het gebouw (ISSO-53: warmteverliesberekening kantoren, QuickScan Warmtepompen Utiliteit platform)

- Maximaal netto warmtevermogen (kW)
- Warmtebehoefte van het gebouw (kWh)
- Koudebehoefte van het gebouw (kWh); vooral de hoeveelheid warmte die tijdens koelbedrijf wordt teruggebracht in de bodem (regeneratie) is van belang.

Van essentieel belang is dat in de bepaling de volgende invloeden zijn meegenomen:

- Bouwkundige gegevens: afmetingen, R_c -waarden (isolatie), q_{v-10} waarde (kierdichting), Glasaandeel, Zonwering
- Gebruikswijze: Bedrijfstijden, Comforteisen (Temperaturen, Ventilatie, Vochtigheid), Personele bezetting, Verlichting, Apparatuur, Warmwater (woning)

Equivalenten vollasturen [h/a] zijn gegeven door: Warmtebehoefte [kWh/a] / Maximaal vermogen [kW]. Voor een extra goed (beter dan de minimale eisen) geïsoleerd kantoorgebouw onder normale gebruiksomstandigheden, zal het aantal EQ vollasturen (gerelateerd aan het werkelijke netto maximum vermogen) 1400 tot 1600 per jaar bedragen.

Stap 2: bepaal de totaal **beschikbare** lengte aan energiepalen.

Als eerste uitgangspunt kan ca. 25 m² grondoppervlak per energiepaal worden gehanteerd wanneer alleen warmte aan de bodem wordt ontrokken. Bij regeneratie kan gerekend worden met 10 tot 12 m² grondoppervlak per energiepaal. De totaal beschikbare lengte is de netto paallengte (bruto paallengte minus 2 m) maal het aantal geactiveerde heipalen

Stap 3: bepaal de totaal **benodigde** lengte

Het bodemvermogen (warmteleverend door de energiepalen) is gegeven door het gebouwvermogen maal f_{COP} (in verwarmingsbedrijf) waarbij $f_{COP} = P_{bodem}/P_{gebouw} = (COP-1)/COP$ (voor de verwarmingsituatie). Indien nog geen warmtepompgegevens bekend zijn, ga dan veiligheidshalve uit van $f_{COP} = 0,8$ (in de praktijk worden daadwerkelijk COPs van 5 gerealiseerd). De richtwaarden in onderstaande Tabel (indicatieve waarden, gebaseerd op berekeningen met het programma EED; nauwkeurigheid van +/- 20%) gelden voor warmteonttrekking en corresponderen met:

- **Monovalent** (ca. 1400 eq. vollasturen): $P_{bodem} = f_{COP} * P_{gebouw}$;
- **Bivalent 50%** (ca. 2750 eq. vollasturen): de warmtepomp levert 50% van het verwarmingsvermogen
- **Bivalent 25%** (ca. 4400 eq. vollasturen): de warmtepomp levert 25% van het verwarmingsvermogen;
- **Geen regeneratie**: er wordt alleen warmte aan de bodem onttrokken.
- **Volledige regeneratie**: alle onttrokken warmte (MWh) wordt op gecontroleerde wijze (middels actieve en/of passieve gebouwkoeling en/of zonnewarmte) teruggevoerd in de bodem. Bij gedeeltelijke regeneratie kan (middels lineaire interpolatie) een tussenliggende waarde voor het specifieke vermogen worden aangehouden.

Situaties waarbij het specifieke vermogen is <15 à 20 W/m zullen slechts in uitzonderlijke gevallen interessant zijn. Voor passieve koeling gelden ongeveer dezelfde waarden (met name afhankelijk van de temperatuur van het gekoeld water systeem). Voor actieve koeling gelden tot 1,5 à 2 maal hogere waarden.

Stap 4: Corrigeer voor de bodemsoort. De getallen in de tabel gelden voor een gemiddelde bodem zoals deze in Nederland veel voorkomt: een mengsel van klei en zand met een grondwaterstand vlak onder het maaiveld. Er is hierbij uitgegaan van gemiddelde waarden voor de warmtegeleiding en capaciteit van respectievelijk 1,8 W/m.K en 2,2 MJ m⁻³ K⁻¹. Het effect van de bodemsoort op de prestaties is hoger naar mate minder regeneratie plaatsvindt. Bij toepassing in volledige zandgrond zullen de specifieke vermogens iets hoger zijn (tot ca. 20% hoger): tabelwaarden vermenigvuldigen met 1,1 à 1,2. In pure kleigrond zijn de specifieke vermogens iets lager (tot ca. 15% lager): tabelwaarden vermenigvuldigen met 0,8 à 0,9. In pure veengrond zijn de specifieke vermogens echter veel lager (tot ca. 65% lager): tabelwaarden vermenigvuldigen met 0,35 à 0,5. Hier is toepassing van energiepalen in het algemeen niet aan te bevelen.

Stap 5: Beoordeel of de *benodigde* lengte kleiner of gelijk is aan de *beschikbare* lengte van de heipalen (volgend uit constructie berekeningen). Indien dat niet het geval is, kies dan een andere bedrijfsvoering (met een lager specifiek vermogen), opstellingsvorm of vergroot de tussenafstand en herhaal de berekening vanaf stap 2.

Globale specifieke piekvermogens energiepalen

Piekvermogen [W/m]					
T-toelaatbaar = 0 °C		Gevulde matrix		Rand (open rechthoek)	
Opstelling		5 m	3,5 m	5 m	3,5 m
Tussenafstand energiepalen	Geen regeneratie	29	24	34	31
	Bivalent 50%	17	(13)	23	20
	Bivalent 25%	(11)	(9)	17	(15)
Volledige regeneratie	Monovalent	50	50	50	50
	Bivalent 50%	31	28	32	29
	Bivalent 25%	24	21	25	24

T-toelaatbaar is het gemiddelde van aanvoer en retourtemperatuur, waarbij het verschil tussen aanvoer en retour temperatuur 3 K bedraagt.

In Bijlage 2 is een rekenvoorbeeld volgens dit stappenplan opgenomen.

7.3.3.2. Thermisch gedrag van energiepalen

Het vermogen (P) dat men kan uit of naar de grond overdragen is gegeven door (in stationair regime):

$$P = \frac{n \cdot H}{R_b + R_g} \cdot (T_f - T_m)$$

met n het aantal energiepalen, H [m] de actieve lengte van de energiepalen, T_f [K] de gemiddelde temperatuur van de in de paal stromende vloeistof, T_m [K] de gemiddelde temperatuur in de grond (in de ΔT invloedszone), R_g [K/(W/m)] de thermische grondweerstand onder stationaire stroming, en R_b [K/(W/m)] de thermische weerstand van de paal.

SIA (2005)

R_b : Dépend du type de pieu, de son diamètre, du nombre et de la disposition des tubes dans le pieu, du régime d'écoulement du fluide dans les tubes, de la conductivité thermique des matériaux utilisés, etc. A la résistance thermique du pieu, il faut ajouter la résistance thermique de la couronne de terrain entre le bord du pieu et le rayon commun (rayon du pieu le plus épais) qui est donnée pour un transport de chaleur par conduction pure dans le terrain par : $R_{anneau} = \frac{1}{2\pi\lambda} \cdot \ln\left(\frac{r_0}{r_i}\right)$ avec r_0 le rayon du pieu le plus épais, et r_i le rayon du pieu considéré (voir Figures 10 et 11)

⇒ Avantage évident à avoir des pieux de grand diamètre et tubes placés régulièrement sur le pourtour d'un pieu. Pour les pieux massifs, la résistance thermique dépend essentiellement du nombre de tubes en U (≤ 4).

Résistance thermique interne R_a : permet d'évaluer les effets défavorables des transferts de chaleur internes dans le pieu : pour une extraction de chaleur donnée, le fluide caloporteur qui ressort du pieu est refroidi par le fluide à température plus basse qui retourne dans le pieu.

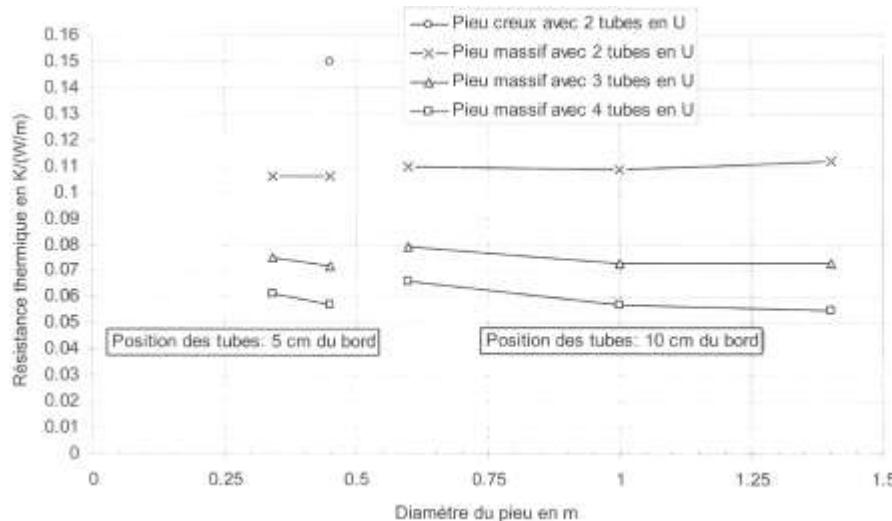
Type de pieu (diamètre de 30 à 130cm)	R_b [K/(W/m)]
Pieu creux équipé avec un double U	0.15
Pieu massif équipé avec un double U	0.10-0.11
Pieu massif équipé avec un triple U	0.07-0.08
Pieu massif équipé avec un quadruple U	0.06

Une estimation de R_g (voir Figure 12) peut être effectuée dans le cas où seul le mode de transfert de chaleur par conduction domine (valide en régime stationnaire : $t > t_{fs}$) :

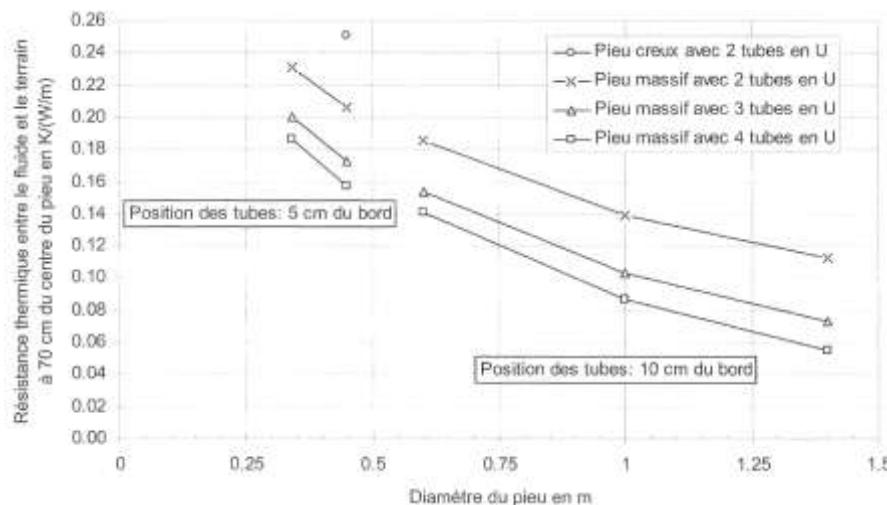
$$R_g = \frac{1}{2\pi\lambda} \cdot \left\{ \left[\frac{r_1^2}{r_1^2 - r_b^2} \right]^2 \cdot \ln\left(\frac{r_1}{r_b}\right) - \frac{3}{4} - \frac{r_b^2}{2 \cdot (r_1^2 - r_b^2)} \right\} \quad \text{et} \quad t_{fs} = 0.065 \cdot \frac{A_p}{a} [s]$$

- $r_1[m] = B/\sqrt{\pi}$ = rayon du volume de terrain associé au pieu (B = espacement moyen entre les pieux correspondant à un arrangement quadratique des pieux);
- r_b = rayon des pieux [m]
- t_{fs} = durée caractéristique de la période transitoire [s] (une quinzaine de jours pour des valeurs typique de a et B) – durée pendant laquelle la différence de température souhaitée doit être maintenue
- A_p = section du volume de terrain associé à 1 pieu [m^2] ($= B \cdot B$)
- a = diffusivité thermique du terrain [m^2/s]

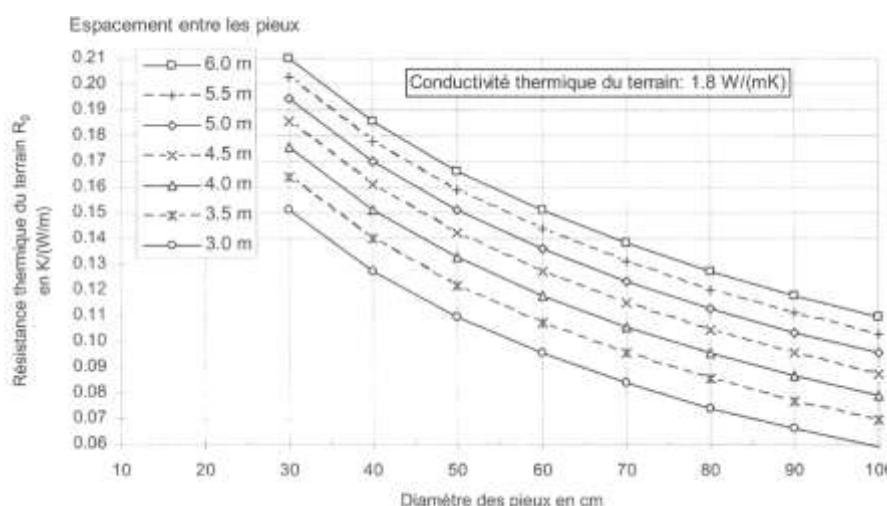
Le flux d'extraction peut être plus intense s'il est entrecoupé de périodes de repos. Dans le cas où un écoulement d'eau souterraine permet de régénérer « instantanément » l'énergie prélevée dans le terrain, R_g devient négligeable.



Figuur 10. Thermische weerstand van beton palen van 34cm (30 x 30 cm), 45 cm (40 x 40 cm), 60 cm, 100 cm en 140 cm diameter. Voor elke paal wordt een dubbel-U, Pour chaque pieu, un 2-U, 3-U en 4-U systeem berekenen (SIA 2005)



Figuur 11. Thermische weerstand van beton palen met verschillende diameters, op een afstand van 70cm (met inbegrepen het invloed van het terrein voor kleinere paaldiameters) (SIA 2005)



Figuur 12. Thermische weerstand van het terrein (R_g) voor een aantal energiepalen in het terrein met een thermische geleidbaarheid van 1,8 $W/(mK)$ – in functie van de paal diameter en gemiddelde afstand tussen palen (SIA 2005)

"The heat that can be extracted from/stored in the ground depends on the maximum possible heat flux density in the absorber pipe system. There, the heat transport occurs by forced convection of the fluid. In order to optimise the absorber pipe system, the following parameters have to be considered (Banks, 2009):

- Diameter and length of pipes;
- Properties of pipe wall (roughness);
- Heat conductivity, specific heat capacity, density and viscosity of fluid circulating in absorber pipes;
- Flow velocity and flow conditions (laminar/turbulent) within absorber pipes."

COFOGE 2007: La durée de la période transitoire est estimée par la relation (Hellström, 1991) :

$$t_{fs} = 0.0065 \frac{A_p}{a}$$

t_{fs} durée caractéristique de la période transitoire en s, A_p section du volume associé à un pieu en m^2 (pour un espace quadratique B , $A_p = B \cdot B$), a diffusivité thermique du terrain en m^2/s . Pour des valeurs typiques ($a = 0,8 \cdot 10^{-6} m^2/s$ et $B = 4 m$), la période transitoire dure une quinzaine de jours.

Specifieke opslagcapaciteit

Voor een aantal palen is de specifieke opslagcapaciteit C_{sp} [J/K] gelijk aan de hoeveelheid energie die nuttig is om het geassocieerde volume van terrein met 1 K te verwarmen (SIA D0190, 2005) :

$$C_{sp} = C_v H S \quad \text{en} \quad Q = C_{sp} \cdot \Delta T_m$$

Met C_v de gemiddelde volumetrische opslagcapaciteit van het terrein [J/m^3K], H de gemiddelde actieve lengte van de energiepalen [m] en S de horizontale oppervlakte van het betreffende terrein [m^2] (bepaald door de perimeter rond de energiepalen, getekend op ongeveer half tussenafstand van de palen aan de buitenkant), Q de ontrokken thermische energie door de energiepalen [J] en ΔT_m : gemiddelde temperatuurafname van het terrein in de paalzone. Wanneer de palen gelijkmataig geplaatst worden, is deze raming van de opslagcapaciteit voldoende. Deze kan echter te optimistisch zijn in het geval van palen met variabele tussenafstanden.

7.3.3.3. Mechanisch gedrag van energiepalen

Volgens TNO (2003) en Brandl (2009) blijft de draagkracht van de energiepaal behouden. Toch is de invloed van de temperatuur op het gedrag van de paal een onderzoeksonderwerp in veel landen.

Brandl (2009): Proper operation of thermo-active foundation systems does not affect the load capacity of piles or diaphragm walls during geothermal cycles (as already stated in Brandl, 1998). Hence, temperature-induced settlement or heave of buildings with such energy foundations is negligible in relation to displacements caused by static loads.

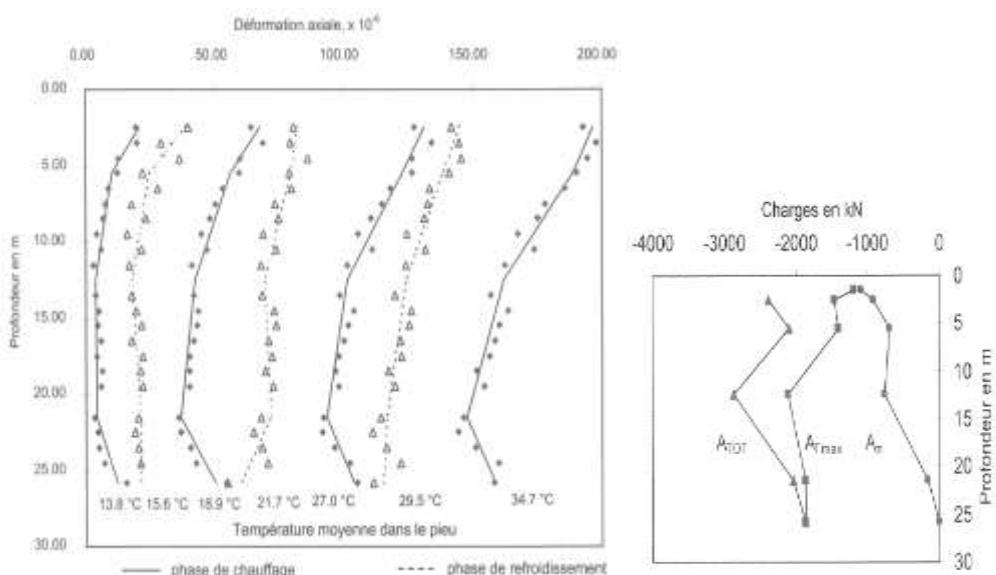
In Zwitserland (SIA 2005)

In Zwitserland werden een aantal proeven uitgevoerd (EPFL, Laloui 1999). Ze hebben aangetoond dat een verwarming van de paal een thermo-reversibele verlenging veroorzaakt die afhankelijk is van het type grond. Een deel van de thermische lengteverandering wordt door de structuur tegengegaan, en genereert een additionele belasting op de funderingen (spanningen evenredig aan de stijfheid).. De verlenging van de paal veroorzaakt een mobilisatie van de afschuivingkrachten op de paal-grond interface (grensvlak), in de tegenovergestelde richting aan die gegenereerd door de gebouwbelasting ()..

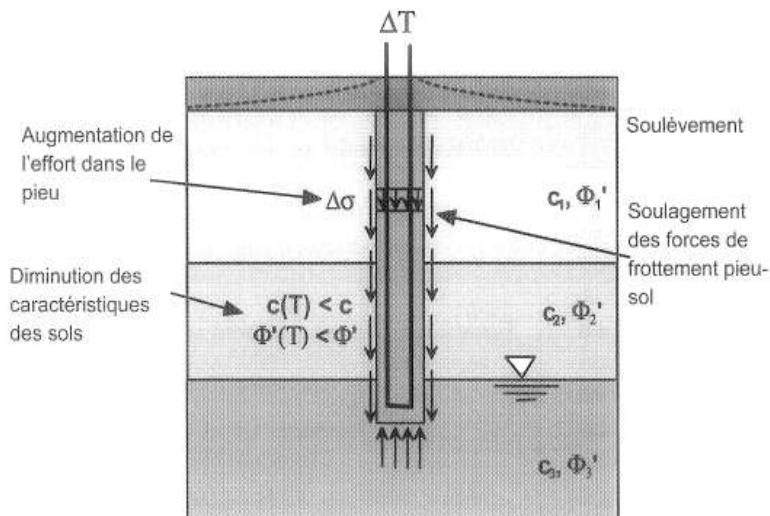
Daarenboven dient men ook in het geval van een maximale verwarming, de volgende aspecten te bestuderen:

- Het wijzigen van de mechanische eigenschappen op het grensvlak tussen de paal en het grond [Laloui 2001]
- De thermische radiale en longitudinale) vervormingen van de paal (risico voor differentiële zettingen wanneer een deel van de palen zonder warmtewisselaars blijft)
- In de koelfase, na een aanzienlijke temperatuurverhoging, bestaat het gevaar van een vermindering van de paalsectie in het radiale vlak die een loslating aan de paal-grond interface kan veroorzaken.

Over het algemeen zijn thermische effecten het meest merkbaar tijdens de eerste belastingscyclus (het eerste jaar van ingebruikname).



Figuur 14.a) Ontwikkeling van axiale vervormingen in de paal gedurende een verwarming-koeling cyclus (vrije verticale bewegingen van de paal) ; b) Mechanische belastingen (A_m), thermische (A_{Tmax}) en totale (A_{TOT}) belastingen in de paal op het einde van de constructie van een 5 verdieping gebouw (SIA 2005)

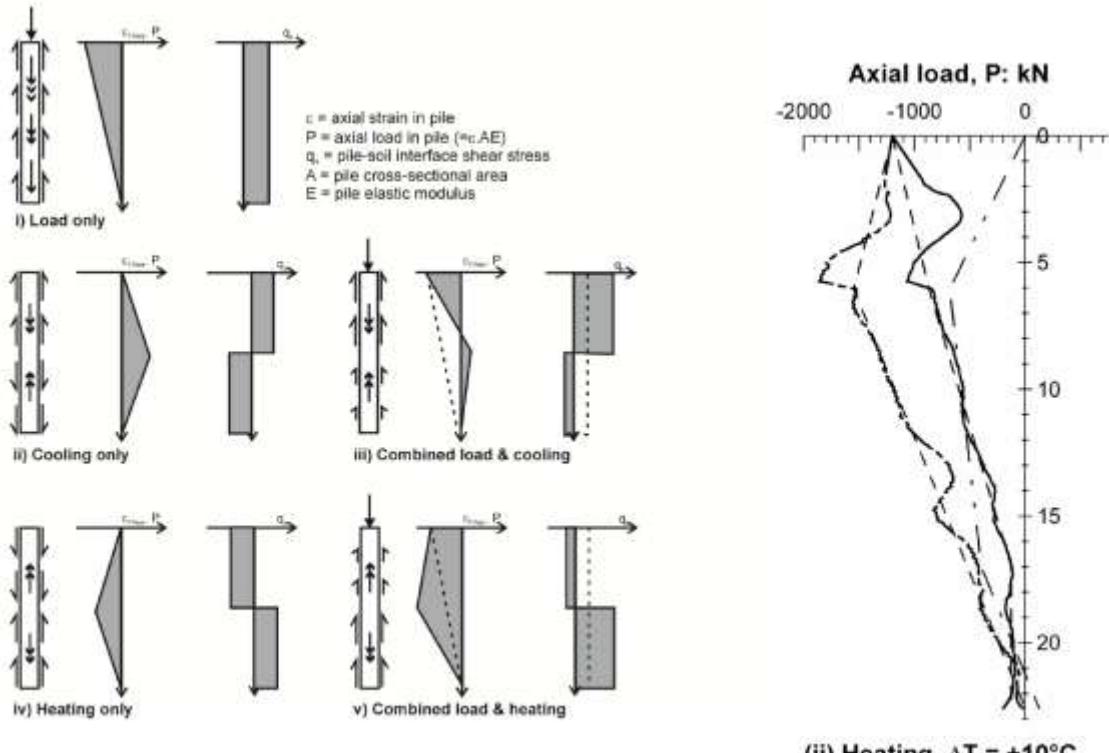


Figuur15a. Schematisering van de belangrijkste thermische effecten op een energiepaal (SIA 2005)

Une étude expérimentale de Laloui et al. (1999) a montré que pour une augmentation de température des pieux de 15 °C, la contrainte supplémentaire engendrée dans le pieu n'est pas négligeable. Elle devrait être prise en compte lors du dimensionnement statique du pieu. Toutefois une telle augmentation de la température du pieu implique de pouvoir chauffer le fluide caloporteur circulant dans les pieux à 40-50 °C, ce qui est déjà une situation extrême. Si du refroidissement direct est réalisé (température du fluide 16-20 °C) l'effet est beaucoup plus faible. (COFOGE 2007)

De principes van therm-mechanische belasting worden ook ge_illustreerd in figuur 15b.

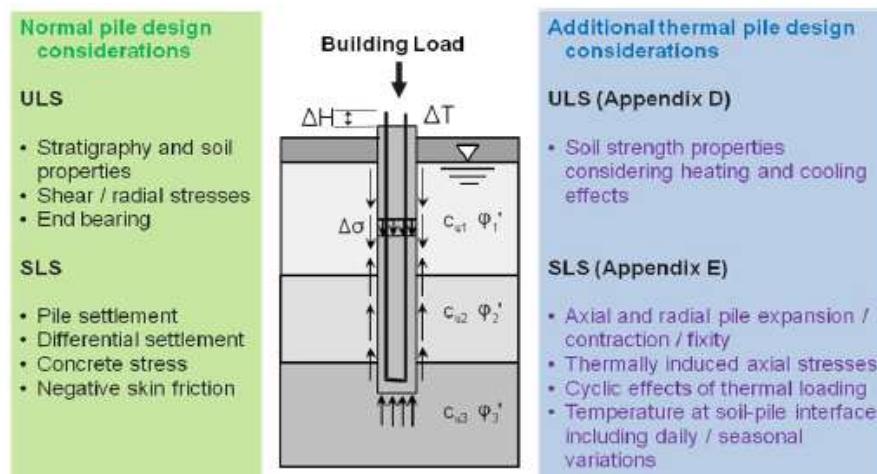
a) Heating & cooling with no end restraint, after Bourne-Webb et al (2009, in print)



Figuur15b. Schematisering van de belangrijkste thermische effecten op een energiepaal Bourne-Webb et al, 2009 – in print)

In UK (GSPH 2012)

De onderstaande figuur toont de bijkomende aspecten die beschouwd moeten zijn worden het ontwerp van energiepalen.



Figuur 16. Additional considerations for geotechnical design of thermal piles (GSPH 2012)

(GSHP 2012)

Thermal Effects on Soil Parameters and Pore Pressures: Heating non-cohesive soils around a thermal pile is not expected to have a negative effect; however, heating fine grained soils may change the soil properties such as preconsolidation pressure, stiffness and strength. The change in soil parameters, especially near the soil-pile interface, is not fully understood. However, excess porewater pressure is expected to develop by heating due to relatively large thermal expansion of pore fluid compared to the thermal expansion of soil skeleton. With time, consolidation and dissipation of the excess porewater pressure produced by heating the soil will occur and lead to an increase in soil strength. The effect on horizontal earth pressures and settlements should be considered. In pile design, normally consolidated fine grained soils are considered to apply negative skin friction to the pile design where changes in the loading to the soil will lead to further consolidation. When the soil is heated, the preconsolidation pressure is reduced, and additional settlements are generated, making it important to include the possible effect of negative skin friction in such soils. In heavily overconsolidated fine grained soils, the effect of preconsolidation reduction is small. The soil skeleton will tend to expand by heating and hence small heave movements are expected to occur.

ULS Design Considerations: At the ultimate limit state for externally applied loads, shaft friction on the soil-pile interface is fully mobilised along the full length of the pile in one direction only, and the base capacity is fully mobilised. For thermal piles, the thermal strains are small and are not expected to affect the ULS, which is typically assessed as when the pile has settled by 10% in a compression load test. The ultimate limit state must then be reassessed after considering the effects of heating and cooling on the soil parameters using the approach set out in current design standards such as partial factors e.g. BS EN 1997-1:2004 or a lumped factor of safety e.g. LDSA GN12. In normally consolidated soft clays, large settlements can occur due to applied and thermal loading. Appropriate allowance should be made for the settlements inducing negative skin friction (Q_n) on the piles. Methods of calculating the downdrag for applied loads are provided by Fellenius and Poulos. Similar methods for assessing thermally induced downdrag should be adopted in ULS calculations in soft clays.

SLS Design Considerations: The serviceability limit state should be assessed for the movements expected to occur under both externally applied and thermal loads. The thermal movements mobilise pile shaft friction and end bearing which can change the axial stresses in the pile and cause additional settlement due to the downdrag/negative skin friction effects. Also, the combined stress from the pile load and the thermal load should not exceed the maximum allowable material stress within the pile. The uniqueness of thermal stress effect is that, if the pile is constrained by the ends or by high shaft friction, the internal stress will be large but the settlement or heave will be small. If the pile is less constrained, the internal stress is small but the settlement or heave will be larger. If the thermal pile is responding in undrained conditions, the SLS can be assessed using conventional ratios of stiffness to undrained strength making allowance for the reduced undrained strength. If the thermal pile is responding in drained conditions, the SLS can be assessed using drained parameters and considering possible change in radial stress due to changes in soil properties. In overconsolidated clays the settlements are smaller and are incorporated into the SLS calculation of the building movements. The effect of thermal cyclic loading on the SLS should also be considered. Radial expansion and contraction of piles may occur due to heating and cooling, respectively. For large diameter piles, the radial displacements can be large. Hence, the radial soil stress acting on the pile may change, leading to change in shaft resistance characteristics.

Considerations beyond those for typical pile design include (refer to Appendix E for further details):

- Pile head fixity and thermal expansion / contraction movements of the pile both in axial and radial directions.
- Thermally induced axial stresses within the concrete in the piles.
- Cyclic effects of thermal loading.
- The temperature at the pile soil interface, including daily and seasonal variations, ensuring that the soil-pile interface does not freeze. It is difficult to assess the effects of ice wedging on shaft friction. Examples of ground freezing effects are described in Brandl.

Quantification of Thermal Effects: by computer model (see §7.3.4), Pile load test (A full scale instrumented pile tests can be carried out which combine static loading and the thermal response test, e.g. Amis et al. and Bourne-Webb et al. Alternatively the thermal response test could be carried out on a reaction pile for the load test.), Design charts (Empirical charts are provided in Appendix based on typical London Clay properties over the whole length of the pile using Oasys PILE and Cambridge energy piles software, calibrated first against results obtained from Lambeth College)

In Frankrijk (COFOGE 2007)

« Il sera nécessaire de vérifier que la transformation de fondations traditionnelles en fondations géothermiques n'aura pas de répercussions néfastes sur le comportement des fondations, leur capacité portante dans le temps ou leur durabilité, ou sur l'environnement. La présence de tubes échangeurs de chaleur dans l'élément de fondation entraînera inévitablement une diminution de la section utile de cet élément et il conviendra de vérifier que la section réduite est toujours en mesure de reprendre les sollicitations (sollicitations axiales, sollicitations de flexion) avec le respect des règles en vigueur (cf. documents normatifs relatifs à la justification des ouvrages). Le cas échéant, la section de l'élément de fondation devra être augmentée. La mise en place de tubes échangeurs de chaleur dans l'élément de fondation peut présenter certaines difficultés d'exécution et avoir des répercussions sur la qualité du matériau de l'élément de fondation. Cet aspect sera abordé plus en détail dans le paragraphe 4. L'entreprise spécialisée devra élaborer un mode opératoire, validé par des essais préliminaires, permettant de garantir que la mise en place n'a pas de répercussions préjudiciables sur la qualité du matériau de l'élément de fondation. En exploitation, les fondations géothermiques seront soumises à des variations de température qui sont inhabituelles pour les fondations classiques. Des températures extrêmes peuvent avoir des répercussions, soit sur le matériau constitutif des éléments de fondations, soit sur le sol environnant, ou au niveau du contact entre les deux. Des cycles saisonniers avec des passages en dessous de 0 °C peuvent avoir des effets négatifs sur des sols fins, la capacité portante des pieux de fondation dans ces sols et sur la pérennité du béton, si celui-ci n'est pas correctement conçu pour résister aux cycles de gel-dégel. Il paraît donc souhaitable d'imposer que la température du fluide caloporteur dans les tubes échangeurs de chaleur ne descende pas en-dessous de 0 °C. Dans le cas contraire, il conviendra de vérifier que la formation cyclique de gel ne peut pas avoir de conséquences préjudiciables. Des températures élevées peuvent avoir des répercussions sur le comportement de sols argileux au-dessus de la nappe phréatique. En effet, une température élevée peut entraîner une diminution de la teneur en eau et provoquer des phénomènes de retrait. Une étude spécifique est à réaliser si ce cas se présente. » (COFOGE 2007)

7.3.3.4. Lange termijn effecten

Zonder grondwaterstroming, houdt het gebruik van directe koeling t in dat men er op dient toe te zien dat de jaarlijkse bodemtemperatuur niet toeneemt door de jaren heen. Bijgevolg moet de jaarlijkse energie ontrokken door de palen hoger zijn dan die geïnjecteerd door directe koeling, om het warmteverlies van het gebouw te compenseren (~10% meer) (SIA, 2005).

« Certaines perturbations peuvent affecter plus ou moins, sur la durée, le comportement mécanique et thermique ou les fonctions de base du système. Ces perturbations peuvent être induites par deux types de processus dans le sous-sol: les processus naturels (fluctuations de l'écoulement régional, état hydrique de la zone non saturée, changement climatique, variation de la conductivité thermique avec la teneur en eau, etc.) et le fonctionnement de l'échangeur thermique souterrain (prélèvement thermique supérieur à la recharge naturelle, exploitation d'une recharge estivale, amplitude du refroidissement ou du réchauffement au voisinage de l'interface pieux-sol). Ces différentes perturbations potentielles sont globalement liées à la présence d'eau, à sa composition, et à sa réactivité vis-à-vis des matériaux » (COFOGE 2007)

7.3.4. Rekenprogramma's

Het onderstaande Tabel (uit TNO, 2003) geeft een overzicht van de belangrijkste programma's om energiepalen door te rekenen.

	Bodemtix	EED (Earth Energy Designer)	HST3D	TRNSYS ¹
Nume- riek e methode	Eindige volume methode	Quasi-analytisch	Eindige differentie	Eindige differentie
Model	<ul style="list-style-type: none"> - vrijheid geometrie - repeterende configu- raties mogelijk - gelaagdheid bodem - grondwaterstroming - vrijheid VBWW-type - vriestraject - buitenluchtcondities (temperatuur en zonstraling) per uur 	<ul style="list-style-type: none"> - 308 configuraties; max. 12x10 VBWW's - geen repeterend patroon - geen gelaagdheid bodem - geen grondwater- stroming - 4 typen VBWW's (1U, 2U, 3U, concentrisch) 	<ul style="list-style-type: none"> - vrijheid geometrie - repeterende configu- raties mogelijk - gelaagdheid bodem - grondwaterstroming - VBWW als 'lijnbron' 	<ul style="list-style-type: none"> - vrijheid geometrie - repeterende configu- raties mogelijk - geen gelaagdheid bodem - geen grondwater- stroming - vrijheid VBWW-type - buitentemperatuur per stap
Vraag- patroon	<ul style="list-style-type: none"> - Gevraagd vermogen per uur - begrenzing glycol- temperatuur mogelijk 	<ul style="list-style-type: none"> - basislast - pieklast 	<ul style="list-style-type: none"> - basislast - pieklast door super- positie 	<ul style="list-style-type: none"> - massastraal en intredetemperatuur
Uitvoer	<ul style="list-style-type: none"> - glycoltemperaturen (uurlijks/dagelijks) - dekkingspercentage - bodemtemperaturen (uurlijks/dagelijks) 	- VBWW-lengte 'glycol temperaturen'	- bodemtemperaturen	<ul style="list-style-type: none"> - mediumtemperatuur per stap - massastraal medium per tijdsstap - bodemtemperatuur op elk gewenst punt rond vbww - warmte-uitwisseling per tijdsstap
Verkoop software	TNO-MEP http://www.mep.tno.nl/ - software	Blocon Sweden http://www.building-physics.com	IF Technology http://www.iftechnology.nl/hst.htm	Transsolar Energie- technik GmbH http://www.transsolar.com

¹ Er zijn verschillende modellen voor energiepalen op de markt, die gekoppeld kunnen worden aan TRNSYS. De kenmerken in de tabel gelden voor 'The Superposition Borehole Model for TRNSYS (TRNSBM)'. Andere modellen voor TRNSYS kunnen sterk afwijken voor wat betreft de mogelijkheden.

"Computer software (e.g. Oasys PILE, Thermopile, Cambridge energy piles software) can be used to model piles subjected to structural and thermal loads. Alternatively thermo-hydro-mechanical (THM) finite element programs can be used (e.g. LS-Dyna)". (**GSHP 2012**)

"Usually, a numerical simulation of the geothermal system is recommended for buildings with a heating and cooling demand of more than 50 kW. This rough value decreases to about 20 kW for buildings where rooms have to be cooled throughout the year "**(Banks, 2009)**.

In COFOGE (2007) zijn een aantal softwarepakketten geëvalueerd (zie onderstaande tabel). Het voornaamste aspect voor de selectie van een software ligt in (1) de koppeling van het paal/grond model met het gebouw en (2) de koppeling tussen de warmtewisselaars en de thermodynamische systemen in het gebouw (warmtepomp, koelingmachine, ...), (3) de modulariteit van de software (voor verschillende omstandigheden: klimaat, de grond, ...).

OUTILS D'AVANT-PROJET				
Logiciel ou modèle	Auteur/source	Description générale	Paramètres d'entrée	Sorties de l'outil
SmartStore	Bo Nordell, Water resources (WREL), Université Technique de Luleå, S-971 87 Luleå, Suède	Délivre des estimations techniques et économiques sur un système de stockage classique	Consigne de stockage, coûts de construction, propriétés thermiques	Nombre de sondes, profondeur, espacement, coûts et économie
Tecoclay	Caroline Magnusson, Statens Oljelager, Drottninggatan, Box 16247, S-103 24 Stockholm, Suède	Conception de système de stockage basée sur une optimisation économique du système	Similaire à Smartstore	Similaire à Smartstore
Earth Energy Designer EED	Göran Hellström, Dépt. of Mathematical Physics, University of Lund, Box 118 221 00 Lund, Suède. Une version de démonstration et le manuel d'utilisation sont disponibles sur le site : www.buildingphysics.com .	Calcul de la température annuelle du fluide caloporteur	Caractéristiques du terrain, de l'échangeur de chaleur souterrain, des sondes du fluide caloporteur, besoin énergétiques mensuels	Variation de température du fluide et longueur de sonde requise
PILESIM	Daniel Pahud, daniel.pahud@supsi.ch	Pré dimensionnement d'un système utilisant des pieux ou des sondes géothermiques	Caractéristiques du sol, des pieux, de la PAC, de la machine frigorifique, interface sol-bâtiment, besoins énergétiques	Niveaux de température et performance des différents composants du système
OUTILS DÉTAILLÉS				
Duct Storage Model (DST)	Göran Hellström, Dept. of Mathematical Physics, University of Lund, Box 118 221 00 Lund, Suède	Modèle thermique transitoire pour un système de stockage à plusieurs sondes	Propriétés du sol, configuration des sondes, conditions de chargement thermique, température du terrain initial, température de la surface du sol	Bilan de chaleur, champ de température du terrain
Superposition Borehole Model (SBM)	Göran Hellström, Dept. of Mathematical Physics, University of Lund, Box 118 221 00 Lund, Suède	Modèle qui délivre une description tridimensionnelle détaillée des phénomènes thermiques transitoires mis en jeu dans une sonde géothermique unique ou dans une configuration à plusieurs sondes	Propriétés thermiques du terrain, du fluide caloporteur, configuration des sondes, couplage hydraulique des sondes, disposition des écoulements dans la sonde, conditions de chargement thermique	Bilan de chaleur, puissance transférée, températures du fluide, champ de température dans le sol
Cosond/Nusond/Trad	Robert Hopkirk, Polydynamics Ltd., Zeitweg 16, CH-8032 Zürich, Suisse	Analyse d'un système détaillé stockage de chaleur souterrain utilisant des sondes géothermiques	listing des températures d'entrée du fluide caloporteur, de la température atmosphérique en fonction du temps, propriétés du sol, les dimensions de l'échangeur de chaleur et les débits de fluide	Températures d'entrée et de sortie du fluide en fonction du temps, le champ de températures dans le sol et les puissances transférées
TRADIKON 3D	Burkard Sanner, Institut für Angewandte Geowissenschaften, Der Justus-Liebig-Universität Giessen, Diezstrasse 15, D-35390 Giessen, Allemagne	modèle de différences finies 3D sur l'extraction de chaleur du sol avec des sondes géothermiques	Energie et débits massiques, potentiels thermiques et/ou hydrauliques pré définis, profils de chargement thermique, discréttisation de la zone modélisée, et utilisation variée de méthodes numériques	Champ de température, champ des charges hydrauliques

TRNEWS	Michael Wetter, Zentralschweizerisches Technikum Luzern, Technikumstrasse, CH-6048 Horw ; Arthur Huber Energietechnik, Jupiterstrasse 26, CH-8032 Zürich ; Transsolar Energietechnik GmbH, www.transsolar.de , http://80.60.90.158/ts/index.htm	Modèle TRNSYS(*) de type non standard, simulant des sondes géothermiques avec des tubes double U	configuration des sondes, paramètres du sol, écoulement d'eau souterrain, conditions de chargement thermique, température initiale du terrain, température à la surface du sol	Données à la sortie de la sonde, champ de températures du terrain
TRNVDSTP	Daniel Pahud, daniel.pahud@supsi.ch	Modèle DST implémenté pour la modélisation des pieux géothermiques comme composant TRNSYS	Comme DST avec spécification d'un écoulement souterrain dans chaque couche de terrain et des connexions horizontales	Idem DST, avec en plus la chaleur échangée entre les connexions horizontales et la surface du sol
TRNSBM	Daniel Pahud daniel.pahud@supsi.ch ou Göran Hellström, Dept. of Mathematical Physics, University of Lund, Box 118 221 00 Lund, Suède	Version TRNSYS du modèle SBM	Idem SBM	Idem SBM

Logiciel	Modularité du logiciel (bâtiment, climat, régulation)	Couplage bâtiment-pieux	Finesse modèle de sol	Modèle de pieux/sonde		
				Finesse du modèle	Interaction entre les pieux	Couplage pieux-sol
SmartStore	-	-	+	+	+	+
Tecoclay	-	-	+	+	+	+
Earth Energy Designer EED	-	-	+	+	+	+
PILESIM	o	++	+	+	+	+
Duct Storage Model (DST)	-	-	+	+	+	+
Superposition Borehole Model (SBM)	-	-	++	++	++	++
Cosond/Nusond/Traud	-	-	+	+	+	+
TRADIKON 3D	o	-	++	++	++	++
TRNEWS	++	++	+	+	+	+
TRNVDSTP	++	++	+	+	+	+
TRNSBM	++	++	+	+	+	+

Evaluatie van de softwares : ++ uitstekend / + goed / o voldoende / - onvoldoende

« Seuls PILESIM et TRNVDSTP sont des outils de dimensionnement implémentés pour la problématique des pieux géothermiques. (...) Le modèle TRNSBM représente aussi un outil intéressant au sens où il permet une représentation thermique détaillée d'un ensemble de sondes géothermiques et leur interaction. Mais en considérant la configuration exacte de chaque sonde dans le sol, le temps de simulation devient inévitablement plus long. Aussi, ces considérations font de TRNSBM un outil qui doit être utilisé dans des simulations détaillées d'installations dont on connaît déjà un grand nombre de paramètres. Une méthodologie qui s'impose naturellement est d'utiliser PILESIM comme outil de prédimensionnement lorsque l'on connaît les paramètres géologiques du terrain et le nombre de pieux qui peuvent être transformé en pieux géothermiques. Il permet alors d'évaluer la faisabilité technique d'un projet. L'utilisation de TRNVDSTP est utile dans le développement d'un modèle d'une installation complète de fondations géothermiques, du bâtiment jusqu'aux pieux. Enfin, il est aussi possible de remplacer le modèle TRNVDSTP par le modèle TRNSBM pour évaluer l'influence de l'arrangement spatial des sondes sur les performances énergétiques du système » (COFOGE 2007).

7.4. Case histories

Voorbeelden van case histories zijn gegeven (o.a.) in de volgende referenties:

- Het website van Enercret: www.enercret.com
- Hoes et al. (2008)
- TNO (2003)
- COFOGE (2007)
- Uotinen et al. (2012)
- Suckling & Cannon (2004)
- ARCADIS (2008)
- Katzenbach et al. (2011)
- Von der Hude

De website www.enercret.com verzamelt een aantal “project sheets” met beschrijving van het gebruik van thermo-actieve funderingen (palen maar ook diepwanden of tunnels) in Austria, Germany, Switzerland, UK, en Italy.

Een overzicht van projecten met energiepalen werd gegeven door Hoes et al. (2008), zoals weergegeven in de onderstaande tabel.

Locatie	Vloeropp [m ²]	Energiepalen	Q+ [kW]	Q- [kW]	SPF+	SPF-
Schermerhorn	242	30x14= 420m	15,6	7,5	3,5	20
Heerhugoward	960	62x17,5= 1085m	50	27	2,7	10
Lelystad	1063	23x15= 345m	20	27	-	-
Stompetoren	4000	139x15= 2085m	70	40	3,3	9,4
Nibbixwoud	1490	24x14= 336m	14	10	4,2	9,3
Tuitjenhorn	845	65x20= 1300m	20	27	2	14
Veenendaal	12000	140x16= 2240m	90	140	1,8	-

Uit een aantal gerealiseerde projecten in Nederlands stelt TNO (2003) een aantal aspecten voor die van belang zijn voor het opzetten van een goed energiepalen/warmtepompproject:

- “Zorg in een vroeg stadium van het project voor samenwerking tussen de verschillende partijen die betrokken zijn bij het ontwerp en de uitvoering van het gebouw (incl. fundering!) en het klimaatsysteem (architecten adviseur, en bouwkundige en installatietechnische aannemer).
- Wanneer er een keuzemogelijkheid is bij het activeren van de heipalen, kies dan zoveel mogelijk de palen die zich aan de rand van het gebouw bevinden.
- Kies een warmtepomp met een hoge COP (voor de gegeven omstandigheden van condensor en verdamper temperatuur).
- Beperk de hoeveelheid hulpenergie. Gebruik zo weinig mogelijk pompen binnen de randvoorwaarden van regeling en optimale besturingstrategie. Gebruik bij een warmtepomp met variabel vermogen (of bij meerder compressoren) ook een toerengeregelde bronpomp (of meerdere parallelle pompen).
- Gebruik bij de omschakeling van verwarming naar koelbedrijf (en omgekeerd) een voldoende grote dode zone. Voorkom pendelen: het is gebleken dat minder vaak omschakelen de prestaties positief beïnvloed.” (TNO 2003)

Een groot aantal projecten met energiepalen zijn ook verzameld in COFOGE (2007). Uotinen et al. (2012) beschrijven het eerste project met energiepalen uit Finland (met stalen buipalen). Suckling

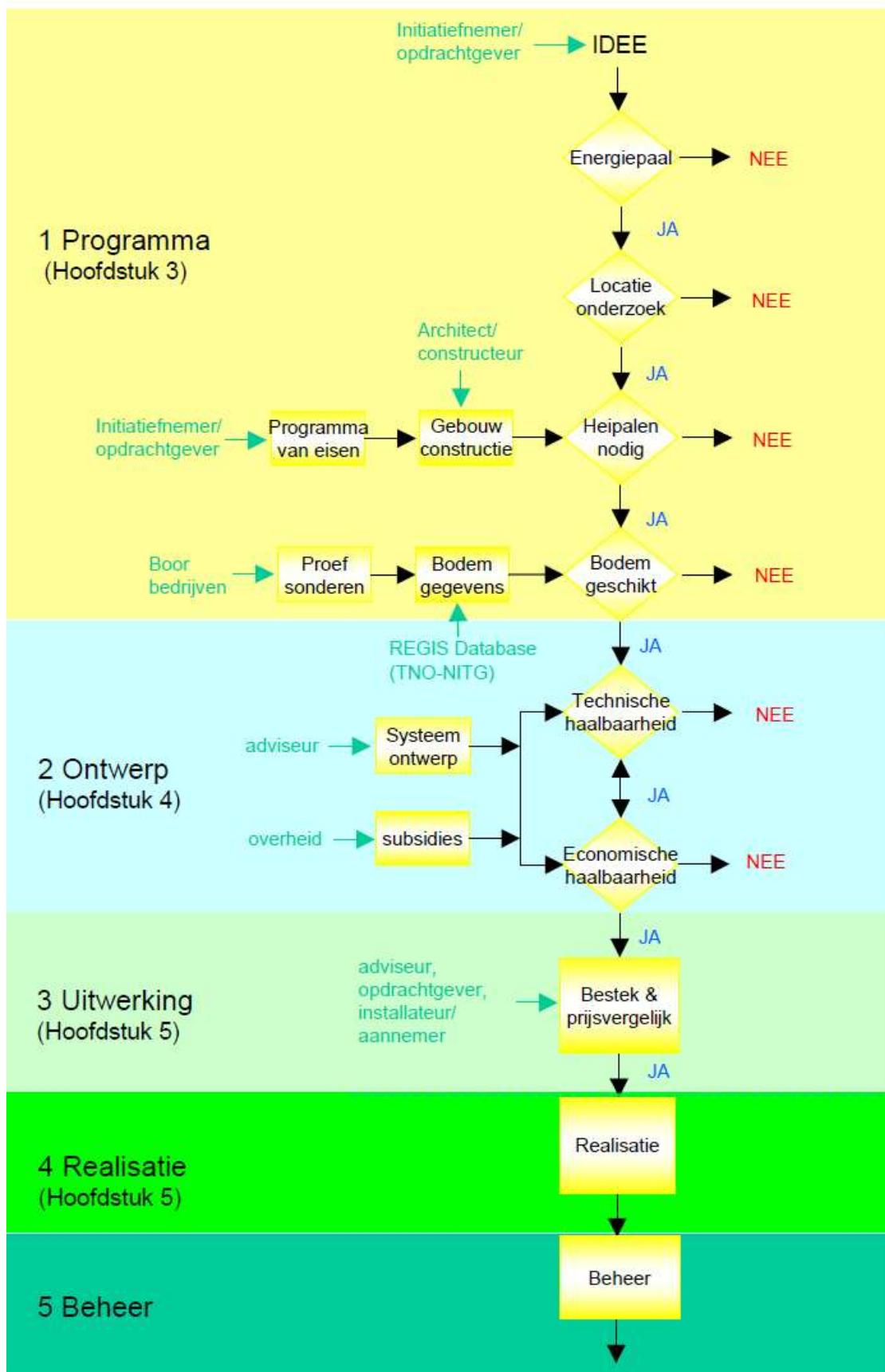
and Cannon (2004) beschrijven een project in de UK met de ‘rotary bored technique’ (Pallant House). Arcadis (2008) spreekt over het gebruik van energiepalen te Geel (Janssen Pharmaceutica). Katzenbach geeft een overzicht van verschillende projecten in Duitsland, en Von der Hude geeft meer details over het project van de Main Tower in Frankfurt am Main.

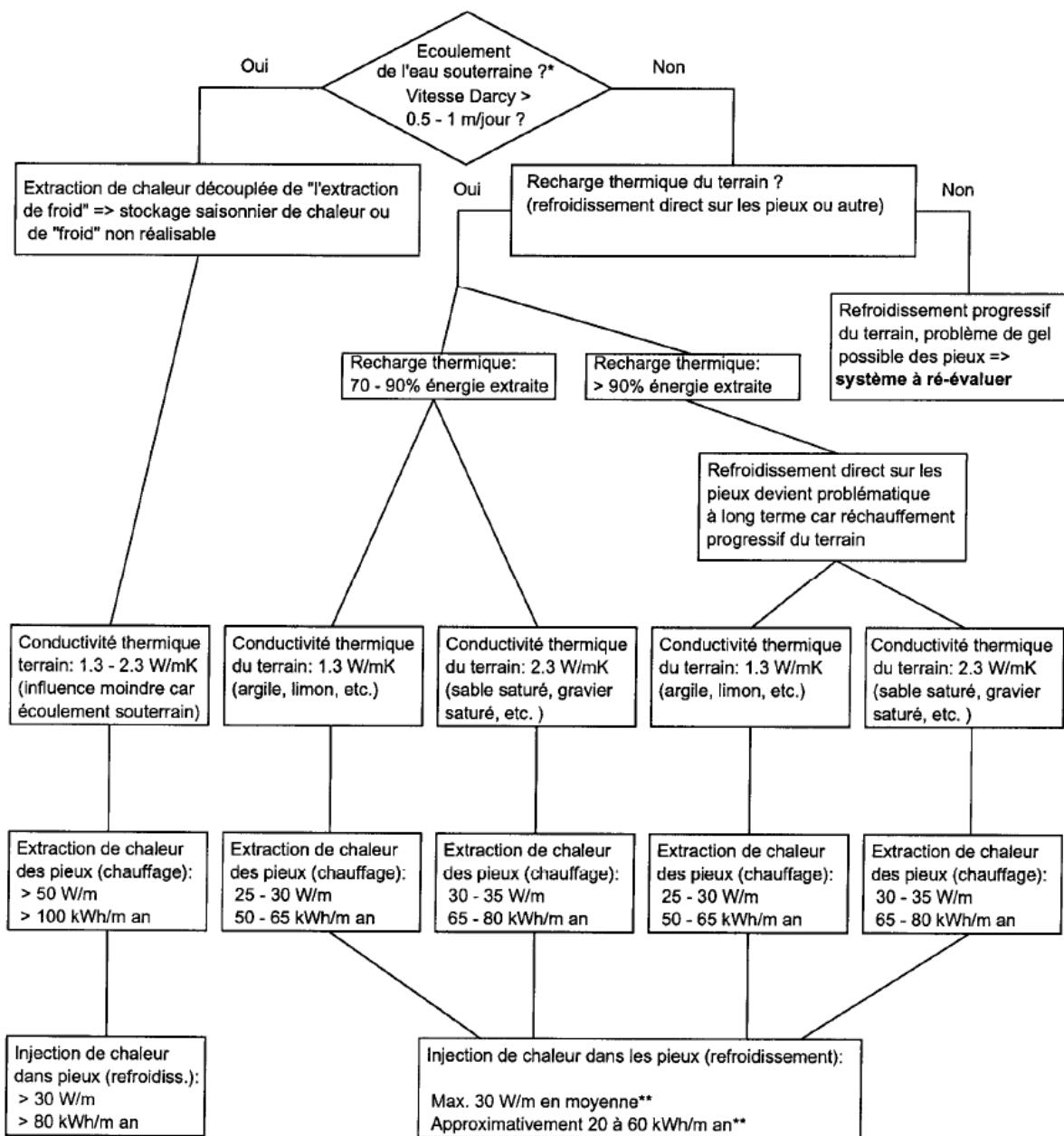
Lijst van gebouwen met geothermische funderingen (uit COFOGE 2007)

1. Terminal Dock Midfield, Suisse
2. Instituts d’architecture (AI) de l’EPFL, Suisse
3. Main Tower, Allemagne
4. École primaire Vers l’Église, Suisse
5. Société Pago SA, Suisse
6. Bâtiment locatif à Willerzell, Suisse
7. Waldenbuch, Allemagne
8. Panoramahaus, Autriche
9. Landsea Property, Chine
10. Logistics and Management Center, Autriche
11. The Uniqa Tower, Autriche
12. Columbus Center, Autriche
13. Strabag Corporate Headquarters, Autriche
14. EA - Generali Administration Building, Autriche
15. Ivoclar AG, Liechtenstein
16. Norddeutsche Landesbank, Allemagne
17. Omicron, Autriche
18. Skyper, Allemagne
19. Car showroom Toyota, Autriche
20. Car showroom Mercedes, Autriche
21. Car showroom BMW, Autriche
22. R & D Centre, Zahnradfabrik Friedrichshafen, Allemagne
23. Bregenz Arts Centre, Suisse
24. Résidentiel Bellagovista, Suisse
25. Keble College, Angleterre
26. Exhibition hall / ice rink, Autriche
27. Rehabilitation Centre, Autriche
28. Administration Building, Italie
29. Lainz Tunnel, Autriche
30. Gare ferroviaire de Praterstern (station U2/3), Autriche
31. Husky Technical Center, Chine
32. Canada Marine Discovery Center, Canada
33. Université de Koblenz, Allemagne
34. Palais des congrès, Autriche
35. Medienhaus Vorarlberg, Autriche
36. Ecole primaire de Triesenberg, Liechtenstein
37. Finkernweg, Suisse
38. Bâtiment industriel de Lidwill, Suisse
39. Bâtiment industriel Photocolor, Suisse
40. Bâtiment polyvalent de l’EPFL, Suisse
41. Trend Cosmetics LTD, Nibbixwoud, Holland
42. Buchs Film and Cultural Centre, Suisse
43. Bregenz Festival Rehearsal Stage, Autriche
44. Vorarlberg Tourist Centre, Autriche
45. Liechtensteiner Landesbank, Liechtenstein

46. Malerva Apartement Buildings, Suisse
47. Gatenhof development, Suisse
48. Meusburger factory, Autriche
49. Printing works on Lake Zurich, Suisse
50. Sueco administration building, Autriche
51. Gewürz Berger AG, Liechtenstein
52. Volksbank Biberach, Allemagne
53. Centrum Bank Vaduz, Liechtenstein
54. Development at Frauenfeld Railway Station, Suisse
55. Sucho shop and apartement complex, Corée du Sud
56. Bouwbedrijf Noordersluis, Holland
57. Pilkes Infra, Holland
58. ZTI Mechatronics, Holland
59. Kender Thijssen, Holland
60. Kodi building, Holland
61. Beveiligingsbedrijf, Holland
62. S. Douma Villa, Holland
63. Cook lexmond, Holland
64. Publisher moundman, Holland
65. G. Kok, Holland
66. Transport company Kuiper & Zn., Holland
67. Transport company VTZ, Holland
68. Transport company NICE, Holland
69. W. Celie, Holland
70. Freelite, Holland
71. Plover Warmth holding, Holland
72. Sport centre Oosterhout, Holland
73. Bedrijfspand, Holland
74. Pallant House Gallery, Angleterre
75. Center for Future Energies, Berlin, Allemagne
76. Rostock Business Center, Allemagne
77. Head Office North German State Bank Building, Allemagne
78. Kino à Buchs, Suisse
79. Wohnanlage Malerva à Sargans, Suisse
80. Rehabilitation center – Bath sound hereditaryoh, Allemagne
81. Houses in Reeuwijk, Holland
82. Gallileo building, Allemagne
83. Industrial Union Metal building, Allemagne
84. Gare Scottenring métro U2/1, Autriche
85. Prison régionale à Altstätten, Suisse
86. KantinalBank, Suisse
87. Dividella AG, Suisse
88. Kino Sargans, Suisse

Bijlage 1. Processschema mbt het gebruik van energiepalen (TNO, 2003 en COFOGE 2007)





	Critères	Plutôt favorable à la réalisation de géostructures énergétiques	Plutôt défavorable à la réalisation de géostructures énergétiques
Critères conditionnant la réalisation de géostructures	Aménagement du territoire (genre de construction)	Bâtiment locatif et administratif de taille importante	Bâtiment de petite taille, villa
	Caractéristiques du sol mécaniques du sol	Charge admissible par le sol	De peu supérieure ou inférieure à la charge du bâtiment
	Tenue du sol à l'excavation	Ne permettant pas une excavation sans soutènement	Permettant une excavation sans soutènement
Critères conditionnant l'équipement des géostructures en échangeurs de chaleur	Conductibilité thermique	Supérieure à environ 1.3 [W/mK]	Inférieure à environ 1.3 [W/mK]
	Eau souterraine	Présence d'eau	Absence d'eau
	Vitesse d'écoulement de l'eau souterraine pour un cas sans recharge thermique	Supérieure à 0.5 - 1 [m/jour]	Inférieure à 0.5 - 1 [m/jour]
	Vitesse d'écoulement de l'eau souterraine pour un cas avec recharge thermique	Inférieure à 0.5 - 1 [m/jour]	Supérieure à 0.5 - 1 [m/jour]
Critères pouvant limiter la réalisation de géostructures énergétiques	Protection des nappes souterraines	Autorisé dans les zones S3 de protection des eaux souterraines et les secteurs de protection des eaux	Non autorisé dans les zones S1 et S2 de protection des eaux souterraines et dans les périmètres de protection des eaux souterraines
	Effets thermiques	Perturbation moyenne annuelle de la température du sol inférieure à 1°C	Perturbation moyenne annuelle de la température du sol supérieure à 1°C
	Barrages hydrauliques	Faible modification de l'écoulement souterrain	Forte modification de l'écoulement souterrain
	Exécution des travaux	Faibles vibrations, peu de bruit	Beaucoup de vibrations et de bruit

Bijlage 2. Rekenvoorbeeld (TNO, 2003)

Stap 1: Kantoorgebouw met:

- bruto vloer oppervlak: 5000 m²
- stempeloppervlak: 1500 m²
- de heipalen zijn gemiddeld 17 m lang
- maximaal netto verwarmingsvermogen : 180 kW;
- warmtebehoefte: 280 MWh per jaar
- koelbehoefte 250 MWh per jaar (met een maximum vermogen van 350 kW)

Stap 2: De effectieve lengte van de energiepalen is 15 m (17 - 2). Het stempeloppervlak is 1500 m²; bij minimaal 11 m² per paal (want er kan worden geregenereerd) kunnen dus maximaal 136 energiepalen worden geplaatst. De totaal beschikbare lengte is dus 2040 m.

Stap 3: Het maximaal vermogen is 180 kW; de jaarlijkse behoefte is 280 MWh; hieruit volgt een aantal equivalenten vollasturen van $280.000 / 180 = 1550$ uren/jaar. Hieruit blijkt dat de volledige warmtevraag nog onder definitie van .monovalent (=1400 eq. vollasturen) valt (bij afwijkingen >25% dienen tussenliggende waarden aangehouden te worden). Bij een COP van 4 geldt: $fCOP = (4-1) / 4 = 0,75$. Voor een systeem waarbij de totale warmtevraag door een warmtepomp gedekt moet worden is het bodemvermogen dus: $180 * 0,75 = 135$ kW

Stap 4: Kijk in tabel 2 bij gevulde matrix opstelling tussen afstand 3,5 m en volledige regeneratie. Hierbij worden de volgende specifiek vermogens gevonden (bij een gemiddelde bodemsoort):

- Monovalent: 50 W/m
- Bivalent 50%: 28 W/m
- Bivalent 25%: 21 W/m

Hieruit volgen de benodigde lengtes, afhankelijk van het te kiezen warmtepompvermogen:

- Monovalent: $135 \text{ kW} / 50 \text{ W/m} = 2700 \text{ m}$
- Bivalent 50%: $68 \text{ kW} / 28 \text{ W/m} = 2430 \text{ m}$
- Bivalent 25%: $34 \text{ kW} / 21 \text{ W/m} = 1620 \text{ m}$

Stap 5: De beschikbare lengte is 2040 m. De maximale grootte van de warmtepomp die zinvol toegepast kan worden is 35 tot 40% van het piekvermogen dus 63 - 72 kW condensorvermogen. Voor de koelsituatie geldt dan **globaal** het volgende: Het verdampervermogen in koelbedrijf is meestal (veel) hoger dan in verwarmingsbedrijf (vanwege een kleiner mogelijk temperatuurverschil tussen verdamper en condensor). Met de bovenstaande verwarmingssituatie correspondeert dan 70 tot 90 kW koelvermogen, daarmee kan dan ca. 60 tot 70% van de koelbehoefte (150 tot 170 MWh) worden gedekt.

Voor de bodem ontstaat dan bij benadering het volgende evenwicht:

- warmteonttrekking: $0,75 (=fCOP) * 220 \text{ tot } 250 \text{ MWh} = 165 \text{ tot } 190 \text{ MWh}$
- warmtetoevoer: $1,21 * 150 \text{ tot } 170 \text{ MWh} = 180 \text{ tot } 200 \text{ MWh}$ (bij COPkoeling = 5)

Bijlage 3. Mechanisch gedrag van palen

Laloui et al. 2003

Le poids du bâtiment impose une charge statique sur les pieux. Cette charge va dépendre principalement du diamètre et du module d'élasticité du pieu. La répartition de la charge F d'un bâtiment dans la direction verticale z est donnée par l'équation suivante (Laloui et al. 2003, réf.[13]) :

$$F_{(z)} = \varepsilon_{(z)} \cdot A \cdot E_{\text{pieu}}$$

ε : déformation axiale (verticale).

A : section du pieu en m^2 .

E_{pieu} : module d'élasticité du pieu en MPa.

Afin d'évaluer la charge supplémentaire imposée à un pieu par sollicitation thermique il faut avant tout évaluer le taux de liberté de la structure noté l et défini par la relation suivante :

$$l = \frac{\varepsilon_g}{\varepsilon_1}$$

ε_1 : dilatation d'une structure libre de charges suite à une sollicitation thermique.

ε_g : dilatation d'une structure contrainte (par frottement latéral par exemple) suite à une sollicitation thermique.

Les variations de température au sein d'un pieu imposent une charge thermique au pieu qui peut s'exprimer comme suit (Laloui et al. 2003) :

$$F_T = E_{\text{pieu}} \cdot (1-l) \cdot \beta \cdot \Delta T \cdot A$$

β : coefficient de dilatation thermique du pieu en $1/K$.

ΔT : écart de température à l'origine de la déformation générée en K.

A : section du pieu en m^2 .

On peut alors en déduire la charge résultante dans le pieu (Laloui et al. 2003) :

$$F_{\text{TOT}} = F_T + F$$

F_T : charge dans le pieu due à la sollicitation thermique.

F : charge générée par le poids de la structure.

La sollicitation thermique d'un pieu provoque donc sa dilatation et induit une charge supplémentaire. Il est donc nécessaire de prendre en compte ces phénomènes dans le dimensionnement d'un pieu qui sera transformé en pieu échangeur.

Bijlage 4. IMPACTS POTENTIELS DES INTERACTIONS GÉOCHIMIQUES

(COFOGE 2007) : « Les interactions géochimiques potentielles sont liées à la présence de l'eau de l'aquifère, initialement isotherme et, en principe, équilibrée avec les minéraux de la matrice poreuse, rencontrant un matériau de nature différente (*béton des pieux*). Compte tenu de la fonction d'échangeur assurée par les pieux (*prélèvement ou régénération thermique*), la température et le gradient thermique local sont perturbés au voisinage de l'interface sol-pieux, avec une variation maximale pouvant atteindre une dizaine de degrés autour d'une température naturelle de 12 à 14 °C. La teneur en eau variable au dessus du niveau phréatique, qui lui-même oscille, et les phénomènes capillaires sont également un facteur supplémentaire de déséquilibre dont il faut évaluer les conséquences, vis-à-vis de la réactivité chimique. Globalement, les réactions chimiques induites par les interactions physico-chimiques entre les matériaux, l'eau porale et les gaz sont très dépendantes de la température. Sur la durée, elles peuvent affecter les propriétés des matériaux par les processus de dissolution-précipitation, avec création de porosité, ou colmatage de la porosité par dépôts de sels, ou éventuellement générer des dépôts isolant à l'interface sol-béton. Ces réactions sont alors susceptibles de modifier l'efficacité thermique de l'échangeur à moyen ou long terme. L'impact du déséquilibre chimique local du fluide vis-à-vis des minéraux peut s'exprimer sur la structure de la matrice poreuse en modifiant ses propriétés, mais également sur sa composition chimique en modifiant la qualité de l'eau initiale, en aval des pieux si un écoulement régional existe.

Dans le cadre d'une étude de faisabilité, la problématique à analyser pour un site donné comprend les aspects suivants :

- Incidence de la composition ou signature chimique des eaux de l'aquifère, en fonction des anomalies locales telles que teneurs en sulfates, chlorures et éléments traces sur la réactivité potentielle ;
- Incidence d'un écart positif ou négatif d'une dizaine de degrés sur la température locale (*sensibilité et redéploiement plus ou moins cyclique des minéraux à comportement prograde / rétrograde*) ;
- Incidence de la teneur en eau et processus capillaires (*remontée de sels, création d'écrans /isolants entre le béton et le sol conducteur / fournisseur de chaleur, etc.*) ;
- Vitesse des processus de dissolution-précipitation (*processus à cinétiques rapides ou lentes selon les espèces minérales en présence initialement ou de l'entartrage/encrassement*) ;
- Nature des dépôts et minéraux néoformés pouvant être soluble ou stables, au sein de la porosité ou au contact du béton ;
- Périmètre d'altération de la qualité de l'eau en aval du système.

La connaissance, par mesures, de la composition minérale du sol et de la composition chimique de l'eau en circulation sont les données principales à rassembler afin de pouvoir envisager les expériences de laboratoire et les simulations numériques nécessaires à la compréhension et à la maîtrise des processus potentiels recensés. La nature et l'ampleur des réactions possibles dépendent de la dureté, de l'alcalinité et de la charge en éléments chimiques réactif des solutions caloporeurs. A travers toutes ces analyses et ces diagnostics, on peut arriver à identifier des incompatibilités de certains systèmes. Dans des cas extrêmes, comme le cas des zones de mélange entre les eaux douces des aquifères avec l'eau de mer (*i.e., constructions côtières*), on aboutit à des systèmes très réactifs à cause des apports d'éléments chimiques complémentaires pour précipiter des minéraux, modifier le pH, etc. De la même manière, dans les régions à forte variation du niveau de saturation d'eau dans les conditions climatique relativement chaudes, on peut assister à des remontées de sels et des dépôts qui risquent de porter atteinte à la conductivité hydraulique et peuvent aussi affecter les transferts de chaleur du sol. Les processus physico-chimiques à l'origine des problèmes de dépôts minéraux sont généralement des processus lents. On peut effectuer des études de compatibilité des systèmes (*eau - sols*) soumis aux perturbations thermiques cycliques induites par les pieux thermiques pour diagnostiquer le risque de manifestations de ces dépôts dans une fourchette de température de 10 à 20 °C. Le résultat de cette analyse aidera à mieux gérer le fonctionnement des pieux selon les contextes hydrodynamiques et surtout hydrochimiques. D'après les données cinétiques des réactions des dépôts minéraux pour les températures de subsurface des sols (15 - 35 °C), les carbonates, les hydroxydes et les sulfates précipitent plus rapidement que la silice et les argiles à partir des eaux relativement salées.

Il n'existe pas, à notre connaissance, d'étude détaillée dans la littérature sur les problèmes potentiels d'entartrage et de dépôts minéraux dans l'environnement immédiat des pieux impactés par les variations de température. Les quelques descriptions sommaires de ces problèmes sont reportées dans Rafferty (2000) qui a

essayé de cartographier ce risque au niveau des États Unis et il s'est basé sur le concept simplifié de dureté des eaux ainsi que leur alcalinité pour leur attribuer le qualificatif du système à risque de dépôts ou non (mais vis-à-vis de l'évaporateur des pompes à chaleur). A cause de la non-linéarité des processus physicochimiques et des échanges de masse entre l'eau et la roche poreuse, cette cartographie des zones à risque reste mal adaptée pour le développement de la technologie des pieux géothermiques dans différents contextes géologiques et climatiques. En pratique, il convient de prendre en considération, à la fois, les détails de la minéralogie des sols, les propriétés réactives des solutions percolant, ainsi que les caractéristiques de la zone non saturée en eau afin d'optimiser les conditions d'exploitation et de prédire le risque de dégradation des performances du système. L'évaluation du risque d'altération géochimique des performances des pieux ne peut s'approcher par la seule analyse des différents types d'eaux, ou des différents types de sol. Chaque cas d'espèce nécessite une étude géochimique spécifique. »

Bijlage 5. Recommandations COFOGE 2007

Recommandations simplifiées (*pour avant projet*)

1. Pour des raisons de statique et de vieillissement prématûre des pieux, la température du fluide circulant dans les pieux ne devrait jamais être inférieure à zéro degré ;
2. Une recharge thermique du terrain est indispensable si l'eau souterraine ne s'écoule pas ;
3. Une recharge thermique du terrain devrait être combinée avec une production de froid en été ;
4. Sans écoulement de l'eau souterraine, une recharge thermique doit atteindre environ 80 % de l'énergie annuelle extraite sur les pieux ;
5. Une recharge thermique du terrain n'est pas nécessaire si un écoulement important de l'eau souterraine est présent (*de l'ordre de 1 m/jour*) ;
6. 1 m de pieu échangeur permet de chauffer environ 2 m² de surface de plancher ;
7. Pour des besoins de chauffage et sans écoulement de l'eau souterraine, entre 25 et 40 W par mètre linéaire de pieu échangeur peuvent être extraits du terrain. L'énergie annuelle extraite est comprise entre 60 et 80 kWh/m/an. Pour des besoins de refroidissement en utilisation directe (*sans machine frigorifique*), on peut envisager une puissance frigorifique maximum d'environ 30 W/m, et une énergie frigorifique comprise entre 50 et 60 kWh/m/an ;
8. La présence d'un écoulement d'eau souterrain (> 1 m/jour), permet d'augmenter les valeurs ci-dessus d'environ 50 % ;
9. La base du bâtiment devrait être isolée de manière à éviter les problèmes de condensation de l'humidité de l'air dans les caves ou les locaux en contact avec le terrain.

Recommandations détaillées

1. La mise en valeur d'un système de pieux échangeurs doit intervenir très tôt dans la planification d'un bâtiment ;
2. L'isolation ou non de la base du bâtiment doit être une question posée pour chaque projet. Si un vide sanitaire ou des zones non chauffées existent entre le terrain et les locaux chauffés, et que ces derniers sont "légèrement" isolés des espaces tampons, une isolation de la base du bâtiment n'est pas forcément justifiée du point de vue économique. Cependant, les problèmes de condensation doivent pouvoir être évalués et maîtrisés ;
3. La température du fluide qui circule dans les pieux ne devrait pas être inférieure à zéro degré ;
4. Une recharge thermique du terrain est indispensable si l'eau souterraine ne s'écoule pas ;
5. Sans écoulement de l'eau souterraine, une recharge thermique du terrain est nécessaire même si la longueur des pieux est sur - dimensionnée d'un facteur 2 ;
6. Si la recharge thermique est effectuée en "free cooling", l'énergie annuelle extraite doit être supérieure à l'énergie annuelle injectée dans le terrain, de manière à compenser les gains dans le terrain dus aux pertes thermiques du bâtiment, et d'éviter ainsi une élévation progressive de la température moyenne du terrain année après année ;
7. Sans écoulement de l'eau souterraine, et pour un système similaire au système de référence, la recharge thermique du terrain doit atteindre au moins 80 % de l'énergie annuelle extraite par les pieux ;
8. Une recharge thermique du terrain n'est plus nécessaire si un écoulement souterrain avec une vitesse de Darcy supérieure à 1 m/jour est présent sur une portion significative de la longueur des pieux. Dans cette situation, l'extraction de chaleur hivernale pour satisfaire une demande d'énergie de chauffage est complètement découpée de l'injection de chaleur estivale pour satisfaire une demande d'énergie de refroidissement ;
9. Sans écoulement de l'eau souterraine, et pour un système similaire au système de référence, 1 m de longueur active d'un pieu échangeur permet de chauffer entre 1.5 et 2 m² d'un bâtiment satisfaisant à la norme suisse SIA 3 80/1 (200 MJ/m²/an)
10. Sans écoulement de l'eau souterraine, et pour un système similaire au système de référence, les PAC doivent être dimensionnées pour extraire une puissance thermique comprise entre 25 et 40 W/m, en fonction du type de sol rencontré et du type de pieu utilisé ;
11. L'énergie annuelle que l'on peut extraire du sol varie entre 60 et 80 kWh/m/an. Avec un système dont l'espacement entre les pieux est plus grand et les pieux plus gros, les valeurs données ci-dessus peuvent être revues à la hausse. Une augmentation d'environ 50 % a été calculée pour des pieux de plus d'un mètre de diamètre et un espacement de l'ordre de 10 m ;

12. Un écoulement souterrain avec une vitesse de Darcy supérieure à 1 m/jour sur une portion significative de la longueur des pieux permet de sensiblement augmenter les valeurs de puissance et d'énergie données ci-dessus ;
13. Le potentiel des pieux échangeurs est pleinement utilisé si la température du fluide circulant dans les pieux varie dans tout l'intervalle de température permis ;
14. Un système de pieu échangeur sur - dimensionné, avec une température minimum du fluide circulant dans les pieux toujours plus élevée que la température minimum tolérée, ne permet pas d'augmenter sensiblement le coefficient de performance des PAC. Avec le système de référence, l'amélioration du COP est inférieure à 0.1 si la longueur des pieux échangeurs est doublée ;
15. Sans la présence d'un écoulement de l'eau souterraine, une recharge thermique du terrain plus grande que nécessaire a une influence positive sur le COP des PAC en mode de chauffage. Avec le système de référence et une bonne stratégie de contrôle des PAC, au moins 0.1 est gagné sur le COP si la recharge thermique équivaut à 120 plutôt que 80 % de l'énergie annuelle prélevée du terrain ;
16. Un ensemble de pieux échangeurs sur - dimensionné n'apporte rien du point de vue thermique; par contre un risque de gel des pieux voir du terrain peut exister s'il est sous -dimensionné ;
17. La stratégie de régulation des PAC a un effet important sur le COP d'un système de pieux échangeurs. Il est important de ne pas enclencher plus de PAC que nécessaire, de manière à maximiser le temps de marche entre le démarrage et l'arrêt de chacune des PAC. Avec le système de référence, une différence de 0.3 sur le COP est calculée entre un bon et un mauvais contrôle des PAC ;
18. Il est important de pouvoir adapter la puissance thermique des PAC à la demande de chaleur instantanée. Une PAC à plusieurs allures permet de sensiblement améliorer le COP. Idéalement la puissance thermique délivrée par la PAC devrait être continue dans un intervalle de puissance aussi large que possible. Dans le système de référence, le COP est amélioré de 0.4 si une PAC à trois allures remplace une PAC à une allure ;
19. Il n'est pas recommandé d'inclure la production de l'eau chaude sanitaire avec les besoins de chauffage dans la demande de chaleur qui sera satisfaite avec un système de chauffage avec pieux échangeurs. Avec le système de référence, la production de l'eau chaude sanitaire crée une pénalité de 0.5 sur le COP relativement à un système ne fonctionnant que pour le chauffage ;
20. Avec un système de pieux échangeurs destiné à satisfaire une demande de chauffage sans eau chaude sanitaire, une amélioration sensible du COP est possible en abaissant les niveaux de température dans la distribution de chauffage. Avec le système de référence, une amélioration du COP de 0.2 est réalisée en diminuant la température de consigne maximum de 50 à 40 °C dans la distribution de chaleur ;
21. Les performances thermiques d'un système de pieux échangeurs sont pénalisées si les pieux ne sont pas régulièrement espacés. La pénalité devient significative si les espacements entre les pieux peuvent différer d'un facteur supérieur à environ 5 ;
22. La possibilité d'un échangeur air-eau dans le circuit des pieux échangeurs devrait être étudiée. Il pourrait être utilisé dans l'entre-saison, lorsque la température de l'air est supérieure à celle du fluide dans les pieux, et en été, pour effectuer une recharge thermique du terrain. Toutefois, cette possibilité doit encore être évaluée aussi bien du point de vue thermique que du point de vue économique ;
23. Avec le système de référence, si la recharge thermique du terrain est effectuée en free cooling, i. e. par l'utilisation directe des pieux échangeurs pour satisfaire des besoins de refroidissement de locaux, la puissance d'injection de chaleur est inférieure à 30 W/m de pieu en moyenne. La température du fluide maximum dans les pieux peut atteindre 22-23 °C en fin de saison de chauffage ;
24. Sans écoulement de l'eau souterraine, une utilisation en "free cooling" des pieux échangeurs année après année n'est possible que si l'énergie thermique prélevée du terrain en hiver est supérieure aux charges thermiques injectées en été, de manière à compenser les pertes thermiques du bâtiment par sa base ;
25. Un régime d'écoulement turbulent n'est pas recommandé dans les pieux échangeurs, tout particulièrement si le nombre de tubes insérés dans un pieu est élevé. Le gain sur le COP des PAC est très faible, et la quantité d'électricité économisée n'est pas forcément supérieure à la quantité d'énergie électrique supplémentaire pour l'alimentation de pompes de circulation plus puissantes ;
26. Finalement, comme remarque générale, il apparaît souvent des problèmes de compatibilité lors du fonctionnement des différents composants d'un système de chauffage ou de refroidissement. Une compréhension du système dans sa globalité est nécessaire pour une intégration et une gestion optimum des différentes parties impliquées, et en particulier des pieux échangeurs dans le concept énergétique du bâtiment, compte tenu des besoins de l'utilisateur ;
27. Enfin, il est difficile de généraliser les règles énoncées ci-dessus développées à partir de simulations relatives à un système de référence.

Bijlage 6. Normen en standarden

Concrete thermal conductivity can be determined by the following tests (GSHP 2012):

- BS EN ISO 12664:2001 Thermal performance of building materials and products – Determination of thermal resistance by means of guarded hot plate and heat flow meter methods – Dry and moist products of medium and low thermal resistance.
- BS EN ISO 12667:2001 Thermal performance of building materials and products – Determination of thermal resistance by means of guarded hot plate and heat flow meter methods – Dry and moist products of high and medium thermal resistance.
- ASTM C177 Test method for steady state heat flux measurement and thermal transmission properties by means of the hot guarded plate apparatus.
- ASTM C518 Test method for steady state heat flux measurement and thermal transmission properties by means of heat flow meter apparatus.
- ASTM C1363 Standard Test Method for Thermal Performance of Building Materials and Envelope Assemblies by Means of a Hot Box Apparatus

LIST OF REFERENCES AND RECOMMENDED READING MATERIALS (GSHP 2012)

Organisation	Document Name	Document Ref. No.
ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers)	Heating, ventilating and air-conditioning application. Chapter 32 - Geothermal Energy.	
American Society for Testing and Materials	Test method for steady state heat flux measurement and thermal transmission properties by means of the hot guarded plate apparatus.	ASTM C177
	Test method for steady state heat flux measurement and thermal transmission properties by means of heat flow meter apparatus.	ASTM C518
	Standard Test Method for Thermal Performance of Building Materials and Envelope Assemblies by Means of a Hot Box Apparatus	ASTM C1363
British Standards Institution	Code of Practice for site investigations	BS 5930: 1999 + A2 :2010
	Geotechnical investigation and testing - Identification and classification of rock - Identification and description	BS EN ISO 14689-1:2003
	Geotechnical investigation and testing - Identification and classification of soil - Part 1: Identification and description	BS EN ISO 14688-1:2002
	Heating Systems in Buildings, design of heat pump heating systems	BS EN 15450:2007
	Investigation of potentially contaminated sites. Code of practice	BS10175:2001
	Quality management system. Requirements	BS EN ISO 9001:2008
	Technical drawings. Construction drawings. General principles of presentation for general arrangement and assembly drawings	BS EN ISO 7519:1997
	Thermal performance of building materials and products. Determination of thermal resistance by means of guarded hot plate and heat flow meter methods. Dry and moist products of medium and low thermal resistance	BS EN ISO 12664
	Thermal performance of building materials and products. Determination of thermal resistance by means of guarded hot plate and heat flow meter methods. Products of high and medium thermal resistance	BS EN ISO 12667

Coal Authority	Guidance on managing the risk of hazardous gases when drilling near coal.	
DCLG	Domestic Building Services Guide, 2010 edition	
	Non Domestic Building Services Guide, 2010 edition	
Department Energy and Climate Change	Microgeneration Installation Standard 3005: Requirements for contractors undertaking the design, supply, installation, set to work commissioning and handover of microgeneration heat pump systems, Issue 3.1a.	
Environment Agency	Environmental good practice guide for ground source heating and cooling schemes: 2011	GP3 2007
	Ground Water Protection: Policy and Practice	
European Parliament	Council Directive 80/68/EEC of 17 December 1979 on the protection of groundwater against pollution caused by certain dangerous substances	80/68/EEC
	Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 establishing a framework for Community action in the field of water policy	2000/60/EC
	Directive 2006/118/EC of the European Parliament and of the Council of 12 December 2006 on the protection of groundwater against pollution and deterioration	2006/118/EC
Ground Source Heat Pump Association	Closed-loop Vertical Borehole: Design, Installation & Materials Standards, Issue 1.0.	
Health and Safety Executive	Managing Health and Safety in Construction. Construction (Design and Management) Regulations 2007 Approved Code of Practice.	
	Protection of workers and the general public during development of contaminated land	HSG 66 (1991)
	The Control of Substances Hazardous to Health Regulations 2002 (as amended). Approved code of practice and guidance.	
Institution of Civil Engineerings	The Specification for piling and embedded retaining walls, 2nd edition.	
London District Surveyors Association	Guidance notes for the design of straight shafted bored piles in London Clay, Guidance Note 1	
National House Building Association	Efficient design of piled foundations for low rise housing, design guide	
Northern Ireland Executive	Groundwater Regulations (Northern Ireland) 2009	
The Scottish Government	The Water Environment (Groundwater and Priority Substances) (Scotland) Regulations 2009	
SIA (Swiss Society for Engineers and Architects)	Utilisation de la chaleur du sol par des ouvrages de fondation et de soutenement en beton, Guide pour la conception, la realisation et al maintenance	D 0190
UK Government	The Environmental Permitting (England and Wales) Regulations 2010	
	The Pressure Equipment Regulations 1999	
VDI (The Association of German Engineers)	Thermal use of the underground - Ground source heat pump systems	VDI 4640 Part 2 (2009)
Water Industry Standards	Specification for Bedding and Sidefill Materials for Buried Pipelines	WIS 4-08-02
Water UK	Water Industry: Information & Guidance Note, March 2003. The choice of pressure ratings for polyethylene pipe systems for water supply and sewerage duties	IGN 4-32-18
World Geothermal Congress	Sanner et al, 2005. Thermal response test – current status and worldwide application. Proceedings World Geothermal Congress 2005, 24-29, April 2005, Antalya, Turkey	

Reports

Organisation	Document Name	Document Ref. No.
Arup	DTI Partners in Innovation 2002 Ground Storage of Building Energy Overview Report	PII Ref: O-02-ARUP3, May 2005
Swiss Federal Office of Energy	Recommandations pour la realisation d'installations avec pieux echangeurs	120.104, December 1997
	Mesures et optimisation de l'installation avec pieux energetiques du Dock Midfield de l'aeroport de Zurich	June 2007 rapport final.

Technical Papers

Topic	Title	Reference
Thermal Behaviour & Design	Energy foundations and other thermo active ground structures	Brandl, H. (2006) <i>Geotechnique</i> , 56 (2), 81 – 122.
	Thermal performance and ground temperature of vertical pile foundation heat exchangers: a case study	Gao, J., Zhang, X., Liu, J., Li, K. & Yang, J. (2008) <i>Applied Thermal Engineering</i> , 28, 2295-2304.
	Numerical and experimental assessment of thermal performance of vertical energy piles: an application	Gao, J., Zhang, X., Liu, J., Li, K. & Yang, J. (2008) <i>Applied Energy</i> , 85, 901-910.
	Comparison of a modeled and field tested piled ground heat exchanger system for a residential building and the simulated effect of assisted ground heat recharge	Wood, C. J., Liu, H. & Riffat, S. B. (2010) <i>International Journal of Low Carbon Technologies</i> , 5, 137-143.
	An investigation of the heat pump performance and ground temperature of a pile foundation heat exchanger system for a residential building	Wood, C. J., Liu, H. & Riffat, S. B. (2010) <i>Energy</i> , 35, 3932-4940.
	A new model and analytical solutions for borehole and pile ground heat exchangers	Yi Man, Hongxing Yang, Nairen Diao, Junhong Liu, Zhaozhong Fang (2010) <i>International Journal of Heat and Mass Transfer</i> , 53, 2593–2601
Thermo-Mechanical Interactions	Energy pile test at Lambeth College, London: geotechnical and thermodynamic aspects of pile response to heat cycles	Bourne-Webb, P. J., Amatya, B., Soga, K., Amis, T., Davidson, T. & Payne, P. (2009) <i>Geotechnique</i> , 59 (3), 237-248.
	A framework for understanding energy pile behaviour	Bourne-Webb, P., Amatya, B. & Soga, K. (<i>in press</i>) Proceedings of the Institute of Civil Engineers Geotechnical Engineering
	Geotechnical analysis of heat exchanger piles	Knellwolf, C., Peron, H. & Laloui, L. (2011) <i>Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering</i> , issue 137 (10), pp890-912.
	Experimental and numerical investigations of the behaviour of heat exchanger pile,	Laloui, L., Nuth, M. & Vulliet, L. (2006) <i>International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics</i> , 30, 763-781.
Pile design	Results from long term measurements in piles of drag load and downdrag,	Fellenius, B.H. (2006) <i>Canadian Geotechnical Journal</i> , 43 (4), 409-430.
	A practical design approach for piles with negative friction,	Poulos, H.G. (2008) <i>Proceedings of the ICE: Geotechnical Engineering</i> 161, Issue GE1, 19-27