



Laan van Westenenk 501
Postbus 342
7300 AH Apeldoorn

www.mep.tno.nl

T 055 549 34 93

F 055 549 32 01

info@mep.tno.nl

TNO-rapport

R 2003/456

Handboek Energiepalen

Datum	november 2003
Auteurs	TNO-MEP: Charles Geelen Lucienne Krosse
	KODI: Peter Sterrenburg
	ECN: Ernst-Jan Bakker Niels Sijp heer
Projectnummer	33339
Novemprojectnummer	345.01.52.02.0039
Bestemd voor	Novem T.a.v. Roger Ravelli

Alle rechten voorbehouden.

Niets uit deze uitgave mag worden vermenigvuldigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke andere wijze dan ook zonder voorafgaande toestemming van TNO.

Indien dit rapport in opdracht werd uitgebracht, wordt voor de rechten en verplichtingen van opdrachtgever en opdrachtnemer verwezen naar de Algemene Voorwaarden voor onderzoeksopdrachten aan TNO, dan wel de betreffende terzake tussen de partijen gesloten overeenkomst. Het ter inzage geven van het TNO-rapport aan direct belanghebbenden is toegestaan.

Samenvatting

De toepassing van warmtepompen is een van de mogelijkheden die kan bijdragen aan het realiseren van de doelstellingen van de overheid met betrekking tot het reduceren van de CO₂ emissies.

Het toepassen van energiepalen (heipalen met ingebouwde warmtewisselaars) is een van de interessante systemen waarbij de bodem als energiebron en als energie-opslagmedium kan worden gebruikt.

Toch komt de toepassing van energiepalen slechts langzaam op gang. De ervaring leert dat hier verschillende redenen aan ten grondslag liggen: enerzijds is het de onbekendheid met de mogelijkheid energiepalen toe te kunnen passen, anderzijds vormen onzekerheden omtrent de juiste dimensionering een beletsel bij de toepassing ervan. Daarnaast wordt soms, bij een conservatieve benadering, een van de voordelen van het systeem, namelijk de integratie in de constructie van het gebouw, zonder duidelijke reden als nadeel gezien.

Dit handboek beoogt potentiële toepassers van energiepalen van de benodigde kennis en informatie te voorzien om de juiste afwegingen te kunnen maken. Er wordt een overzicht gegeven van de stand van zaken, toepassingsvoorbeelden, uitvoeringsvormen, etc. van de energiepaal. Tevens zullen een aantal tot nu toe gerealiseerde energiepaal-projecten in diverse facetten worden belicht, mede aan de hand van monitoringsresultaten.

Daarnaast is een handleiding voor de dimensionering van energiepalen in de vorm van een stappenplan opgenomen, waarbij ook wordt aangegeven welke rekenprogramma's beschikbaar zijn. Teneinde de kwaliteit van het energiepalensysteem tijdens de realisatie van een project te borgen wordt aandacht besteed aan uitvoeringstechnische zaken.

Het Handboek Energiepalen is gefinancierd door Novem in het kader van het BSE-programma "Warmtepompen Utiliteit".

Het Handboek Energiepalen is tot stand gekomen onder leiding van TNO-MEP in samenwerking met ECN en Kodi.

Inhoudsopgave

Samenvatting.....	3
1. Leeswijzer.....	9
1.1 Wat is een energiepaal.....	9
1.2 Doel van het handboek.....	9
1.3 Doelgroep en informatie wegwijzer.....	9
1.4 Toepassingsgebied / beperkingen / randvoorwaarden.....	10
1.5 Trefwoorden.....	10
2. Inleiding.....	11
2.1 Algemeen, verwarming en koeling.....	11
2.2 Beperking van de warmtebehoefte.....	12
2.3 Het afgiftesysteem voor gebouwklimatisering.....	12
2.4 Invloedsfactoren op de prestatie van energiepalen.....	13
2.4.1 Mediumtemperatuur.....	13
2.4.2 Mono of bivalent systeem voor verwarming.....	14
2.4.3 Regeneratie van de bodem.....	16
2.4.4 Door toevoer van zonnewarmte via collectoren. Opstellingsvorm.....	17
2.4.5 Onderlinge afstand.....	19
2.4.6 Bodemsoort.....	19
2.4.7 Grondwaterstroming.....	19
2.4.8 Seizoensinvloeden.....	19
2.5 Praktische aspecten.....	20
2.5.1 productie/fabricage.....	20
2.5.2 Kosten.....	21
2.6 Resultaten uit reeds gerealiseerde projecten.....	21
2.7 Procesfasen.....	22
3. Globale haalbaarheid.....	25
3.1.1 Benodigde gegevens vooronderzoek.....	25
3.1.2 Eisen.....	25
3.1.3 Globale dimensionering; kengetallen en vuistregels voor een eerste benadering.....	26
3.1.4 Energiebesparing.....	28
4. Dimensionering.....	29
4.1 Stappenplan voor de dimensionering.....	29
4.2 Rekenprogramma's.....	34
5. Uitvoering.....	37
5.1 Energiepaal.....	37

5.1.1	Prefab voorgespannen betonnen energiepaal	37
5.1.2	Heien ‘op stuit’ of ‘op kleef’	38
5.1.3	Sonderen.....	39
5.2	Heiplan.....	40
5.2.1	Oorspronkelijke constructieve heiplan	40
5.2.2	Toewijzen energiepalen.....	41
5.2.3	Bepaling uittredepunt van de slangen uit de energiepalen	43
5.3	Werktekeningen.....	45
5.3.1	Aanmaak van werktekeningen voor de productie van de heipalen.....	45
5.3.2	Verwerken van de nieuwe paalmerken in een aangepast heiplan (tussenstap)	46
5.4	Horizontaal slangensysteem	47
5.4.1	Ontwerp horizontaal slangensysteem.....	47
5.4.2	Tichelmannkoppeling.....	48
5.4.3	Seriëkoppeling.....	49
5.4.4	Verwerken van het horizontale slangensysteem in het definitieve heiplan	50
5.4.5	Wapeningsnetten ten behoeve van het horizontaal slangensysteem.....	52
5.5	Praktisch heiplan voor de heiwerkzaamheden.....	53
5.6	Hydraulische koppeling.....	54
5.6.1	Hydraulische koppeling verdelers/verzamelaars.....	54
5.6.2	Bijzonderheden verdelers/verzamelaars.....	55
5.7	Warmtetransport	56
5.7.1	Keuze van het warmtetransportmedium.....	56
5.7.2	Afpersen, vullen en ontluichten van de installatie	58
5.8	Hydraulisch balanceren van de installatie	61
5.8.1	Balanceren van de paalgroepen.....	61
5.8.2	Balanceren van de verdelers/verzamelaars.....	63
5.8.3	Inregelafsluiter in centrale retourleiding	64
5.8.4	Beveiliging van de installatie	65
6.	Energiepalen in de praktijk	67
6.1	Gerealiseerde projecten	67
6.1.1	Sander Douma - Schermerhorn	68
6.1.2	Kodi - Heerhugowaard.....	70
6.1.3	Noordersluis – Bouwbedrijf – Lelystad	72
6.1.4	Pilkes Infra – Stompeloren.....	74
6.1.5	Trind Cosmetics – Nibbixwoud	76
6.1.6	ZTI Mechatronics – Tuitjenhorn.....	78
6.1.7	Kender Thijssen – Veenendaal.....	80
6.2	Kosten.....	82

7.	Referenties en literatuur	83
8.	Verantwoording	87
Bijlage 1	Trefwoordenlijst	
Bijlage 2	Rekenvoorbeeld EIA	

1. Leeswijzer

Het Handboek Energiepalen is gefinancierd door Novem in het kader van het BSE-programma “Warmtepompen Utiliteit”.

Het Handboek Energiepalen is tot stand gekomen onder leiding van TNO-MEP in samenwerking met ECN en Kodi.

1.1 Wat is een energiepaal

Een energiepaal is een speciaal soort heipaal. Heipalen hebben normaliter alleen tot doel de fundering voor gebouwen of woningen te vormen in gebieden waar de bodem niet stevig genoeg is om het gebouw of de woning te dragen.

Het bijzondere aan een energiepaal is dat deze, behalve als fundering, ook dient om warmte uit de bodem te halen of in de bodem op te slaan, vandaar de naam “energiepaal”. Om dit te kunnen doen worden, tijdens de productie van de heipaal, kunststof slangen in de lengte richting in de palen aangebracht; de draagkracht van de paal blijft uiteraard behouden. Door gekoeld of verwarmd water door de slangen te laten stromen kan warmte aan de omringende bodem worden onttrokken respectievelijk worden toegevoerd.

1.2 Doel van het handboek

Het doel van dit handboek is de reeds opgedane ervaring op het gebied van energiepalen beschikbaar te stellen om de toepassing ervan te stimuleren.

In het handboek komen de volgende onderwerpen aan de orde:

- a) huidige stand van de techniek
- b) voorbeeldprojecten
- c) globale dimensionering van het palensysteem en de bijbehorende invloedsfactoren
- d) berekeningshulpmiddelen
- e) uitvoeringsaspecten

1.3 Doelgroep en informatie wegwijzer

Het Handboek Energiepalen richt zich met name op projectontwikkelaars, architecten, adviseurs, installateurs en leveranciers. Niet ieder hoofdstuk is voor iedere doelgroep even belangrijk. De hoofdstukken kunnen ook separaat gelezen worden. Bij de Procesfasen (paragraaf 2.7) wordt het gehele proces van idee tot realisatie / beheer van het gehele gebouw, inclusief installatie beschreven. Belangrijke onderdelen als haalbaarheid (hoofdstuk 3), dimensionering (hoofdstuk 4) en realisatie (hoofdstuk 5) zijn er uitgelicht en worden in meer detail beschreven in de daarop

volgende hoofdstukken. Tenslotte worden in hoofdstuk 6 enkele gerealiseerde projecten als voorbeeld van de toepassing van energiepalen belicht.

1.4 Toepassingsgebied / beperkingen / randvoorwaarden

Het handboek is primair gericht op toepassing van energiepalen binnen de utiliteitsbouw. Uiteraard kunnen energiepalen ook in de woningbouw en in de industrie worden toegepast. Echter tot op heden is de toepassing van heipalen als energiepalen hoofdzakelijk beperkt gebleven tot de utiliteit.

Dit heeft onder andere te maken met een aantal randvoorwaarden waaraan voldaan moet worden bij een rendabele inpassing van energiepalen:

- i) De aanwezigheid van heipalen. Wanneer geen heipalen nodig zijn kan de bouwkundige en energetische functie uiteraard niet gecombineerd worden. In dat geval kan het toepassen van gewone bodemwarmtewisselaars of het direct gebruik van grondwater (aquifer) worden overwogen.
- ii) Het is altijd aan te bevelen de behoefte aan warmte en koeling van een gebouw eerst zo ver mogelijk te reduceren en daarna de geminimaliseerde behoefte duurzaam te verzorgen. Dit geldt uiteraard ook bij het toepassen van een warmtepomp in combinatie met energiepalen.
- iii) Energiepalen zullen met name succesvol toegepast kunnen worden bij laagbouw. Er zijn echter ook succesvolle toepassingen bekend bij combinaties van hoogbouw (kantoor) en laagbouw (magazijn/bedrijfshal). Belangrijkste voorwaarde is dat de verhouding tussen bruto vloeroppervlak en de ‘footprint’ (of het “stempeloppervlak”) van het gebouw niet te groot is.

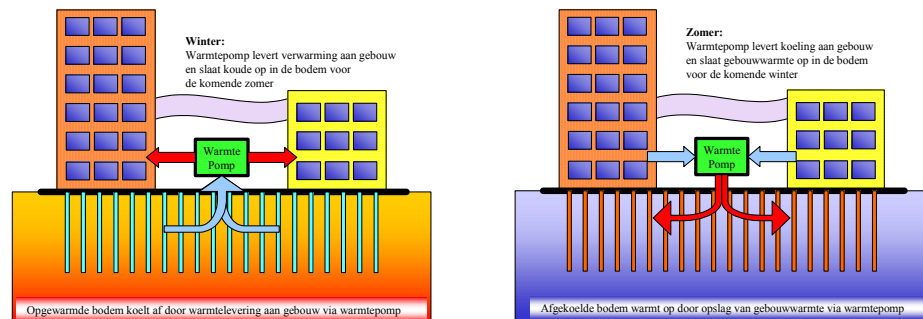
1.5 Trefwoorden

Een lijst met trefwoorden, begrippen en afkortingen is opgenomen in bijlage 1.

2. Inleiding

2.1 Algemeen, verwarming en koeling

In moderne kantoorgebouwen is naast verwarming ook een aanzienlijke hoeveelheid koeling vereist. Naast de variatie in de behoefte aan verwarming en koeling als gevolg van de seizoenen is ook het dag/nachtbedrijf van een gebouw bepalend. Door de grote verschillen in interne warmteproductie door verlichting, personen en apparatuur is tijdens de normale bedrijfstijd (meestal overdag) overwegend koeling nodig en daarbuiten overwegend verwarming. Overtollige warmte die door koeling uit het gebouw wordt verwijderd, kan tijdelijk worden opgeslagen om in een koude periode te worden gebruikt om het gebouw te verwarmen. De bodem onder een gebouw kan als warmte- of koudeopslag fungeren. Echter, dit is vanuit economisch oogpunt lang niet altijd haalbaar door onder andere de relatief hoge kosten van het toepassen van bodemwarmtewisselaars. Aangezien in Nederland veelal heipalen worden aangebracht voor fundatie, is het vanuit kosten oogpunt interessant om de bodemwarmtewisselaar te integreren in de heipalen. Dit zijn zogenaamde energiepalen. In figuur 2 is schematisch de seizoenswerking van energiepalen in combinatie met een warmtepomp weergegeven.



Figuur 1 Seizoenswerking energieheipalen.

Een warmtepomp in een gebouw dat op energiepalen staat onttrekt tijdens het stookseizoen warmte aan de bodem via de energiepalen. Tijdens koelbedrijf (met het zwaartepunt in de zomer) vindt het omgekeerde proces plaats: door het afgiftesysteem in het gebouw wordt koeling geleverd (= warmte opgenomen). Via de warmtepomp (of rechtstreeks) wordt de gebouwwarmte in de bodem opgeslagen voor de periode dat verwarming nodig is. De energiepalen kunnen op twee manieren voor de gebouwkoeling worden ingezet (zie ook paragraaf 2.4.3):

- Door de condensor van de warmtepomp tijdens koelbedrijf aan het energiepalen systeem te koppelen wordt de condensorwarmte van de warmtepomp (die dan als koelmachine fungeert) in de bodem opgeslagen.

We spreken dan van actieve koeling.

- Tijdens koelbedrijf wordt de warmtepomp uitgeschakeld en worden de energiepalen via een warmtewisselaar aan het gebouwstelsel gekoppeld. We spreken dan van passieve koeling.

Eventueel kan ook de behoefte van warmtapwater (deels) door de warmtepomp worden verzorgd. Normaliter is de behoefte aan warmtapwater in een kantoorgebouw echter relatief laag en decentraal aanwezig; verzorging door een centrale warmtepomp is dan meestal niet zinvol.

2.2 Beperking van de warmtebehoefte

Zoals vermeld bij de randvoorwaarden is het van belang de behoefte aan verwarming en koeling te minimaliseren. De warmtevraag kan worden beperkt door isolatie-maatregelen te nemen die verder gaan dan de eisen van het bouwbesluit, zoals bijvoorbeeld de toepassing van:

- Dak en gevel isolatie met een R_c -waarde van 4 à 5 [$\text{m}^2\text{K}/\text{W}$]
- Kozijnen en beglazing met een gemiddelde U -waarde < 1.8 à 2.0 [$\text{W}/\text{m}^2 \text{K}$]
- Uitstekende kierdichting van de geveldelen en aansluitingen
- Behoeftelose ventilatie (regeling op basis van de luchtkwaliteit) en
- Warmteterugwinning op de ventilatie met een rendement van minimaal 70%

De behoefte aan koeling kan worden beperkt door het toepassen van onder andere:

- Efficiënte HR verlichting
- LCD computerschermen
- Effectieve zonwering

2.3 Het afgiftesysteem voor gebouwklimatisering

Bij het gebruik van energiepalen in combinatie met een warmtepomp gaat het in feite om een integrale benadering van het binnenklimaat. Aan de afgifte zijde van het klimaatsysteem is het van belang systemen zoals vloerverwarming of klimaatplafonds toe te passen. Daarmee wordt, naast een hoog comfort, bereikt dat de systeemtemperaturen voor verwarming laag, en voor koeling hoog kunnen zijn. Hierdoor kan de warmtepomp, die de verbindende schakel tussen afgiftesysteem en energie-opslagsysteem (de energiepalen met de bodem) vormt, optimaal functioneren. De prestatiefactor van de warmtepomp, COP^1 , wordt namelijk hoger naarmate het temperatuurverschil tussen energiepalen en afgiftesysteem kleiner is.

¹ Quotient van geleverde warmte en toegevoerde elektriciteit

2.4 Invloedsfactoren op de prestatie van energiepalen

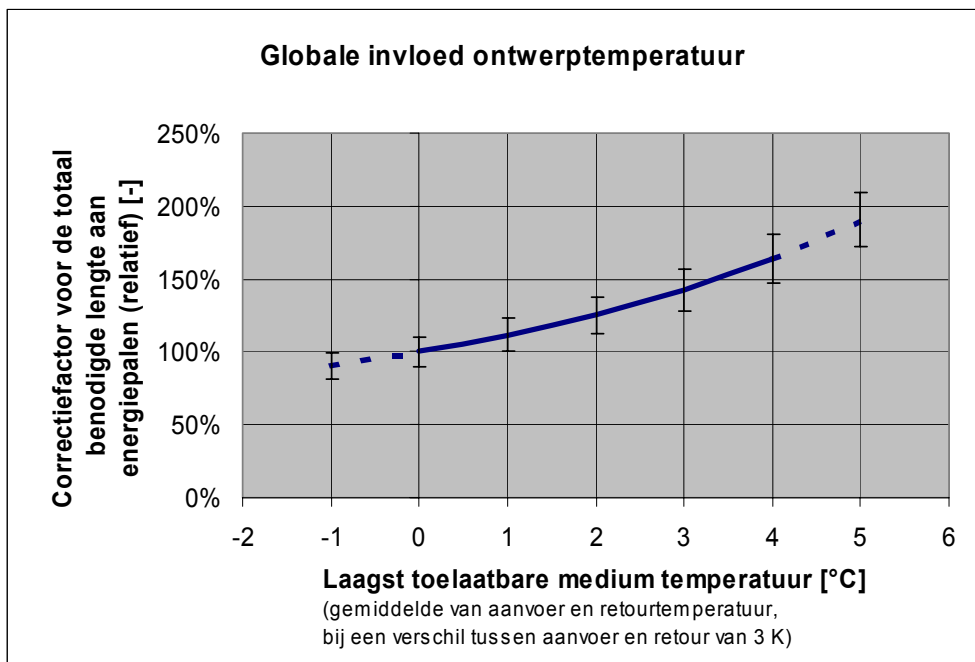
Het vermogen waarmee warmte door de energiepalen aan de bodem kan worden onttrokken (voor verwarming) of kan worden toegevoerd (voor koeling) is van een aantal factoren afhankelijk. Deze worden in dit hoofdstuk kwalitatief besproken, in hoofdstuk 4 worden enkele invloedsfactoren gekwantificeerd.

2.4.1 Mediumtemperatuur

De belangrijkste factor voor het vermogen van energiepalen is de temperatuur van het medium (water met antivries) dat door de palen stroomt. Hoe lager de mediumtemperatuur, hoe hoger het onttrokken vermogen (voor verwarming); in de koelsituatie geldt het omgekeerde.

Bij een te lage temperatuur (aanvoer naar de energiepalen $< \text{ca. } -2 \text{ }^\circ\text{C}$ gedurende 12 tot 24 uur) kan de bodem tegen de buitenzijde van de paal bevriezen. Wanneer de heipaal (een deel van) zijn draagkracht aan de kleef met de bodem ontleent, kan de draagkracht door de bevriezing verminderen. Deze situatie dient uiteraard voorkomen te worden. Tevens zijn lage temperaturen niet wenselijk omdat deze leiden tot een lage COP van de warmtepomp.

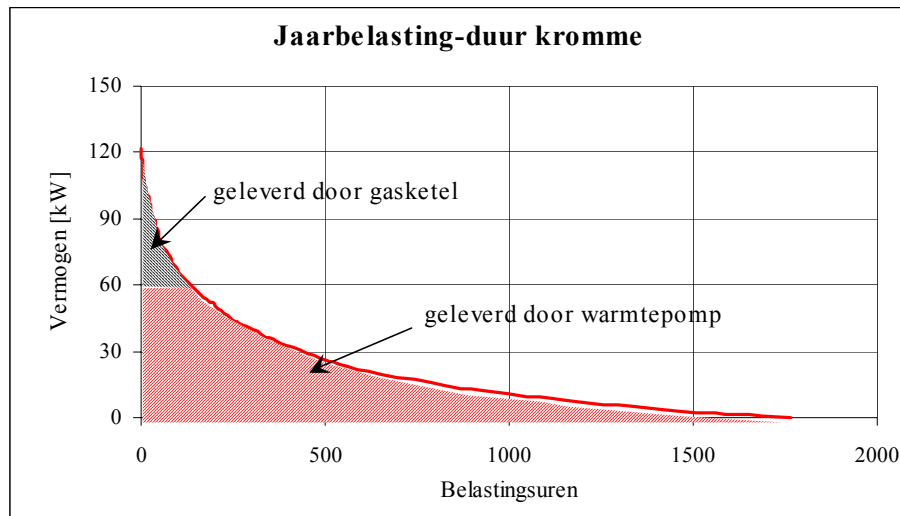
In figuur 2 is de invloed van de toelaatbare temperatuur op de totaal benodigde lengte aan energiepalen weergegeven.



Figuur 2 Globale invloed ontwerptemperatuur op de benodigde energiepalen lengte.

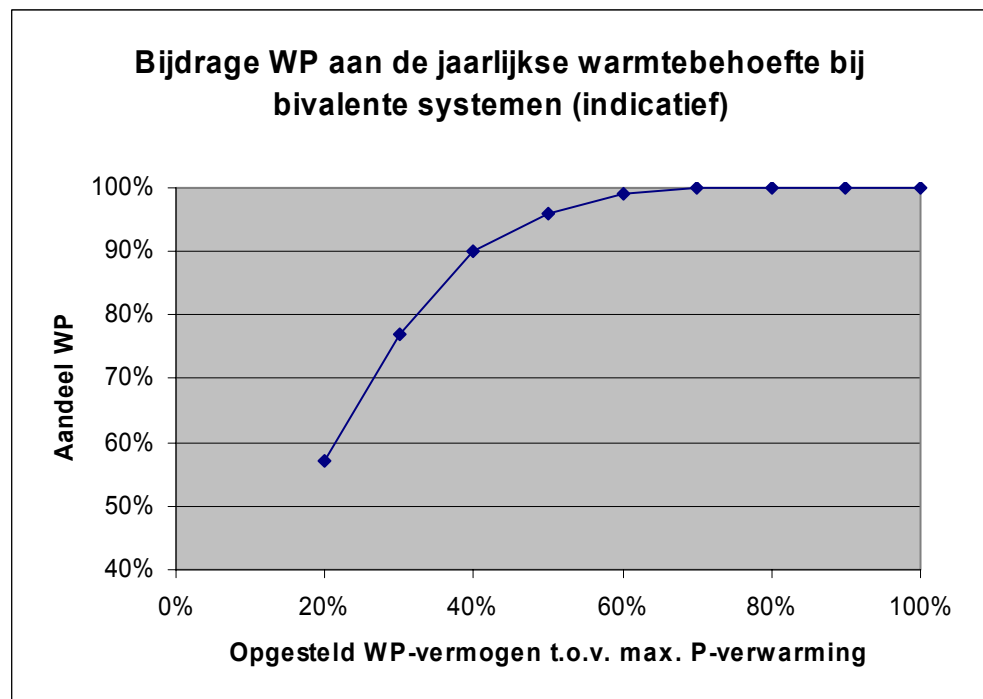
2.4.2 Mono of bivalent systeem voor verwarming

Een warmtepomp (aangesloten op energiepalen als bron) met een vermogen van 50% van het piekvermogen levert circa 90% van de totale verwarmingsvraag. De overige helft (60 kW in figuur 3) kan geleverd worden door bijvoorbeeld een gas-ketel. Aangezien in dit geval twee apparaten de totale warmtevraag leveren, wordt gesproken over een bivalent systeem. Neemt maar één toestel de gehele warmtevraag voor zijn rekening, dan wordt gesproken over een monovalent systeem. Een belangrijke factor voor de dimensionering is de verhouding tussen de hoeveelheid onttrokken warmte en het maximale vermogen waarmee dit gebeurt. Deze verhouding heet het aantal equivalente vollasturen [h/a]. Een monovalent systeem zal een relatief laag aantal equivalente vollasturen kennen. In een bivalent systeem, heeft de warmtepomp, bij dekking van de basislast, een relatief hoog aantal equivalente vollasturen.



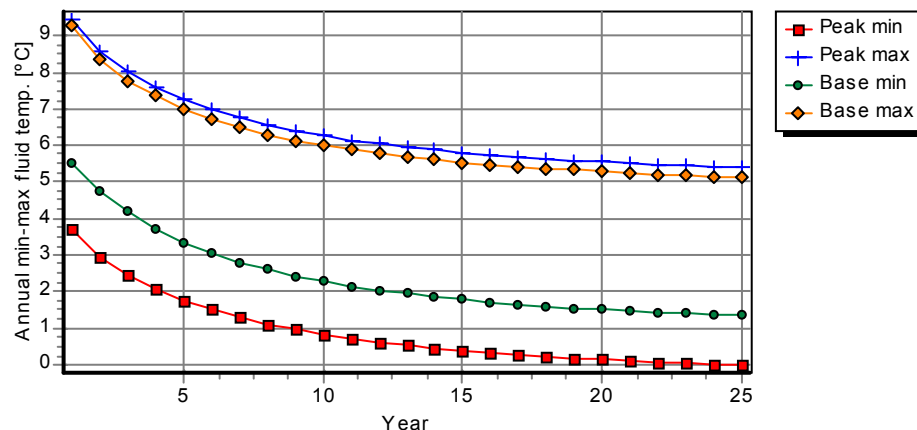
Figuur 3 Jaarbelastingduurkromme (voorbeeld).

Hoe hoger het aantal equivalente vollasturen, hoe lager het specifieke vermogen [W/m] van de energiepalen (zie hoofdstuk 4).



Figuur 4 Verband tussen opgesteld vermogen (voor de basislast) en bijdrage in de totale warmtebehoefte.

2.4.3 Regeneratie van de bodem



Figuur 5 Benodigde medium temperatuur bij gelijkblijvend vermogen zonder regeneratie (voorbeeld berekend met EED).

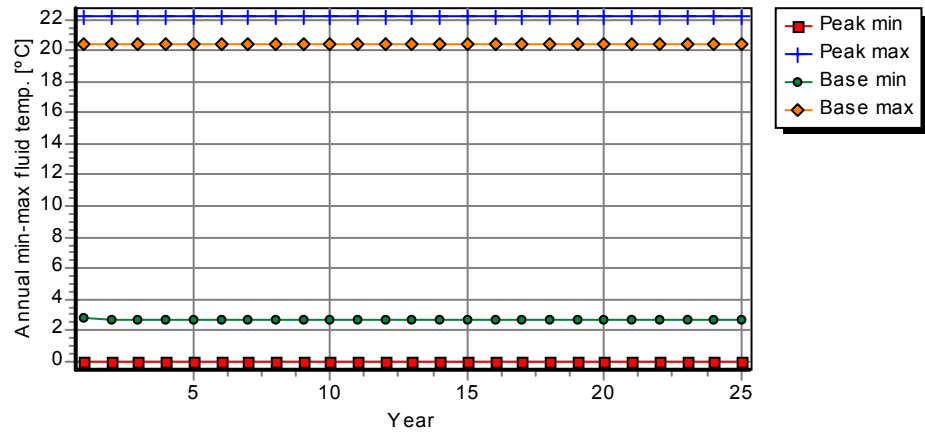
De prestaties van energiepalen zijn beter naarmate de hoeveelheid warmte die aan de bodem wordt onttrokken (voor verwarming) en toegevoerd (voor koeling) meer in evenwicht is. Wanneer alleen warmte wordt onttrokken zal de temperatuur in de bodem rond de palen in de loop van de jaren dalen en is een steeds lagere medium temperatuur nodig om hetzelfde vermogen aan warmte te onttrekken (zie figuur 5¹).

Bij gelijkblijvende mediumtemperatuur in de palen zou het vermogen dalen. Door ook warmte toe te voeren aan de bodem wordt deze ‘geregenereerd’: bij even grote hoeveelheden warmte onttrekking en warmtetoevoer blijft de bodemtemperatuur in de loop van de jaren gelijk (zie figuur 6).

¹ Toelichting bij figuur 5 en 6:
in deze figuren is het berekende temperatuurverloop te zien over een periode van 25 jaren van de gemiddelde medium temperatuur tijdens een aantal verschillende bedrijfssituaties:

- “Peak min”: laagste waarde tijdens piekbedrijf warmteonttrekking
- “Peak max”: hoogste waarde tijdens piekbedrijf warmtetoevoer (bij koeling van het gebouw)
- “Base min”: laagste waarde per jaar bij gelijkmatige maandelijkse verdeling van de warmtevraag
- “Base max”: hoogste waarde per jaar bij gelijkmatige maandelijkse verdeling van de warmtetoevoer (bij koeling van het gebouw)

Bij de in figuur 6 weergegeven bedrijfsvoering vindt geen warmtetoevoer plaats; hier geven de waarden van “Peak max” en “Base max” een indicatie van de bodemtemperatuur direct naast de energiepalen wanneer tijdens de zomer geen warmte wordt onttrokken.



Figuur 6 Benodigde medium temperatuur bij gelijkblijvend vermogen met volledige regeneratie (voorbeeld berekend met EED).

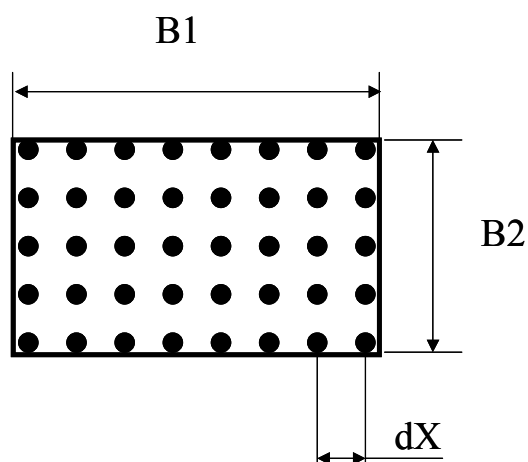
Er zijn verschillende mogelijkheden om de bodem te regenereren:

- Door passieve koeling van het gebouw.
Het gebouwssysteem wordt via een warmtewisselaar aan het bodemsysteem gekoppeld. Hiermee is koeling met een beperkt vermogen en hoeveelheid mogelijk. De bodem kan slechts gedeeltelijk worden geregenereerd.
- Door actieve koeling van het gebouw.
Bij actieve koeling wordt de verdampers van de warmtepomp aan het gebouwssysteem gekoppeld. De condensorwarmte wordt daarbij aan de bodem toegevoerd. Bij actieve koeling is het in de meeste gevallen mogelijk de bodem volledig te regenereren.

2.4.4 Door toevoer van zonnewarmte via collectoren. Opstellingsvorm

Voor de prestatie van energiepalen zijn twee verschillende opstellingsvormen van de palen relevant:

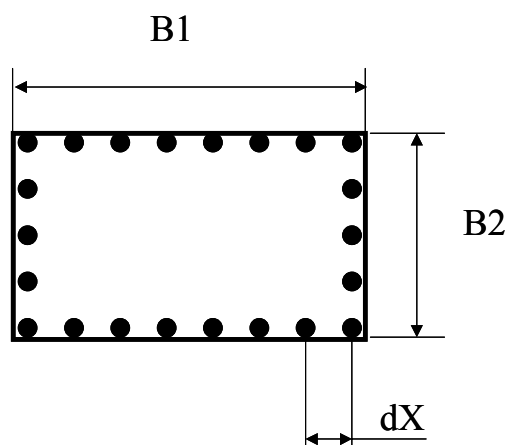
- i) Gevulde matrix opstelling: onder het gebouw worden zoveel mogelijk heipalen ‘geactiveerd’ tot energiepaal. Hierbij geldt de restrictie dat de onderlinge afstand van de energiepalen gemiddeld minstens 3 tot 3,5 m moet zijn.



Figuur 7 Gevulde matrix opstelling

- ii) Randopstelling: alleen de heipalen aan de rand van het gebouw worden geactiveerd. Ook hier geldt dat de onderlinge afstand minimaal 3 tot 3,5 m moet zijn.

De Randopstelling levert in de situatie zonder regeneratie hogere vermogens per meter energiepaal. Uiteraard zijn er dan wel minder meters energiepaal beschikbaar.



Figuur 8 Randopstelling.

De in figuur 7 en 8 weergegeven opstellingen vormen twee uitersten. In de praktijk komen ook mengvormen voor (zie ook paragraaf 5.2, toewijzen energiepalen).

2.4.5 Onderlinge afstand

De onderlinge afstand tussen de energiepalen is vooral van belang wanneer er geen regeneratie plaatsvindt. In dit geval beïnvloeden ze elkaar negatiever naarmate ze dichter bij elkaar staan omdat de omringende bodem minder goed warmte kan toevoeren.

Bij volledige regeneratie wordt met name de opslagfunctie van de bodem gebruikt en is de invloed van de onderlinge afstand gering.

2.4.6 Bodemsoort

De invloed van de bodemsoort op de prestaties van de energiepalen is voor de meeste locaties in Nederland beperkt. Uitzonderingen vormen delen van Zuid-Limburg met een lage grondwaterstand en gebieden met dikke veenlagen zoals in de omgeving van Gouda.

2.4.7 Grondwaterstroming

De invloed van grondwaterstroming op de prestaties van de energiepalen is afhankelijk van de mate van regeneratie, of anders gezegd van de functie van het bodemsysteem. Wanneer alleen warmte wordt onttrokken (geen regeneratie) heeft grondwaterstroming (door de bodemlaag waarin de energiepalen zich bevinden) een positieve invloed op de prestaties: er wordt steeds nieuwe warmte aangevoerd en de bodem raakt minder snel ‘uitgeput’.

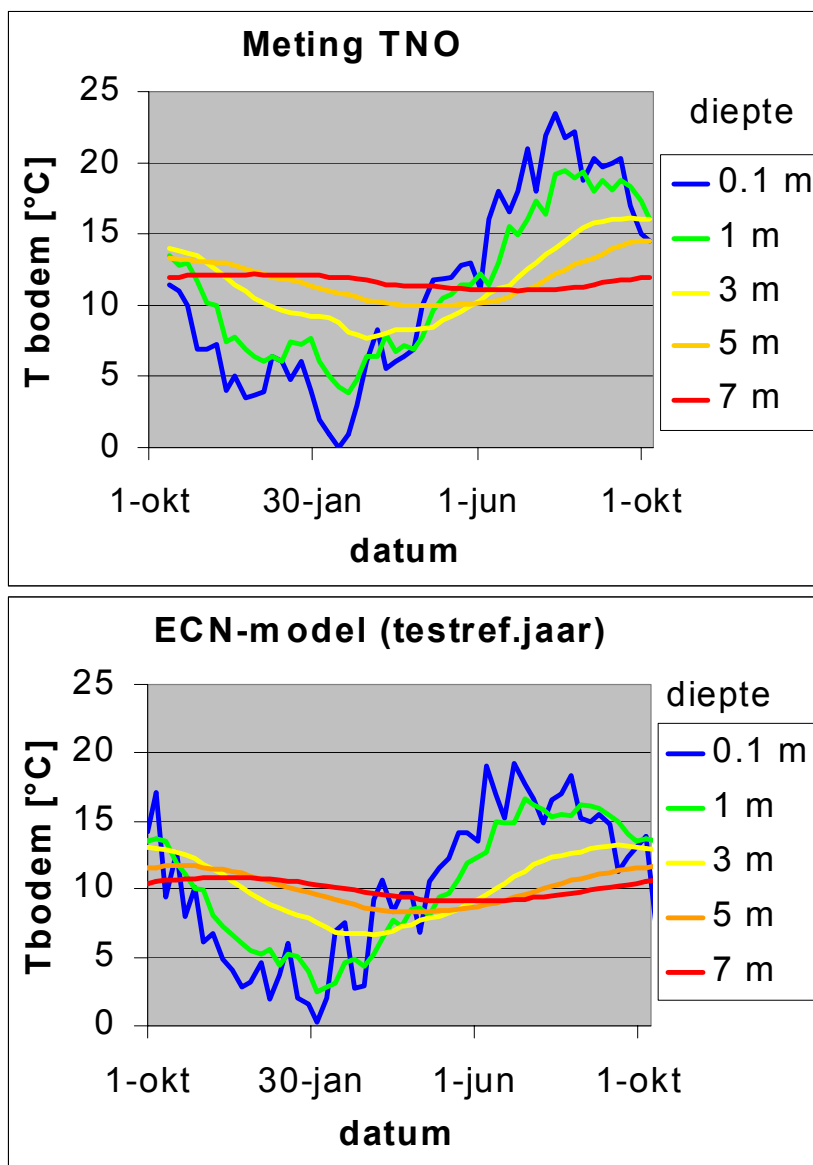
Wanneer de bodem een opslagfunctie heeft (volledige regeneratie) heeft grondwaterstroming een negatieve invloed op de prestaties: de opgeslagen warmte of koude wordt door het grondwater afgevoerd en is (afhankelijk van de snelheid) niet of slechts gedeeltelijk beschikbaar op het moment dat deze, een half jaar later, weer benut kan worden.

2.4.8 Seizoensinvloeden

Doordat de energiepaal zich in de bovenste laag van de bodem bevindt heeft de luchttemperatuur en de zoninstraling (een beperkte) invloed op de prestatie van de energiepaal. Deze invloed is groter bij een systeem met randopstelling dan bij een systeem met een gevulde matrix opstelling vanwege de “schaduw” van het gebouw dat op de energiepalen staat.

De invloed op de bodemtemperatuur is weergegeven in figuur 9a en 9b.

Hierin is duidelijk zichtbaar dat de invloed afneemt met de diepte en dat met de diepte tevens een verschuiving in de tijd waarneembaar is.



Figuur 9 Invloed van de luchttemperatuur en zonninstraling op de ongestoorde bodemtemperatuur.

2.5 Praktische aspecten

2.5.1 productie/fabricage

In energiepalen zijn over vrijwel de gehele lengte van de heipaal buizen aangebracht, waardoor het mengsel van water en antivries stroomt.

De buizen kunnen op verschillende manieren in de paal zijn aangebracht. Figuur 10 laat zien hoe twee U-vormige pijplussen aangebracht zijn in een vierkante heipaal

[Voorbij Prefab Beton]; deze vorm wordt momenteel (2003) het meest toegepast. Een andere nieuw ontwikkelde vorm is een co-axiale pijp in een holle heipaal [Betsonson].



Figuur 10 Mallen voor de energiepalen (links) en de uiteinden van de pijpen in de energiepaal (rechts).

2.5.2 Kosten

De kostprijs van een warmtepomp neemt ruwweg proportioneel toe met het vermogen van de warmtepomp. Een voor de hand liggende manier om de kosten te verminderen is het verkleinen van het thermisch vermogen. Dit is onder andere te bereiken door de warmtepomp in te zetten voor de basislast, terwijl een andere verwarmingsbron, zoals bijvoorbeeld een c.v. ketel, voor het piekvermogen zorgt. Bij dimensionering van de warmtepomp op 50% van de pieklast, kan een warmtepomp voorzien in ca. 90 procent van de jaarlijkse vraag naar warmte (zie 2.4.2). Voor de levering en montage van een energiepalensysteem, waarbij de demarcatie is gesteld op het aansluitpunt aanvoer/retour in de technische ruimte, dient ten opzichte van normale heipalen rekening te worden gehouden met een meerprijs van \pm € 600 per kW onttrekkingsvermogen (exclusief EIA). Er wordt hierbij uitgegaan van een onttrekkingsvermogen van 35 W per meter thermisch effectieve paallengte (voor een berekeningsvoorbeeld zie paragraaf 6.2).

2.6 Resultaten uit reeds gerealiseerde projecten

De interessantste toepassingen zijn momenteel vooral gerealiseerd in situaties waar zowel verwarming als koeling nodig is (zie de voorbeeldprojecten in hoofdstuk 6).

In kantoren dient over het algemeen te worden gekoeld en verwarmd. Echter ook voor grotere en/of luxere woningen en appartementencomplexen is de toepassing van energiepalen zinvol.

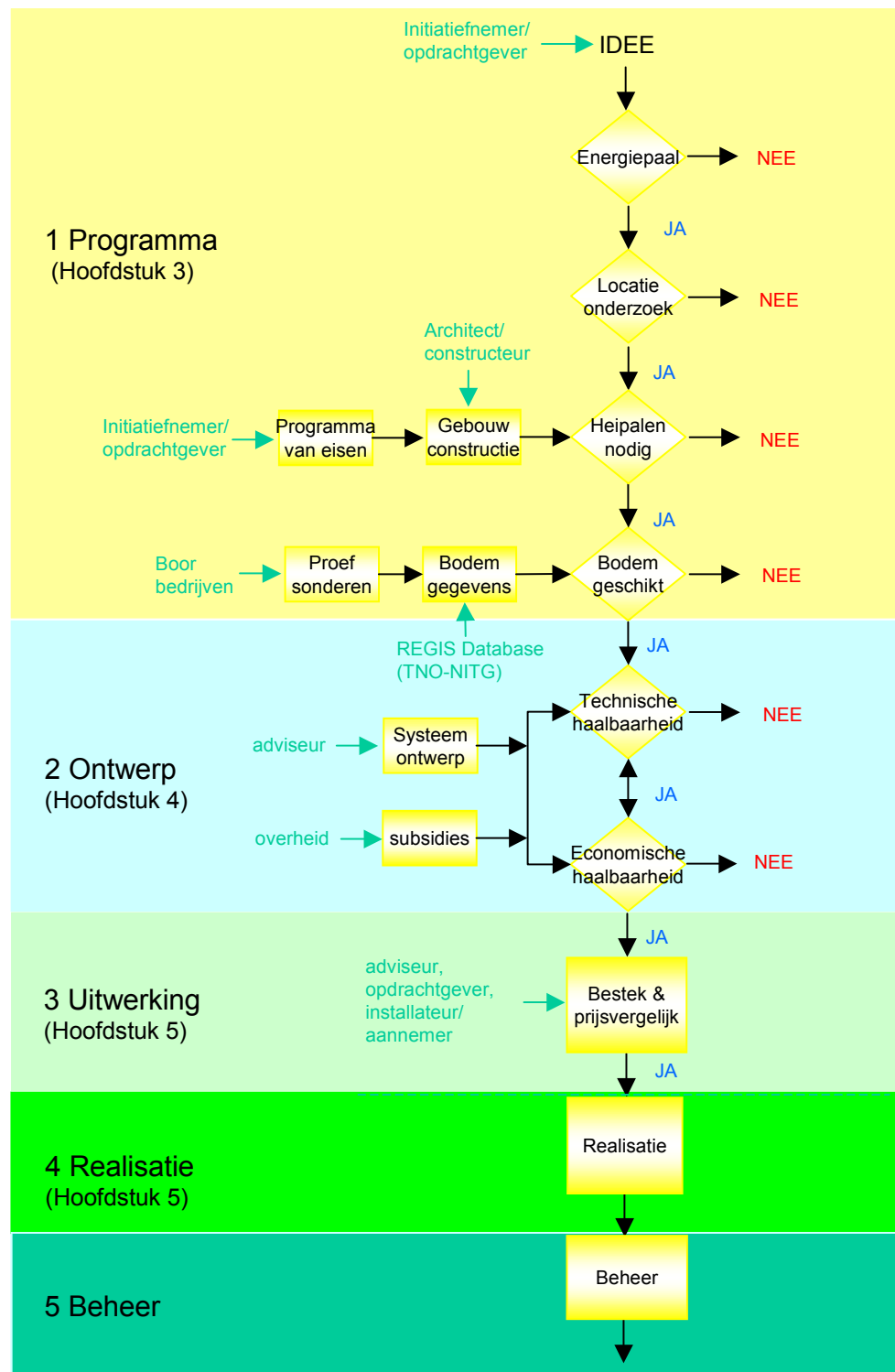
Een systeem waarin energiepalen in combinatie met een warmtepomp zijn toegepast, kan beide functies vervullen. De investering in een aparte koelmachine (en de jaarlijkse energiekosten hiervan) kan achterwege blijven. Dit maakt energiepalen niet alleen energetisch, maar ook economisch tot een interessante optie.

Uit de reeds gerealiseerde projecten zijn een aantal aspecten naar voren gekomen die van belang zijn voor het opzetten van een goed energiepalen/warmtepomp-project:

- 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.
Let daarbij op de bedrijfscondities in de leveranciers documentatie: vergelijk de COP's van verschillende warmtepompen alleen bij de zelfde 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.

2.7 Procesfasen

Het hele proces van oorspronkelijk idee om energiepalen eventueel toe te passen tot het uiteindelijke beheer, is in figuur 11 weergegeven.



Figuur 11 Processchema.

In de volgende hoofdstukken worden de belangrijkste aspecten van de verschillende fasen nader toegelicht:

- voorontwerp/haalbaarheid: hoofdstuk 3;
- dimensionering: hoofdstuk 4;
- uitwerking en uitvoering: hoofdstuk 5.

3. Globale haalbaarheid

In de programmafase worden de technische en economische haalbaarheid onderzocht.

Hier toe dienen een aantal gegevens verzameld te worden en globale uitgangspunten voor de dimensionering te worden vastgesteld waarmee kan worden beoordeeld of het toepassen van energiepalen zinvol is.

3.1.1 Benodigde gegevens vooronderzoek

Allereerst dient nagegaan te worden of de bodem geschikt is voor het toepassen van energiepalen.

De volgende aspecten spelen daarbij een rol:

1. Algemeen: overige leidingsystemen in de bodem: dit zal bij nieuwbouw op bijvoorbeeld bedrijventerrein normaliter geen problemen opleveren. De aanwezigheid van leidingen in de bodem kan worden opgevraagd bij KLIC in Maarsse [KLIC].
2. Grondwaterstroming: deze heeft invloed op de prestaties, is echter niet zonder simulatiesoftware te kwantificeren (zie 2.4.7 en 4.2).
3. Energieopslag (aquifer) in de nabije omgeving: indien het naastliggende of onderliggende bodemdeel als aquifer wordt gebruikt dienen de effecten hiervan in de dimensionering van de energiepalen te worden beoordeeld. In de meeste gevallen zal interactie tussen beide systemen ongunstig zijn.
4. Aangrenzende bodemwarmtesystemen: hiervoor geldt hetzelfde als vermeld bij 3. (aquifer).
5. Bodem opbouw: in de programmafase alleen van belang indien sterk afwijkend van de in Nederland veel voorkomende gelaagde zand en klei structuur: gebieden met veel veen (bijvoorbeeld omgeving Gouda/Reeuwijk) of lage grondwaterstanden (Zuid Limburg).
6. Voor een eerste benadering in deze haalbaarheidsfase kan de “Bodemkaart van Nederland” [IF Technology] orden gebruikt.

3.1.2 Eisen

Momenteel zijn geen extra eisen van toepassing of vergunningen nodig voor de toepassing van energiepalen in plaats van gewone heipalen.

Mogelijk gelden bijzondere bepalingen voor waterwingebieden (introductie van verontreinigingen en het doorboren van waterscheidende lagen is niet toegestaan) of locaties in de directe omgeving van dijken of andere waterkerende voorzieningen (de waterkerende functie mag niet in gevaar worden gebracht).

Het is 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 tussen aanvoer en retourtemperatuur (bij langdurig optreden van lagere temperaturen bestaat het gevaar dat de buitenkant van de energiepaaal kouder dan 0 °C wordt, waardoor bij bevriezing van de bodem de draagkracht van de paal kan verminderen).
De laagst toelaatbare aanvoertemperatuur (van de warmtepomp-verdamper naar de energiepaaal 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.

3.1.3 Globale dimensionering; kengetallen en vuistregels voor een eerste benadering

Onderstaande waarden zijn ter indicatie, afhankelijk van de specifieke omstandigheden kunnen afwijkende waarden optreden.

Voor nieuwbouw kantoren kunnen op basis van het bruto vloeroppervlak, de specifieke waarden voor de warmtevraag worden aangehouden zoals vermeld in tabel 1.

Uitgangspunten hierbij zijn:

- R_c ¹ dichte gevel en dak 4 tot 5 K.m²/W;
- U-waarde² raam (+kozijn) 1,5 tot 1,8 W/m².K;
- goede kierdichting (q_{v-10} ³= 30).

Deze isolatiewaarden zijn “strenger” dan de minimale eisen volgens het Bouwbesluit en/of een EPC van 1,9.

¹ Kengetal voor thermische isolatie, hoger de R_c -waarde, hoe beter de isolatie.

² Warmtedoorgangscoefficiënt, hoe lager de U-waarde, hoe beter de isolatie.

³ Kengetal voor de tochtichtheid, hoe lager de waarde hoe beter de kierdichting.

Tabel 1 Kengetallen kantoerverwarming.

	Vermogen W/m ² b.v.o. ¹⁾	Behoefte kWh/m ² b.v.o. ¹⁾ per jaar
Ontwerp (excl. opwarmtoeslag)	25 - 40	
Netto (na aftrek interne warmtelast)	15 - 30	20 - 40

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

Grote en compacte gebouwen bevinden zich in het lagere deel van de aangegeven vermogensrange (tabel 1); kleine en langgerekte gebouwen bevinden zich in het hogere deel van de vermogensrange.

Voor gebouwen die volgens de minimale eisen zijn geïsoleerd ($R_c = 2,5 \text{ K.m}^2/\text{W}$) gelden tabelwaarden die ca. 50% hoger liggen.

Indien beter onderbouwde gegevens bekend zijn uit het programma van eisen en het bouwkundig ontwerp, dient daarvan gebruik gemaakt te worden.

Voor vertaling naar de warmtevraag aan het bodemsysteem dienen deze waarden met $0,8^1$ te worden vermenigvuldigd (vanwege het rendement van de warmtepomp).

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 energiepaa. Indien er meer heipalen zijn, dienen de overige palen niet geactiveerd te worden.

Bepaal aan de hand van het beschikbare oppervlak (footprint van het gebouw) hoeveel energiepalen maximaal geplaatst kunnen worden.

Rekenvoorbeeld

- Uitgangspunten:
 - Kantoor: langgerekt gebouw, wordt voorzien 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.
- Ga uit van een ontwerpvermogen voor verwarming (zonder opwarmtoeslag) van ca. 40 W/m²: $3000 \text{ m}^2 * 40 \text{ W/m}^2 = 120 \text{ kW}$, en een netto maximum vermogen van ca. 30 W/m²: 90 kW.

¹ Uitgangspunt in het voorontwerp is een COP van 5. Voor het bodemsysteem is dit een veilige aanname; bij een slechter presterende warmtepomp wordt minder warmte aan de bodem onttrokken.

- De warmtepomp dient 45 kW (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 $36 \text{ kW} / 30 \text{ W/m} = 1200$ m lengte aan energiepalen nodig. Bij een bruto paallengte van 22 m is de effectieve energiepaaallengte ca. 20 m.
- Er zijn dus 60 energiepalen nodig.
- Bij gelijkmatige verdeling over de footprint van het gebouw is $1000 \text{ m}^2 / 60$ energiepalen = 17 m^2 per energiepaal beschikbaar.
- Dit is meer dan het minimum van 10 – 12 m^2 per energiepaal.

Conclusie uit deze eerste benadering:

het is technisch mogelijk met een energiepalensysteem (en een warmtepomp) ca. 50% van de piekvraag voor verwarming te verzorgen; daarmee kan normaal gesproken ruim 90% van de jaarlijkse behoefte worden gedekt (zie figuur 5).

3.1.4 Energiebesparing

Globaal gelden de volgende vuistregels bij het bepalen van de energiebesparing wanneer energiepalen worden toegepast (in combinatie met warmtepompen):

- bij warmtelevering aan het gebouw:
 - voor elke bespaarde m^3 aardgas (de warmtepomp levert warmte in plaats van een cv-ketel) is ca. 2 kWh extra elektriciteit nodig;
- bij koudelevering aan het gebouw middels passieve koeling (de energiepalen leveren direct koeling in plaats van een luchtgekoelde koelmachine):
 - voor elke 3 kWh koeling wordt 1 kWh elektriciteit bespaard;
- bij koudelevering aan het gebouw middels actieve koeling (de warmtepomp, gekoeld door de energiepalen, levert koeling in plaats van een luchtgekoelde koelmachine):
 - voor elke 5 kWh koeling wordt 1 kWh elektriciteit bespaard.

4. Dimensionering

De hier beschreven dimensionering gaat uit van de warmtevraag van een klimaatstelsel. De warmtepomp is dus in eerste instantie bedoeld om te verwarmen. Bij systemen waarin zowel wordt verwarmd als gekoeld, hetgeen de voorkeur heeft, is het uitgangspunt dat er niet méér warmte in de bodem wordt gebracht dan aan de bodem wordt onttrokken.

Ten aanzien van het ontwerp van een energievoorziening met energiepalen, kunnen simulatie modellen gebruikt worden voor de bepaling van:

1. de warmte- en koudebehoefte van een gebouw
2. het aantal meters effectieve warmtewisselaar
3. de energiebalans in de bodem op de lange termijn

Belangrijke input voor deze simulaties zijn:

- de bouwfysische eigenschappen en
- het gebruik van het gebouw,
- de invloed van klimaat en gebouw op het betreffende bodempakket en
- de eigenschappen van de bodem, voornamelijk warmtegeleiding en grondwaterstroming.

Simulatiemodellen die bovengenoemde punten omvatten zijn inmiddels beschikbaar. Voor de meeste van deze modellen geldt dat het bereik en de kwaliteit continu verbeterd wordt door de software ontwikkelaars.

4.1 Stappenplan voor de dimensionering

Stap 1: Bepaal de netto warmte en koude vraag van het gebouw

- 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.

Hierbij kan gebruik gemaakt worden van (één van) de volgende methoden:

- ISSO-53 (warmteverliesberekening kantoren)
- QuickScan Warmtepompen Utiliteit
- Andere methode naar eigen inzicht

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)

Indien de warmtebehoefte bekend is kan het aantal equivalente vollasturen per jaar voor verwarming worden berekend:

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

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

De netto paallengte is gelijk aan de bruto paallengte minus 2 m.

Voor het aantal heipalen dat zinvol geactiveerd kan worden tot energiepaal geldt het volgende (meestal wordt slechts een deel van de heipalen geactiveerd):

In de situatie dat alleen warmte aan de bodem wordt onttrokken kan als eerste uitgangspunt ca. 25 m² grondoppervlak per energiepaal worden gehanteerd. Als zowel warmte als koude aan de bodem wordt onttrokken (warmte-onttrekking plus regeneratie) kan gerekend worden met 10 tot 12 m² grondoppervlak per energiepaal .

De totaal beschikbare lengte is de netto paallengte maal het aantal geactiveerde heipalen

Stap 3: bepaal de totaal **benodigde** lengte aan de hand van de gewenste bedrijfsvoering en het bijbehorende gewenste bodemvermogen (monovalent/bivalent, wel of niet regenereren).

Opmerkingen:

Let hierbij op de vertaling van verwarmingsvermogen in het gebouw naar warmteleverend vermogen door het bodemsysteem (de energiepalen):

de verhouding tussen beide vermogens is afhankelijk van de COP van de warmtepomp:

$$f_{COP} = P_{bodem}/P_{gebouw} = (COP-1)/COP \quad (\text{voor de verwarmings situatie})$$

Dat wil zeggen bodemvermogen = $f_{\text{COP}} * \text{gebouwvermogen}$ (in verwarmingsbedrijf).

Bij een COP van 4 respectievelijk 5 is f_{COP} dus gelijk aan 0,75 respectievelijk 0,8.

Indien nog geen warmtepompgegevens bekend zijn ga dan veiligheidshalve uit van $f_{\text{COP}} = 0,8$ (in de praktijk worden daadwerkelijk COP's van 5 gerealiseerd (zie paragraaf 6.1)).

De richtwaarden in tabel 2 corresponderen met de volgende uitgangspunten:

- **Monovalent:**
de warmtepomp levert het volledige verwarmingsvermogen (ca. 1400 eq. vollast-uren):
 $P_{\text{bodem}} = f_{\text{COP}} * P_{\text{gebouw}}$;
- **Bivalent 50%:**
de warmtepomp levert 50% van het verwarmingsvermogen (ca. 2750 eq. vollast-uren):
 $P_{\text{bodem}} = f_{\text{COP}} * 0,50 * P_{\text{gebouw}}$;
- **Bivalent 25%:**
de warmtepomp levert 25% van het verwarmingsvermogen (ca. 4400 eq. vollast-uren):
 $P_{\text{bodem}} = f_{\text{COP}} * 0,25 * P_{\text{gebouw}}$;
- **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 lager is dan 15 á 20 W/m zullen slechts in uitzonderlijke gevallen interessant zijn (deze waarden staan tussen haakjes).

Tabel 2 geldt voor warmteonttrekking, 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 á 2 maal hogere waarden.

De onderstaande tabel is gebaseerd op berekeningen met het programma EED. Uit monitoringresultaten blijkt dat in de praktijk ook hogere waarden mogelijk zijn.

Met nadruk wordt gesteld dat de absolute waarden van de getallen in tabel 2 indicatief zijn, ze dienen met een nauwkeurigheid van +/- 20% te worden geïnterpreteerd. In specifieke situaties kunnen grotere afwijkingen optreden.

De onderlinge verhoudingen van de tabelwaarden hebben een betere nauwkeurigheid (onder de voorwaarde dat de overige omstandigheden gelijk zijn).

Tabel 2 Globale specifieke piekvermogens energiepalen.

Piekvermogen [W/m] T-toelaatbaar = 0 °C ¹					
		Gevulde matrix		Rand (open rechthoek)	
Opstelling		5 m	3,5 m	5 m	3,5 m
Tussenafstand energiepalen		5 m	3,5 m	5 m	3,5 m
Geen regeneratie	Monovalent	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

¹ T-toelaatbaar is het gemiddelde van aanvoer en retourtemperatuur, waarbij het verschil tussen aanvoer en retourtemperatuur 3 K bedraagt.

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 á 1,2.

In pure kleigrond zijn de specifieke vermogens iets lager (tot ca. 15% lager): tabelwaarden vermenigvuldigen met 0,8 á 0,9.

In pure veengrond zijn de specifieke vermogens echter veel lager (tot ca. 65% lager): tabelwaarden vermenigvuldigen met 0,35 á 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.

Rekenvoorbeeld

– Uitgangspunten:

Kantoorgebouw

– 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: Bepaal de beschikbare lengte aan energiepalen.
De effectieve lengte van de energiepalen is 15 m (17 - 2)
Het stempeloppervlak is 2000 m²; bij minimaal 11 m² per paal (want er kan worden geregenereerd) kunnen dus maximaal 1500/11= 136 energiepalen worden geplaatst. De totaal beschikbare lengte is dus 136 * 15 = 2040 m.
- Stap 3: bepaal het benodigde bodemvermogen.
Het maximaal vermogen is 180 kW; de jaarlijkse behoefte is 280 MWh; hieruit volgt een aantal equivalente 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: $f_{COP} = (4-1) / 4 = 0,75$.
Voor een systeem waarbij de totale warmtevraag door een warmtepomp gedekt moet worden is het bodemvermogen dus:
 $180 * 0,75 = 135 \text{ kW}$
- Stap 4: bepaal de benodigde lengte
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 kW / 50 W/m = 2700 m
 - Bivalent 50%: 68 kW / 28 W/m = 2430 m
 - Bivalent 25%: 34 kW / 21 W/m = 1620 m
- Stap 6: 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. Daarmee kan dan 80 – 90% (220 – 250 MWh) van de jaarlijkse warmtebehoefte worden gedekt (zie figuur 5).
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 verwarmings situatie 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: $0,75 (=f_{COP}) * 220 \text{ tot } 250 \text{ MWh}$
= 165 tot 190 MWh
 - warmtetoevoer: $1,2^1 * 150 \text{ tot } 170 \text{ MWh} = 180 \text{ tot } 200 \text{ MWh}$
(bij $COP_{\text{koeling}} = 5$)

¹ Bij actieve koeling is $f_{COP} > 1$ omdat de condensorwarmte aan de bodem wordt toegevoerd. Bij koeling geldt: $f_{COP} = (COP_{\text{koeling}} + 1) / COP_{\text{koeling}}$

4.2 Rekenprogramma's

Er zijn diverse commerciële rekenprogramma's beschikbaar om energiepalen door te rekenen. De belangrijkste zijn: Bodemtix, EED (Earth Energy Designer), TRNSYS en HST3D. In tabel 3 worden de kenmerken weergegeven.

Tabel 3 Kenmerken software tools om energiepalen door te rekenen.

	Bodemtix	EED (Earth Energy Designer)	HST3D	TRNSYS¹
Numerieke methode	Eindige volume methode	Quasi-analytisch	Eindige differentie	Eindige differentie
Model	<ul style="list-style-type: none"> - vrijheid geometrie - repeterende configuraties 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 grondwaterstroming - 4 typen VBWW's (1U, 2U, 3U, concentrisch) 	<ul style="list-style-type: none"> - vrijheid geometrie - repeterende configuraties mogelijk - gelaagdheid bodem - grondwaterstroming - VBWW als 'lijnbron' 	<ul style="list-style-type: none"> - vrijheid geometrie - repeterende configuraties mogelijk - geen gelaagdheid bodem - geen grondwaterstroming - vrijheid VBWW-type - buitentemperatuur per stap
Vraagpatroon	<ul style="list-style-type: none"> - Gevraagd vermogen per uur - begrenzing glycoltemperatuur mogelijk 	<ul style="list-style-type: none"> - basislast - pieklast 	<ul style="list-style-type: none"> - basislast - pieklast door superpositie 	<ul style="list-style-type: none"> - massastroom en intredetemperatuur
Uitvoer	<ul style="list-style-type: none"> - glycoltemperaturen (uurlijks/dagelijks) - dekkingspercentage - bodemtemperaturen (uurlijks/dagelijks) 	<ul style="list-style-type: none"> - VBWW-lengte 'glycol temperaturen' 	<ul style="list-style-type: none"> - bodemtemperaturen 	<ul style="list-style-type: none"> - mediumtemperatuur per stap - massastroom medium per tijdsstap - bodemtemperatuur op elk gewenst punt rond vbww - warmte-uitwisseling per tijdstap
Verkoop software	TNO-MEP http://www.mep.tno.nl/-software	Blocon Sweden http://www.buiding-physics.com	IF Technology http://www.iftechnology.nl/hst.htm	Transsolar Energietechnik 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.

5. Uitvoering

Tijdens de uitvoering zijn de volgende aandachtspunten te onderscheiden:

1. Energiepaal
 - Prefab voorgespannen betonnen energiepaal
 - Heien ‘op stuit’ of ‘op kleef’
 - Sonderen
2. Heiplan
 - Oorspronkelijk constructief heiplan
 - Toewijzen energiepalen
 - Bepaling uittredepunt van de slangen uit de energiepalen
3. Werktekeningen
 - Aanmaak van werktekeningen voor de productie van de heipalen
 - Verwerking van de nieuwe paalmerken in een aangepast heiplan (tussenstap)
4. Horizontaal slangensysteem
 - Ontwerp horizontaal slangensysteem
 - Tichelmannkoppeling
 - Seriekoppeling
 - Verwerken van het horizontaal slangensysteem in het definitieve heiplan
 - Wapeningsnetten ten behoeve van het horizontaal slangensysteem
5. Praktisch heiplan voor de heiwerkzaamheden
6. Hydraulische koppeling
 - Hydraulische koppeling verdelers/verzamelaars
 - Bijzonderheden verdelers/verzamelaars
7. Warmtetransport
 - Keuze van het warmtetransportmedium
 - Afpersen, vullen en ontluchten van de installatie
8. Hydraulisch balanceren van de installatie
 - Balanceren van de paalgroepen
 - Balanceren van de verdelers/verzamelaars
 - Inregelafsluiter in centrale retourleiding
 - Beveiliging van de installatie

Ieder aandachtspunt wordt in detail in de volgende paragrafen toegelicht.

5.1 Energiepaal

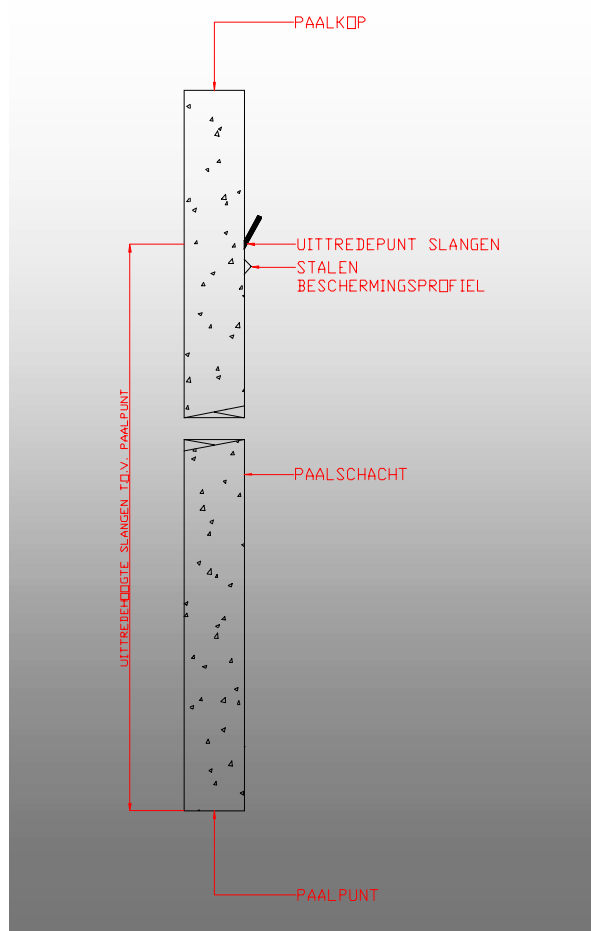
5.1.1 Prefab voorgespannen betonnen energiepaal

In figuur 12 is een prefab voorgespannen betonnen heipaal (een product van Voorbij Prefab Beton te Amsterdam) getekend, welke ook als energiepaal gebruikt kan

worden. Tijdens de fabricage van de paal, 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, op een vooraf bepaalde afstand van de paalpunt, 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 beschermt.



Figuur 12 Prefab voorgespannen betonnen energiepaal met twee PE-lussen.

5.1.2 Heien ‘op stuit’ of ‘op kleef’

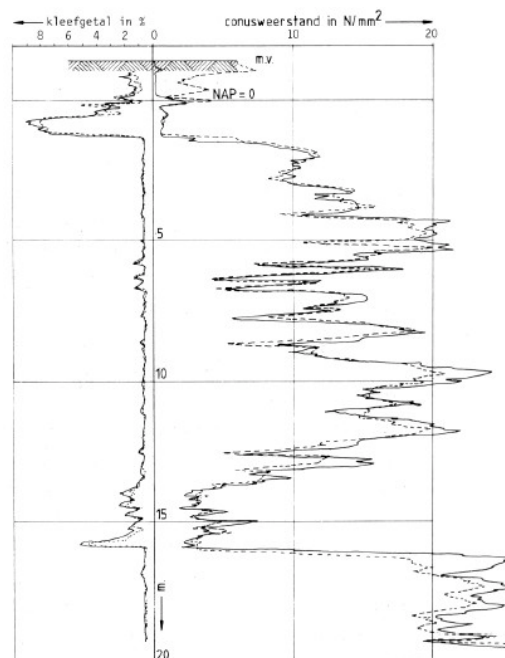
Er zijn twee manieren om te heien: ‘op stuit’ en op ‘kleef’. Welke manier gekozen wordt hangt sterk samen met de totale gebouwmassa en de bodemeigenschappen.

Bij heien op kleef wordt gebruik gemaakt van de ‘kleefkracht’ van de omringende bodem. Bij heien op stuit wordt een heipaal de bodem in geheid totdat het op een bodemlaag komt met voldoende dragende eigenschappen. De diepte van de laag wordt vastgesteld aan de hand van sonderingsinformatie. In figuur 13 is een voorbeeld van een sonderingsdiagram weergegeven.

5.1.3 Sonderen

Bij de toepassing van energiepalen is de fijnmazigheid waarmee de sonderingsmetingen zijn uitgevoerd, een belangrijk punt. Als bij een grofmazige meting blijkt dat er grote variaties zijn in de hoogte van de dragende laag (bij heien op stuit), dan moeten extra metingen worden verricht. Dit komt doordat de uittredehoogte van de slangen uit de energiepaal, van tevoren is bepaald en dus vastligt.

Als pas tijdens het heien blijkt dat de dragende laag (en daarmee de paalpunt) hoger uitkomt dan verwacht, dan geldt dit automatisch ook voor de uittredehoogte van de slangen. Als bovendien de paal niet verder in de dragende laag gedreven kan worden, dan kan dit problemen opleveren bij het snellen van de paalkoppen (beschadiging van de slangen) en bij het koppelen van de slangen aan het horizontale slangensysteem door te grote niveauverschillen. In het slechtste geval moet de energiepaalfunctie als verloren worden beschouwd en resteert alleen de constructieve functie.



Figuur 13 Sonderingsresultaat met kleefgetal en conusweerstand.

Als daarentegen tijdens het heien blijkt dat de dragende laag dieper ligt dan verwacht, dan moet er (meer) gegraven worden om het uittredepunt van de slangen te bereiken. Bovendien bestaat dan de mogelijkheid dat de slangen onder het grondwaterniveau uitkomen.

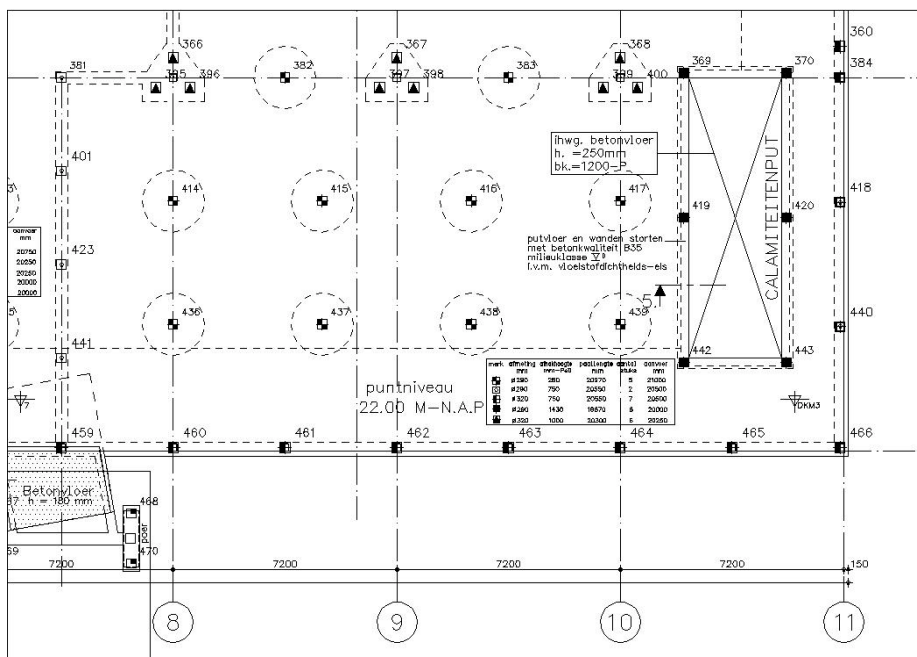
Bij het heien op kleef doet deze problematiek zich niet voor: de palen kunnen nauwkeurig op het ontwerpniveau worden geslagen. Hierdoor liggen ook de uittredepunten van de slangen bij de afzonderlijke palen op dezelfde hoogte.

Om extra werkzaamheden (en dus kosten) bij de koppeling van de energiepalen te voorkomen en de uitval van energiepalen tot een minimum te beperken, is het belangrijk het hebedrijf van tevoren goed te instrueren. Het heien moet nauwkeuriger worden uitgevoerd dan bij een 'normale' heiklus. Verder valt het aan te bevelen om een uitvoeringscontrole op de heiwerkzaamheden te laten uitvoeren door de partij die uiteindelijk de energiepalen moet aansluiten op het horizontale slangensysteem.

5.2 Heiplan

5.2.1 Oorspronkelijke constructieve heiplan

Meestal dient het oorspronkelijke constructieve heiplan als onderlegger voor de verschillende ontwerpfasen. In figuur 14 wordt een deel van zo'n heiplan weergegeven.



Figuur 14 Deel van het oorspronkelijke heiplan.

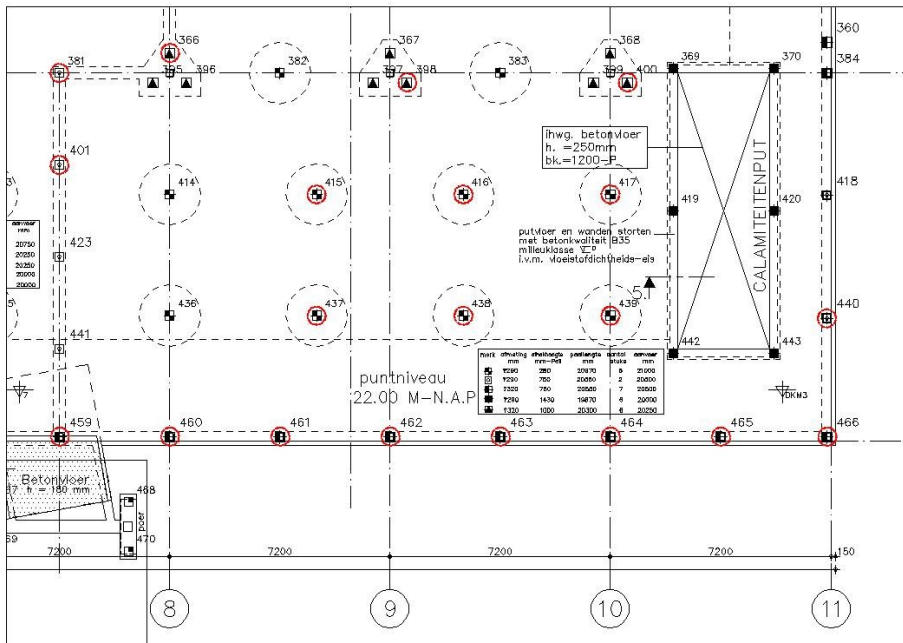
In het constructieve heiplan wordt iedere heipaal voorzien van een ‘merk’. In de legenda (renvooi) worden bijzonderheden van het merk aangegeven zoals afmetingen, afhakhoogte, belasting etc. In figuur 15 is een voorbeeld van een renvooi weergegeven.

Palen :		PEIL = 1000mm – N.A.P. steklengte = 300 mm				
prefab-betonpalen :						
merk	afmeting mm	punnivo M–N.A.P.	afhakhoogte mm–Peil	paallengte mm	max. bel. kN	aantal stuk
	∅ 350	Zie plattegrond	1000	Zie plattegrond	A 720–900	Zie plattegrond
	∅ 350		1000		A 720–900	
	∅ 350		750		A 720–900	
	∅ 320		1000		A 560–700	
	∅ 320		750		A 560–700	
	∅ 320		1580		A 560–700	
	∅ 290		280		A 400–500	
	∅ 290		750		A 400–500	
	∅ 290		1430		A 400–500	
	∅ 290		890		A 400–500	
	∅ 320		1220		A 400–500	
A = karakteristiek B = rekenwaarde			Palen afheien op aangegeven afheino, afroning paallengte in punnivo !			

Figuur 15 Renvooi behorende bij het oorspronkelijke heiplan.

5.2.2 Toewijzen energiepalen

De volgende stap is de bepaling welke heipalen als energiepaal geactiveerd zullen worden. In figuur 16 zijn de energiepalen gemarkeerd met een rode cirkel, zodat een ‘stippenplan’ ontstaat. De merken van de palen zijn in dit stadium nog niet aangepast ten opzichte van het oorspronkelijke heiplan.



Figuur 16 Voorlopige toewijzing van de energiepalen door middel van 'stippenplan'.

De (voorlopige) toewijzing van de energiepalen wordt meestal in de voorontwerpfase uitgevoerd en is het resultaat van de voorgenomen dimensionering en geometrie.

Bij de toewijzing worden eerst de palen aan de rand van het gebouw gekozen. Daar zullen zoveel mogelijk palen worden geactiveerd, echter met een onderlinge afstand van minimaal 3 m. Bij een stramenmaat van 1,80 m zal de onderlinge afstand dus 3,60 m zijn.

Indien aan de rand onvoldoende palen beschikbaar zijn, worden ook de palen in het middengebied geactiveerd. Hierbij dienen de energiepalen zo gelijkmatig mogelijk over het beschikbare gebied verdeeld te worden. Wanneer alleen warmte wordt onttrokken is een onderlinge afstand van minimaal 5 m aan te bevelen. Bij meer dan 50% regeneratie kan de gemiddelde afstand ca. 3,5 m bedragen (minimaal 10 – 12 m² grondoppervlak per energiepaal), zie ook paragraaf 3.1.3 en 4.1.

Voor de ondersteuning van zwaardere kolommen worden vaak meerdere palen dicht bij elkaar toegepast, in die situatie is het voldoende om één van de palen te activeren.

Het is van belang om in dit stadium al zoveel mogelijk praktische knelpunten te signaleren en ook op te lossen, om te voorkomen dat er tijdens een latere fase in het bouwproces (te) veel wordt afgeweken van de oorspronkelijke opzet.

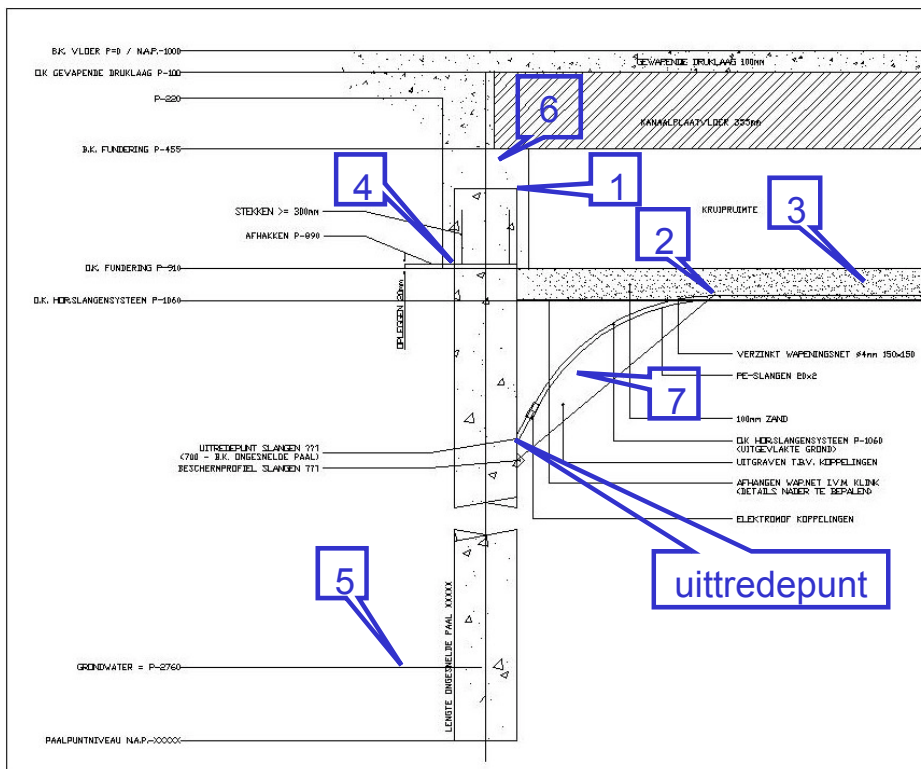
In de volgende paragrafen wordt het praktische energiepalensysteem stap voor stap verder uitgewerkt tot een definitieve vorm welke overdraagbaar is tussen alle deelnemers binnen het bouwproces.

5.2.3 Bepaling uittredepunt van de slangen uit de energiepalen

Voordat aan een energiepaal een merk kan worden toegekend (ten behoeve van opname in het uit te breiden renvooi), dient het uittredepunt van de slangen uit de palen bepaald te worden. Het uittredepunt wordt in belangrijke mate bepaald door de volgende factoren en kan veelal voor een aantal palen tegelijkertijd worden bepaald.

1. De minimale afstand van het uittredepunt tot de kop van de paal.
In de kop van de paal wordt extra wapeningsstaal aangebracht om de klappen tijdens het heien op te vangen. De afstand van het uittredepunt tot de paalkop dient minimaal 70 cm te bedragen.
2. Het niveau van het horizontale slangensysteem.
Het niveau van het horizontale slangensysteem moet worden aangepast aan het niveau van de horizontale funderingsdelen om ‘buiken’ in het slangensysteem te voorkomen. Voor een probleemloze koppeling van de energiepalen dient het niveau van de uittredepunten onder het horizontale slangensysteem te liggen. De minimale buigstraal van de te koppelen slangen is 40 cm bij PE80 - SDR11 - Zwart - 20 x 2 mm.
3. Om het beschadigingsrisico van het horizontale slangensysteem tijdens (en na) de bouwfase te beperken, wordt het afgedekt met een zandlaag van ca. 10 cm. Let hierbij op de minimaal vereiste hoogte in de kruipruimte.
Verder zorgt de zandlaag ervoor dat een eventuele kruipruimte ook na in bedrijfstelling nog bruikbaar is.
4. Het afhakniveau van de paal.
Na het heien worden de koppen van de heipalen gesneld om de stekken vrij te maken voor de koppeling met de horizontale funderingsdelen. Ter voorkoming van beschadiging van de paalslangen dient het uittredepunt minimaal 30 cm onder het afhakniveau te liggen.
5. Het grondwaterniveau.
Het uittredepunt van de paalslangen mag bij het heien niet onder het grondwaterniveau terecht komen (anders extra kosten voor bemaling).
6. Overige funderingsdetails.
Bij de bepaling van het uittredepunt als ook de uittrederichting van de slangen moet rekening worden gehouden met de mogelijkheid van overstekende funderingsdelen. Als hier van te voren geen rekening mee wordt gehouden kan dit in het slechtste geval resulteren in het niet meer kunnen koppelen van de energiepaal aan het horizontale slangensysteem.
7. Er dient rekening te worden gehouden met de noodzaak om te moeten graven dan wel om grond aan te moeten vullen om bij het uittredepunt de slangen te kunnen koppelen.

In figuur 17 worden bovenstaande criteria puntsgewijs aangegeven.



Figuur 17 Bepaling van het uittredepunt van de slangen uit een energiepaal.

Soms is het mogelijk kruising van de horizontale slangen met de horizontale funderingsdelen te voorkomen. Dit is het geval wanneer gebruik wordt gemaakt van een ‘funderingsvak’ waarbinnen voldoende energiepalen staan om een aparte verdelers/verzamelaar te plaatsen. Het horizontale legniveau kan dan boven de onderkant van de horizontale funderingsdelen worden gekozen. De graafwerkzaamheden worden zo tot een minimum beperkt.

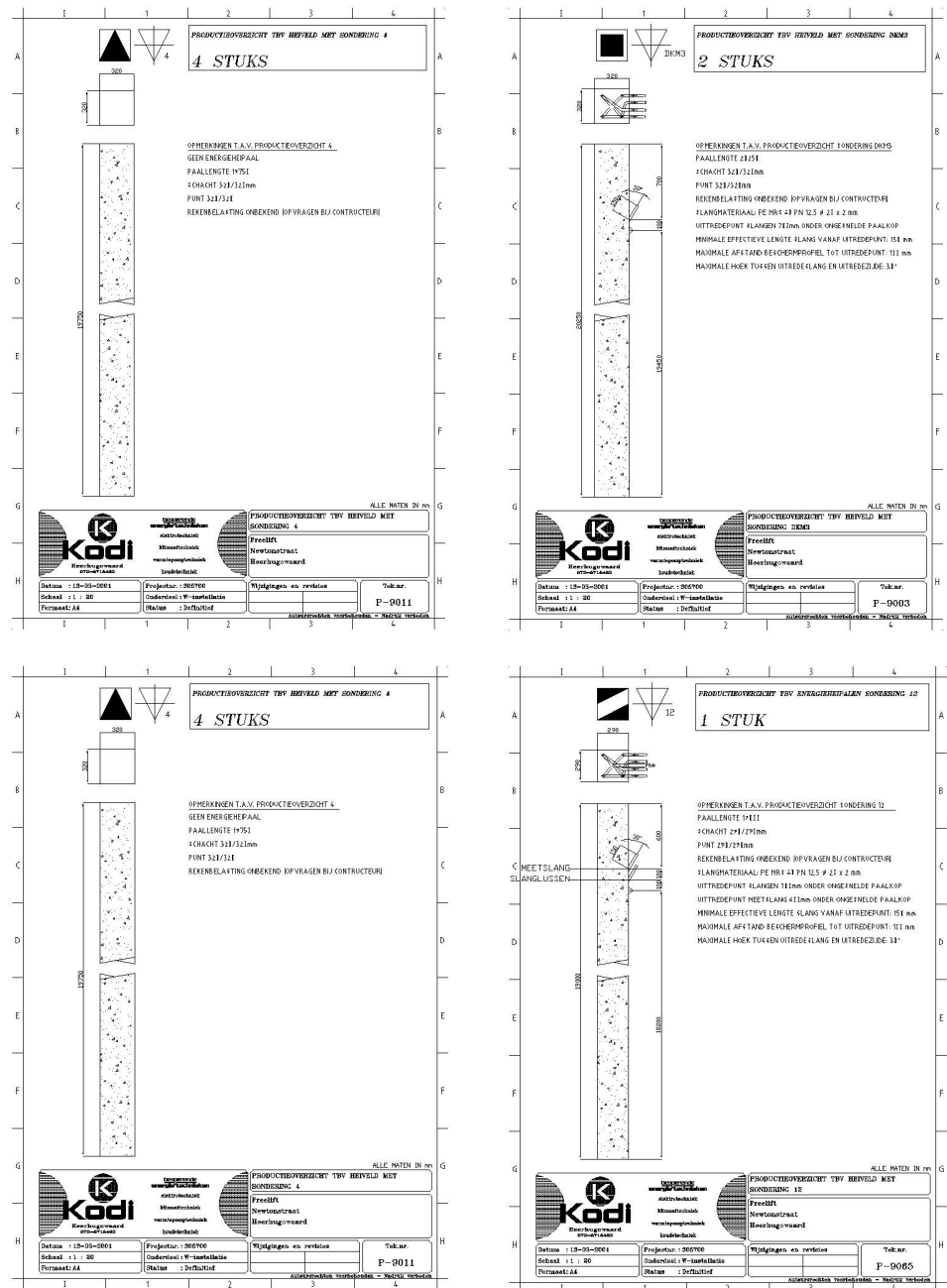


Figuur 18 Horizontaal niveau gekozen onder de funderingsbalken.

5.3 Werktekeningen

5.3.1 Aanmaak van werktekeningen voor de productie van de heipalen

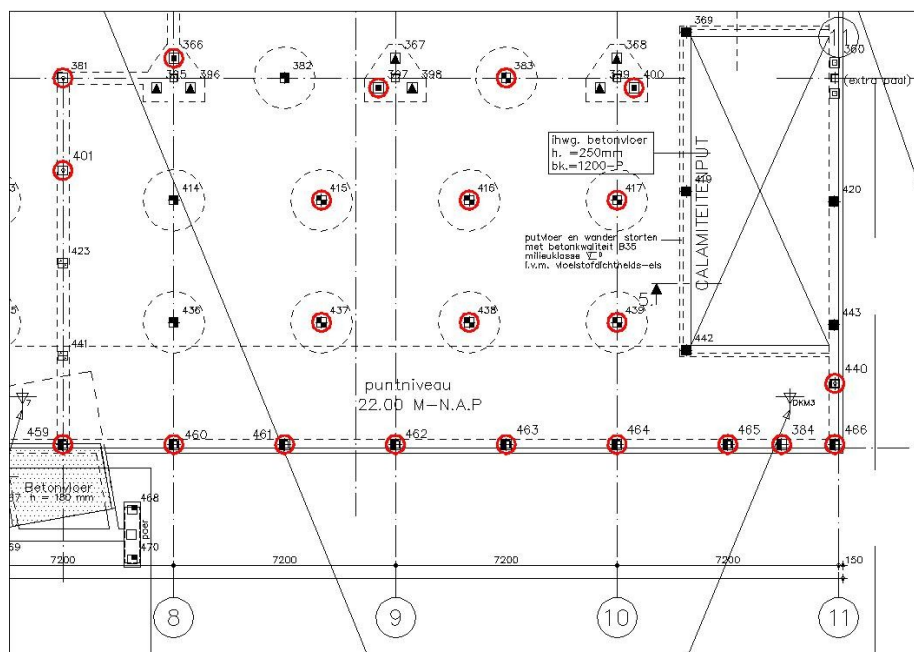
De volgende stap is het maken van de werktekeningen voor de productie van alle heipalen (ook de heipalen die niet als energiepaal worden uitgevoerd/geactiveerd). Op de werktekeningen worden, naast de fysieke bijzonderheden, ook de unieke paalmerken aangegeven die in het definitieve heiplan en renvooi worden gebruikt.



Figuur 19 Set werktekeningen voor de productie van heipalen.

5.3.2 Verwerken van de nieuwe paalmerken in een aangepast heiplan (tussenstep)

Als tussenstep kan een aangepast heiplan met een uitgebreider renvooi worden opgesteld (zie figuren 20 en 21).



Figuur 20 Aangepast heiplan (tussenstep).

○ = Energiepaal

Palen :		PELL = 1000mm - N.A.P.					
		steklengthe = 300 mm					
prefab-betonpalen : Exclusief palen fase 2							
merk	afmeting mm	puntnlvo M-N.A.P.	afkahoogte mm-Pell	paallengte mm	max. bel. kN	aantal stuks	Opmerkingen:
■	#350		1000		A B 720-900		helpaal
■	#350		1000		A B 720-900		helpaal
■	#350		750		A B 720-900		helpaal
■	#320		1000		A B 560-700		helpaal
■	#320		750		A B 560-700		energiepaal afgeleid van helpaal
■	#320		1580		A B 560-700		helpaal
■	#290		280		A B 400-500		energiepaal afgeleid van helpaal
■	#290		750		A B 400-500		energiepaal afgeleid van helpaal
■	#290		1430		A B 400-500		helpaal
■	#290		890		A B 400-500		energiepaal afgeleid van helpaal
■	#320		1220		A B 400-500		helpaal
■	#290		280		A B 400-500		helpaal
■	#290		750		A B 400-500		helpaal
■	#290		750		A B 400-500		helpaal
■	#320		1000		A B 560-700		energiepaal afgeleid van helpaal
■	#320		750		A B 560-700		helpaal
■	#320		750		A B 560-700		energiepaal afgeleid van helpaal
■	#320		750		A B 560-700		energiepaal afgeleid van helpaal
■	#350		1000		A B 720-900		energiepaal afgeleid van helpaal
■	#290		750		A B 400-500		energiepaal afgeleid van helpaal
■	#290		750		A B 400-500		energiepaal afgeleid van helpaal

A = karakteristiek
B = rekenwaarde

Palen afhalen op aangegeven afmeting, afkahoogte en paallengte in puntnlvo !

Totaal 470 st.

Figuur 21 Uitbreiding van het renvooi.

Aan het merk van een individuele heipaal worden de bijbehorende (unieke) eigenschappen gekoppeld die van belang zijn voor zowel de productie als het heien. Aan ieder merk ligt een uniek ontwerp ten grondslag.

5.4 Horizontaal slangensysteem

5.4.1 Ontwerp horizontaal slangensysteem

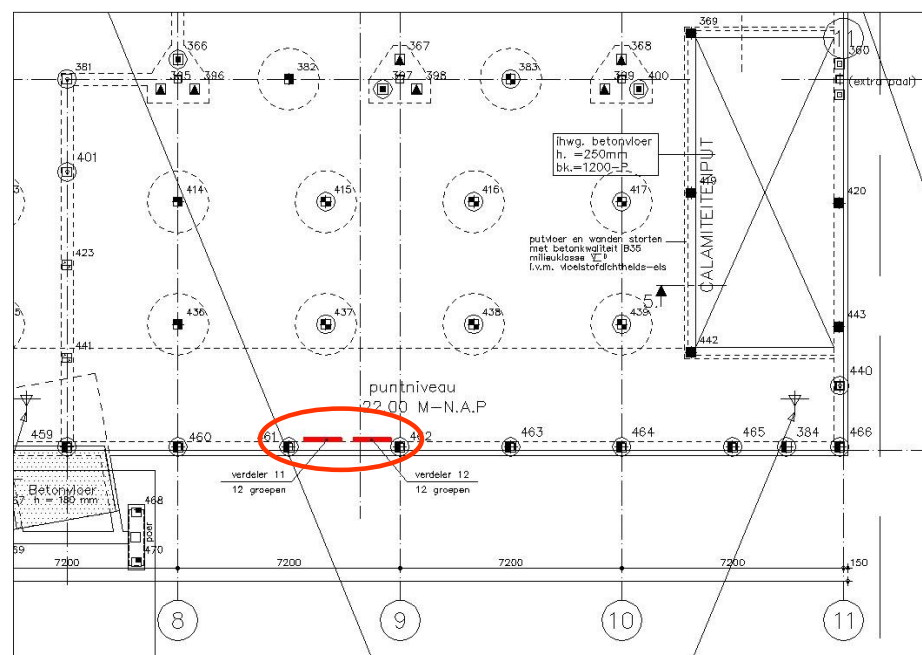
Aansluitend moet worden bepaald hoe de energiepalen onderling hydraulisch gekoppeld moeten worden. De hydraulische koppeling van de energiepalen wordt ook wel het 'horizontale slangensysteem' genoemd. Hierbij zijn twee punten van belang:

1. Plaatsing van de verdelers/verzamelaars (zie ook figuur 22).

De hydraulische koppeling van de slangen in de energiepalen wordt gerealiseerd met behulp van verdelers/verzamelaars (vergelijkbaar met vloerverwarming). De locatie van de verdelers/verzamelaars wordt in eerste instantie bepaald in overleg met de opdrachtgever. De definitieve plaatsing is afhankelijk van het maximaal aantal groepen per verdeler/verzamelaar en de gewenste hydraulische opvoerhoogte ter plaatse van de verdelers/verzamelaars (zie punt 2).

2. De Hydraulische opvoerhoogte die ter plaatse van de verdelers/verzamelaars beschikbaar moet zijn om het ontwerpdebiet te bereiken.

Een belangrijk gegeven is het aantal energiepalen welke hydraulisch in serie (kunnen) worden geschakeld.



Figuur 22 Plaatsing van de verdelers/verzamelaars (rode balken – rood omcirkeld)

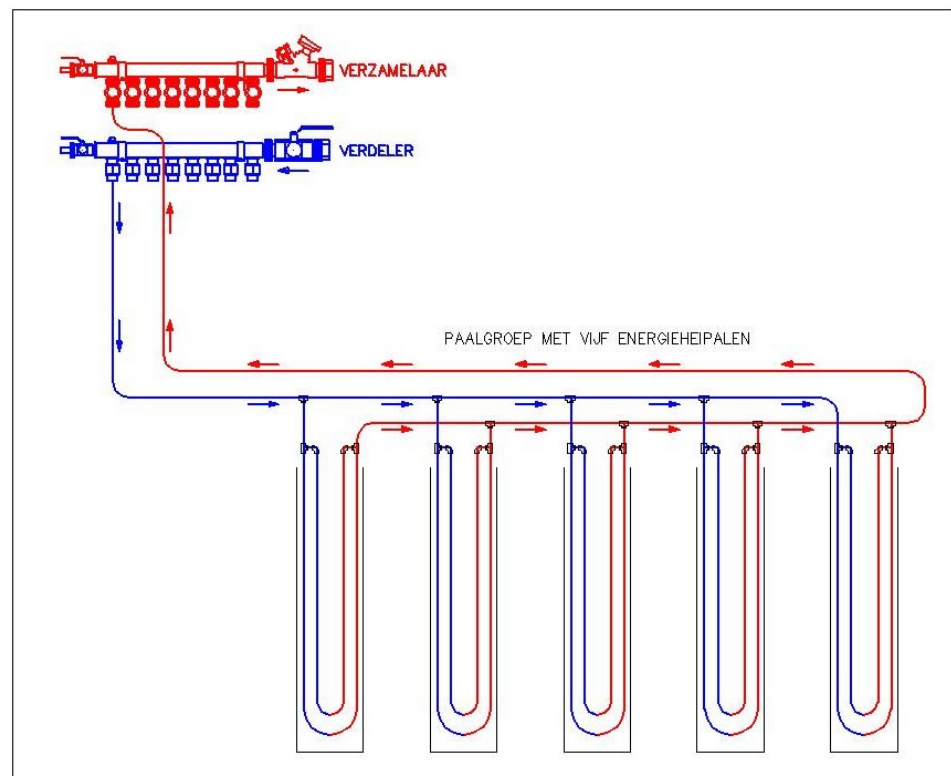
De toepassing van verdelers/verzamelaars op goed te bereiken plaatsen en de beperking van het aantal energiepalen per paalgroep verkleinen het afbreukrisico sterk: bij een eventuele lekkage binnen een paalgroep kan deze relatief eenvoudig worden gelokaliseerd. Aansluitend kan de paalgroep worden geïsoleerd van de rest van het energiepalensysteem. Bij systemen waarbij ondergrondse distributie plaatsvindt is dit moeilijker, dan wel onmogelijk. Bovendien maakt deze uitvoeringsvorm een goede deelbeproeving (drukproef) en een goede vulling/ontluchting per paalgroep mogelijk.

Zoals eerder aangegeven heeft de energipaal twee lussen (die elkaar in de paalpunt kruisen) en dus vier aansluitingen. Er zijn twee belangrijke methoden om de lussen te koppelen aan het hydraulische systeem: de Tichelmannkoppeling en de seriekoppeling.

5.4.2 Tichelmannkoppeling

Door twee T-stukken en twee kniestukken te plaatsen kunnen de twee paallussen parallel worden gekoppeld zodat er per paal één aanvoer- en één retourleiding ontstaat. Aansluitend kunnen een aantal palen worden opgenomen in een hydraulische paalgroep door middel van een Tichelmannkoppeling. Een voordeel van deze koppeling is dat de thermische belasting van iedere paal in de groep gelijkwaardig is en dat de leidingen tussen de verdeler/verzamelaar en de paalgroep beperkt blijven tot één aanvoer- en één retour (zie figuur 23).

De praktische consequentie van de Tichelmannkoppeling is dat er extra appendages nodig zijn: bij de tussenliggende palen in de paalgroep twee extra T-stukken (zes appendages per paal) en bij de eerste en de laatste paal nog één extra T-stuk (vijf appendages per paal). Als er wordt uitgegaan van de opname van vijf palen binnen een groep betekent dit dat er 18 T-stukken en 10 kniestukken nodig zijn (28 appendages per paalgroep).



Figuur 23 Tichelmann koppeling van energiepalen in een paalgroep.

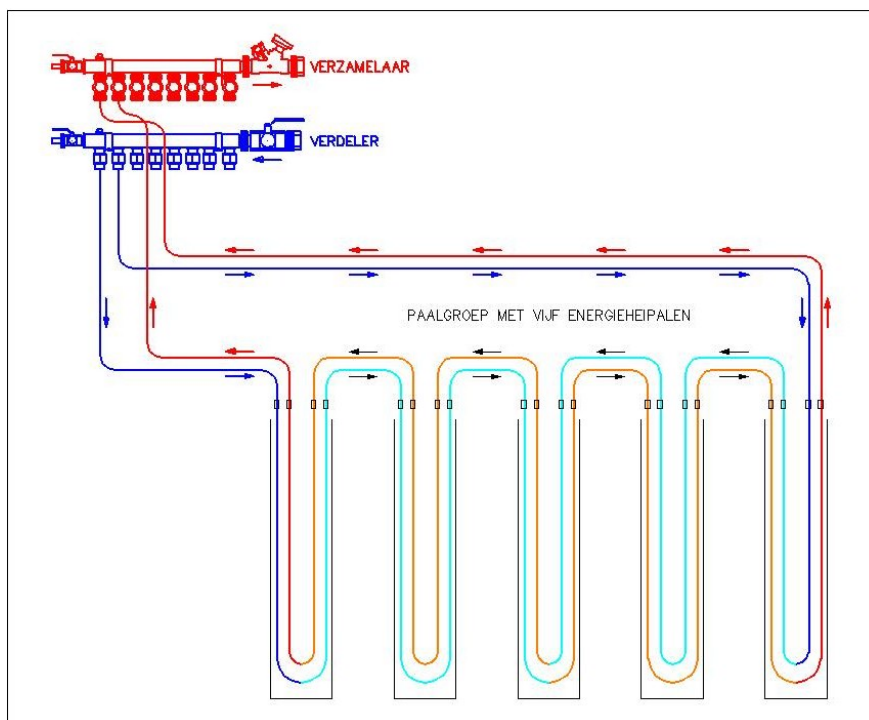
Door productietechnische aspecten wordt de aansluitlengte van de slangen buiten de paal beperkt tot ongeveer 15 cm. Daarnaast is de onderlinge afstand tussen de slangen ter plaatse van het uittredepunt zeer beperkt (hart-op-hart ongeveer 5 cm). Dit maakt de plaatsing van de genoemde appendages voor de parallelschakeling van de lussen in de paal moeilijk en dus kostbaar.

5.4.3 Seriekoppeling

Om de genoemde problemen bij de Tichelmannkoppeling te voorkomen is er gezocht naar een alternatieve oplossing. Dit heeft geresulteerd in een uitvoeringsvorm waarbij binnen een paalgroep één lus per paal in serie wordt gekoppeld met dezelfde lus in de volgende paal etc. Aansluitend wordt deze procedure omgekeerd herhaald met de overgebleven paallussen. Het is bij deze vorm belangrijk de twee aanvoer- en retourleidingen tussen de verdeler/verzamelaar en de paalgroep in ‘tegenstroom’ aan te sluiten om te voorkomen dat de thermische belasting onevenredig over de palen wordt verdeeld (zie figuur 24).

De praktische consequentie van deze vorm is dat er uitsluitend doorverbindmoffen benodigd zijn voor de koppeling van alle palen. Per paal zijn vier doorverbindmoffen nodig. Bij een paalgroep met vijf palen komt dit neer op 20 doorverbindmoffen.

fen. Naast het gegeven dat er acht appendages minder nodig zijn, zijn deze moffen goedkoper en (veel) eenvoudiger te monteren dan de T-stukken en kniestukken. Hier staat tegenover dat het leidingwerk toeneemt (per paalgroep twee aanvoer- en retourleidingen tussen de verdeler/verzamelaar). De snellere montagetijd maakt dit echter ruimschoots goed.



Figuur 24 Serie koppeling in 'tegenstroom' van energiepalen in een paalgroep.

Bij de Tichelmannkoppeling geldt voor iedere afzonderlijke energiepaal het ontwerp hydraulisch temperatuurverschil. Bij de seriekoppeling wordt dit temperatuurverschil min of meer verdeeld over de energiepalen binnen een paalgroep.

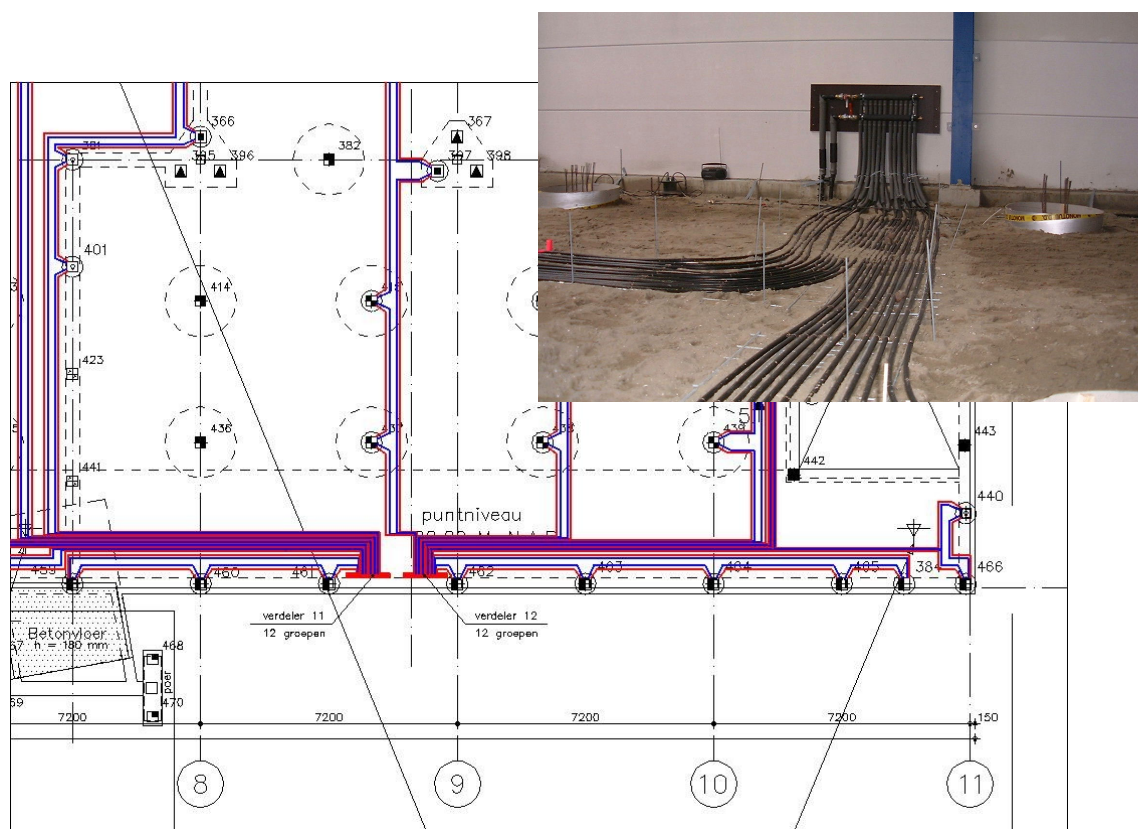
5.4.4 Verwerken van het horizontale slangensysteem in het definitieve heiplan

Doordat op één verdeler/verzamelaar meestal meerdere paalgroepen worden aangesloten, dient er bij de samenstelling van de verschillende paalgroepen naar te worden gestreefd de onderlinge totale leidinglengte per paalgroep zo veel mogelijk gelijk te houden. Op deze manier is het niet nodig groepsappendages op de verdeler/verzamelaar aan te sluiten voor het onderling hydraulisch balanceren van de groepen (inregelafsluiters).

Uiteraard speelt ook het praktisch legtraject van het horizontale slangensysteem een rol. In figuur 25 is gebruik gemaakt van 'paden' langs de horizontale funde-

ringsdelen en de te koppelen paalgroepen. Dit om de hoeveelheid wapeningsnetten te beperken, waarop de slangen van het horizontaal slangensysteem worden gevlochten.

De verschillende kleuren in figuur 25 geven één volledige hydraulische lus van een seriekoppeling binnen een paalgroep aan (aanvoerleiding van verdeler naar de paalgroep + onderlinge koppeling van de betreffende paallus + retourleiding naar de verzameelaar).

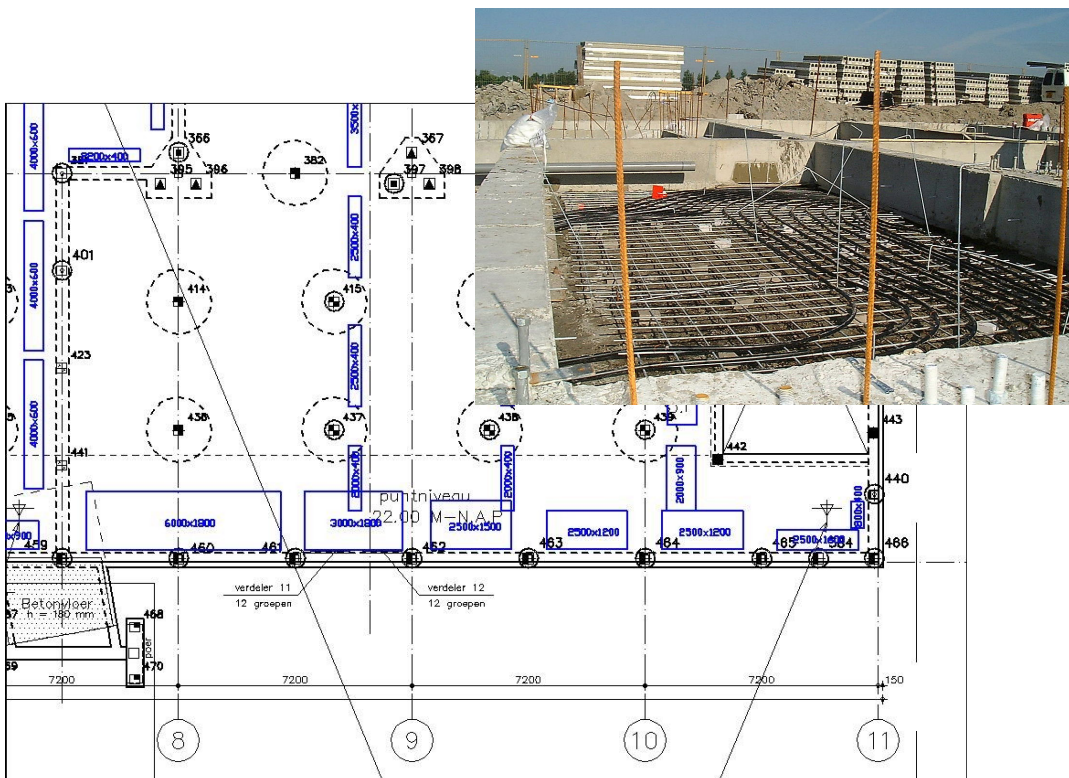


Figuur 25 Verwerking van het horizontale slangensysteem in het definitieve heiplan.

Het 'tegenstroom' principe blijkt niet uit de figuur. Het is dus belangrijk het montagepersoneel van tevoren goed te instrueren.

5.4.5 Wapeningsnetten ten behoeve van het horizontaal slangensysteem

Zoals aangegeven worden de slangen van het horizontale slangensysteem op wapeningsnetten gevlochten. Dit is nodig omdat het slangmateriaal (PE80 - SDR11 - Zwart - 20 x 2 mm) op rollen of haspels wordt toegeleverd, en het materiaal uit een tamelijk stugge kunststof met een 'geheugen' bestaat. In figuur 26 worden de ge-projecteerde wapeningsnetten in het blauw aangegeven.



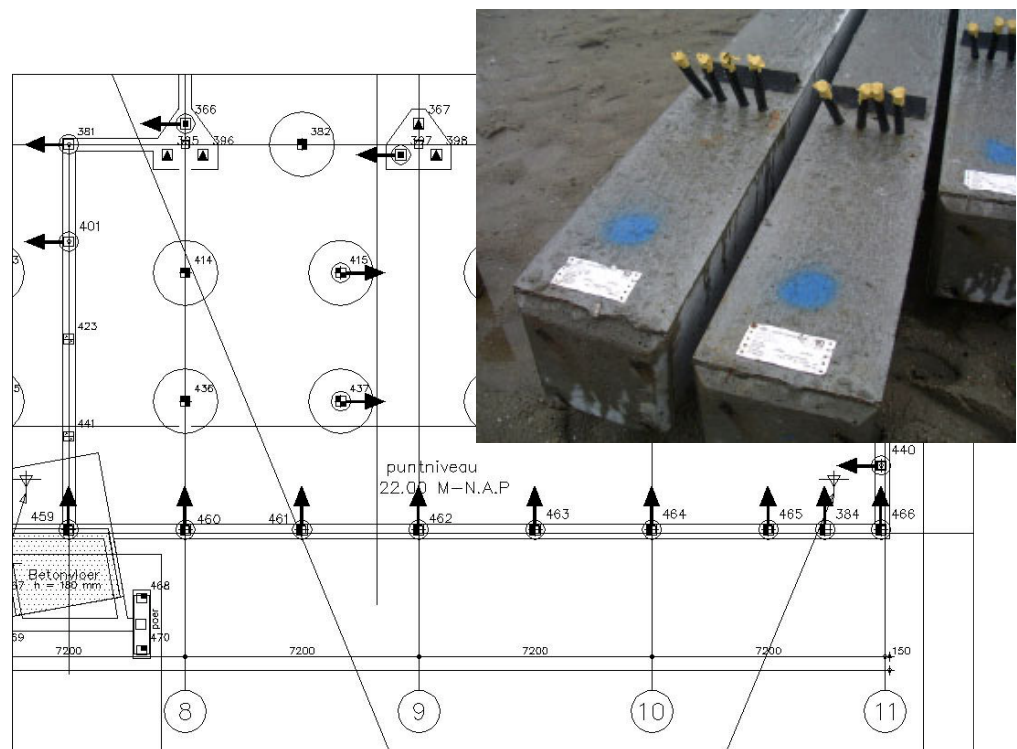
Figuur 26 Plaatsen van wapeningsnetten ten behoeve van het horizontaal slangensysteem.

In veel gevallen worden de wapeningsnetten door de bouwkundig aannemer geleverd en aangebracht. Er kan worden volstaan met verzinkte wapeningsnetten met een maaswijdte van 15 cm en een staafdikte van ± 5 mm. Op plaatsen waar veel slangen worden aangebracht (bijvoorbeeld bij de verdelers/verzamelaars) is het soms nodig de wapeningsnetten ter plaatse te borgen met grondpennen.

Er dienen maatregelen genomen te worden die beschadiging van het horizontaal slangensysteem tegengaan op locaties waar een sterke klink van de bodem te verwachten is. Een mogelijkheid is het afhangen van de wapeningsnetten aan de bovenliggende vloer.

5.5 Praktisch heiplan voor de heiwerkzaamheden

Na het ontwerp van het horizontale slangensysteem is in feite het volledige heiplan inclusief alle details bekend. Echter het valt aan te bevelen om het heibedrijf een extra tekening te verstekken waarop alleen de uittrederichting van de slangen uit de energiepalen wordt aangegeven. In de praktijk is gebleken dat dit vergissingen helpt te voorkomen.



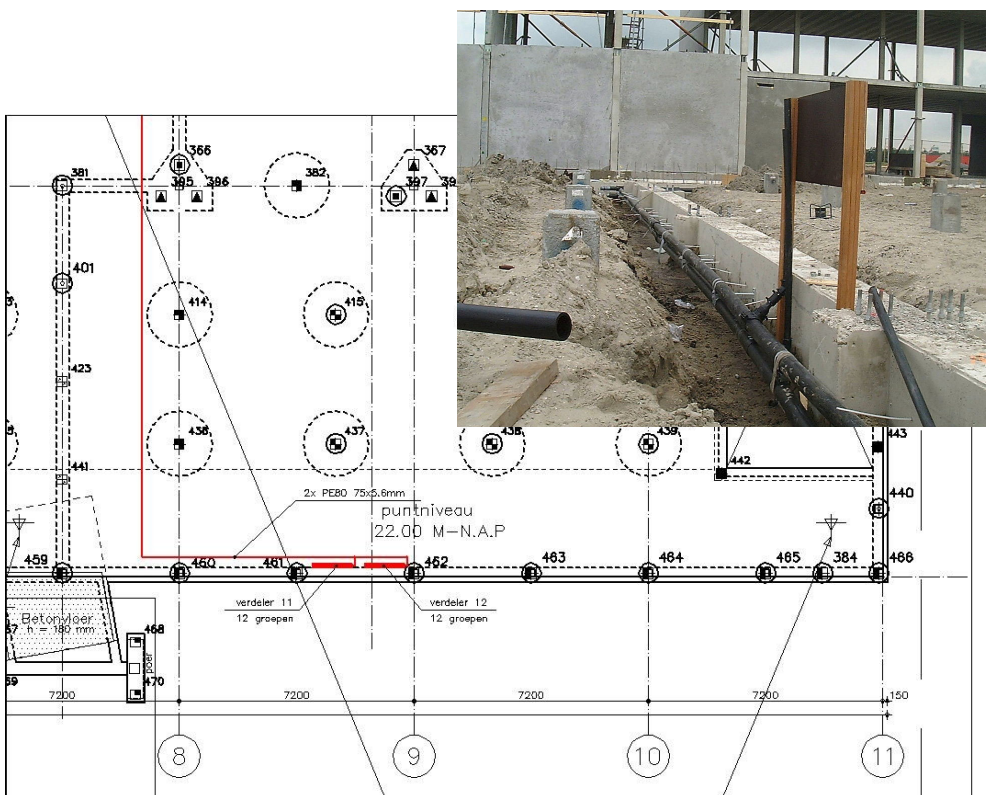
Figuur 27 Bijna definitief heiplan voor het heibedrijf.

In figuur 27 zijn de energiepalen en de uittrederichting van de slangen duidelijk te zien door het gebruik van dikke pijlen. Gecombineerd met het definitieve renvooi, waarin de paalmerken worden gekoppeld aan verdere detailtekeningen, wordt de kans op vergissingen sterk verminderd tijdens de heiwerkzaamheden in het veld.

5.6 Hydraulische koppeling

5.6.1 Hydraulische koppeling verdelers/verzamelaars

Nu het energiepalensysteem tot en met de hydraulische koppeling van de energiepalen op de verdelers/verzamelaars is uitgewerkt, dienen de verdelers/verzamelaars onderling te worden gekoppeld op één hydraulisch aanvoer- en retoursysteem in de technische ruimte. In figuur 28 is het koppeltracé in het rood aangegeven.



Figuur 28 Onderlinge hydraulische koppeling van de verdelers/verzamelaars

Doordat de verdelers/verzamelaars boven de begane grondvloer zijn geplaatst, is koppeling achteraf mogelijk. Het verdient echter de voorkeur om de koppeling onder de begane grondvloer te realiseren tijdens of vóór de fase waarbij het aanbrengen van het horizontale slangensysteem wordt uitgevoerd. Voordelen hiervan zijn dat de leidingen uit zicht worden geïnstalleerd, goedkopere bevestigingsmethoden kunnen worden gebruikt en er geen leidingisolatie hoeft te worden toegepast (met uitzondering van de leidingen die boven de vloer uitkomen en worden verbonden met de verdelers/verzamelaars). Doordat dit leidingensysteem na het aanbrengen van de begane grondvloer niet of zeer moeilijk bereikbaar is, dient er veel aandacht te worden besteed aan de bevestigingsmethode, de kwaliteit van de onderlinge koppeling van de leidingdelen en de controle van het gehele leidingen-

systeem, voordat de begane grondvloer wordt aangebracht (vergelijkbaar met het horizontale slangensysteem).

Als leidingmateriaal kan HDPE drukleiding worden toegepast (materiaal dat ook wordt gebruikt in de palen en het horizontale slangensysteem). Voor wat betreft de buisklasse kan vaak worden volstaan met SDR17. Bij het ontwerpen van het leidingensysteem dient altijd rekening te worden gehouden met uitzetting en krimp ten gevolge van temperatuurschommelingen. Als er geen klink te verwachten is, kunnen de leidingen in principe los worden gelegd. Indien er wel klink te verwachten is, dan kunnen de leidingen aan stroppen worden afgehangen aan de horizontale funderingsdelen. Afhankelijk van het legniveau dient er rekening te worden gehouden met uitsparingen in de horizontale funderingsdelen. De aanvoer- en retourleidingen moeten niet tegen elkaar aan gelegd worden.

5.6.2 Bijzonderheden verdelers/verzamelaars

Bij de keuze en opbouw van de verdelers/verzamelaars dient rekening te worden gehouden met de materiaalkeuze, te monteren appendages, isolatie en plaatsing (zie figuur 29).

Materiaalkeuze.

De toepassing van corrosievrije materialen is noodzakelijk om een lange levensduur te kunnen garanderen. Er zijn non-ferro en kunststof verdelers/verzamelaars op de markt die prima toepasbaar zijn. Bij toepassing van dubbelwandige kunststof verdelers/verzamelaars kan de isolatie hiervan vaak achterwege blijven. Daarnaast dient bij de materiaalkeuze rekening te worden gehouden met het al dan niet toepassen van een eventueel antivriesmiddel (bij voorkeur propyleenglycol).

Te monteren appendages.

De slangen van het horizontale slangensysteem worden per groep gekoppeld aan de verdeler/verzamelaar met behulp van een kogelkraan en inregelafsluiter om de groepen onderling te kunnen balanceren. Zowel de verdeler als de verzamelaar dienen uitgevoerd te worden met een vul/aftapkraan met voldoende capaciteit om het slangensysteem snel en goed te kunnen vullen en ontluchten. De verdeler en verzamelaar worden met respectievelijk aanvoer- en retourleiding gekoppeld door middel van een kogelkraan en inregelafsluiter met meetnippels. De inregelafsluiter maakt het onderling balanceren van alle verdelers/verzamelaars mogelijk. Appendages met een laag drukverlies moeten gebruikt worden, om het energieverbruik van de mediumpomp te beperken.

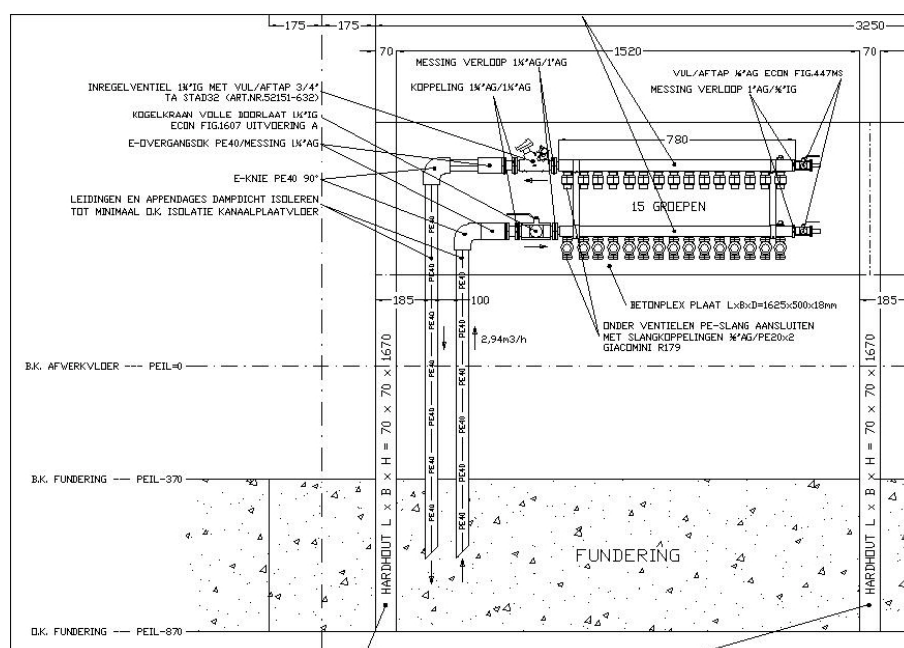
Isolatie.

Alle delen waarvan de oppervlaktetemperatuur lager kan worden dan de dauwpunttemperatuur van de omringende lucht dienen dampdicht te worden geïsoleerd. Dit

geldt ook voor de HDPE slangen en aanvoer- retourleidingen (isoleren van de onderkant van de vloer tot en met appendages op de verdeler/verzamelaar). Voor de muur/vloerdoorvoeren dienen aparte geïsoleerde mantelbuizen geplaatst te worden.

Plaatsing.

Er dient rekening te worden gehouden met een (tijdelijke) plaatsingsmogelijkheid van de verdelers/verzamelaars, omdat de montage in de meeste gevallen plaatsvindt vóór de plaatsing van de bouwkundige gevels en wanden. Vaak kunnen de horizontale funderingsdelen worden gebruikt om definitieve montageconsoles te plaatsen, en daarmee werkzaamheden achteraf te voorkomen.



Figuur 29 Detailoverzicht van een geplaatste verdeler/verzamelaar.

5.7 Warmtetransport

5.7.1 Keuze van het warmtetransportmedium

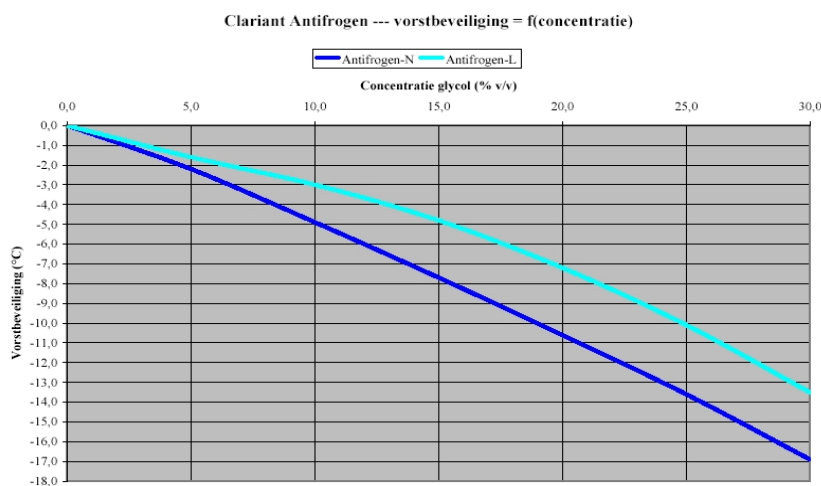
Er dient bij de dimensionering van het energiepalensysteem rekening te worden gehouden met het gegeven dat ijsvorming op het oppervlak van de heipaal ontoelaatbaar is. Doordat de toegepaste HDPE slangen in de heipalen en de betondekking hiervan een warmteweerstand vormen, is een gemiddelde mediumtemperatuur lager dan 0°C theoretisch mogelijk zonder risico op ijsvorming. In de praktijk wordt de aanvoertemperatuur naar het energiepalensysteem echter door middel van

een beveiligingselement begrensd op -2 °C voor de levering van relatief korte piekvermogens. Wanneer de aanvoer temperatuur langer dan ca. 12 uur onder 0 °C blijft is het aan te bevelen het warmtepompvermogen te verlagen (of uit te schakelen). Om elk risico uit te sluiten kan ervoor worden gekozen de aanvoertemperatuur naar de energiepalen op 0 °C te begrenzen. De gemiddelde mediumtemperatuur in de energiepaal is dan ca. $+2\text{ °C}$, daarbij is ca. 25% extra totale lengte nodig om hetzelfde vermogen te kunnen leveren (zie figuur 5).

Ook om beschadiging van de verdamper van de warmtepomp te voorkomen is toevoeging van een antivriesmiddel noodzakelijk. Dit hangt samen met het gegeven dat de koeltechnische verdampertemperatuur lager moet zijn dan de (minimale) mediumtemperatuur om energie te kunnen onttrekken aan het energiepalensysteem. Indien er geen antivriesmiddel is toegevoegd, kunnen er in de verdamper ijskristallen ontstaan die de verdamper kunnen beschadigen. Vooral platenwarmtewisselaars, die vaak worden toegepast als verdamper van commerciële warmtepompen, zijn hier gevoelig voor in verband met de kleine kanaalafmetingen. Hoewel Shell-and-Tube warmtewisselaars door hun constructie minder gevoelig zijn voor dit verschijnsel, blijft het een riskante factor die vermeden dient te worden. Over het algemeen volstaat een vorstbeveiligingstemperatuur van -10 °C . Deze waarde dient altijd te worden geverifieerd bij de warmtepompleverancier.

Er zijn verschillende antivriesmiddelen beschikbaar op de markt. Bij voorkeur dient propyleenglycol te worden toegepast, met name in situaties waarbij het horizontale slangensysteem of aanvoer- en retourleidingen buiten de gebouwgrenzen komen, en de kans op beschadiging door boomwortels, graafwerkzaamheden etc. concreet aanwezig is. Een alternatief, en veel voor andere toepassingen gebruikt, antivries is ethyleenglycol. Dit medium presteert fysisch beter dan propyleenglycol; ethyleenglycol is echter sterk giftig en vanuit dat oogpunt niet aan te bevelen voor toepassing in bodemsystemen. Beide glycolsoorten bieden vanaf een concentratie van ca. 20% in water een zekere mate van corrosiebescherming.

In figuur 30 is de vorstbeveiliging als functie van de concentratie (volumepercentage) van mono-ethyleenglycol (Antifrogen-N) en propyleenglycol (Antifrogen-L) weergegeven.



Figuur 30 Vorstbeveiliging door toepassing van glycol.

5.7.2 Afpersen, vullen en ontluchten van de installatie

Afpersen

Het afpersen en vullen van het gehele energiepalemsysteem (van de aanvoer- en retourleiding in de technische ruimte tot en met de verdelers/verzamelaars) dient plaats te vinden kort voordat de ondergrondse delen definitief worden afgedekt. Eventuele lekkages kunnen dan eenvoudig worden gelokaliseerd en hersteld en de kans op een nieuwe beschadiging wordt beperkt.

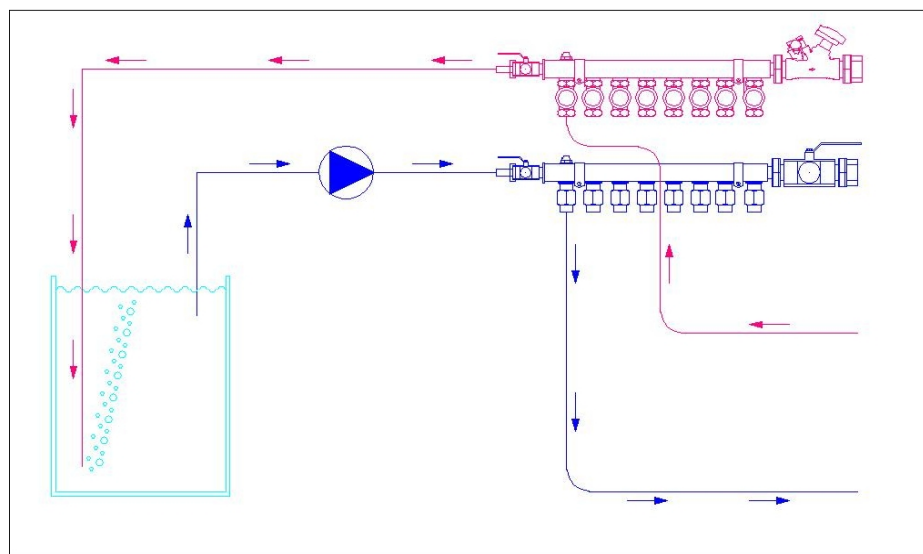
In eerste instantie wordt de installatie bij wijze van beproeving afgeperst met lucht om eventuele lekkages te kunnen vaststellen. Het verdient de voorkeur om deze procedure zoveel mogelijk per te isoleren installatiedeel, uit te voeren: iedere verdeler/verzamelaar afzonderlijk en de aanvoer/retourleidingen van de technische ruimte naar alle verdelers/verzamelaars. Het te beproeven deel wordt door middel van perslucht op een druk van 6 bar (ten opzichte van atmosferische druk) gebracht. Als de druk na een dag minder dan $\sim 0,3$ bar is gedaald, is het beproefde deel in orde.

Vullen

Na het succesvol doorlopen van de afpersprocedure wordt begonnen met het vullen van het systeem met het definitieve medium. Ook het vullen wordt per te isoleren installatiedeel uitgevoerd. In onderstaande figuur wordt het vullen van een verdeler/verzamelaar aangegeven. Iedere groep wordt één voor één gevuld: alle kogelkranen en inregelafsluiters op de verdeler/verzamelaar worden volledig dichtgezet met uitzondering van de te vullen groep: die wordt na het aansluiten van de vulset volledig open gezet. De vulset (bestaande uit een mediumvat, vulpomp en slangen) wordt aangesloten op de verdeler/verzamelaar via de vul/aftapkranen. Vervolgens wordt er schoon medium (boven uit het vat) in de groep geperst totdat er geen

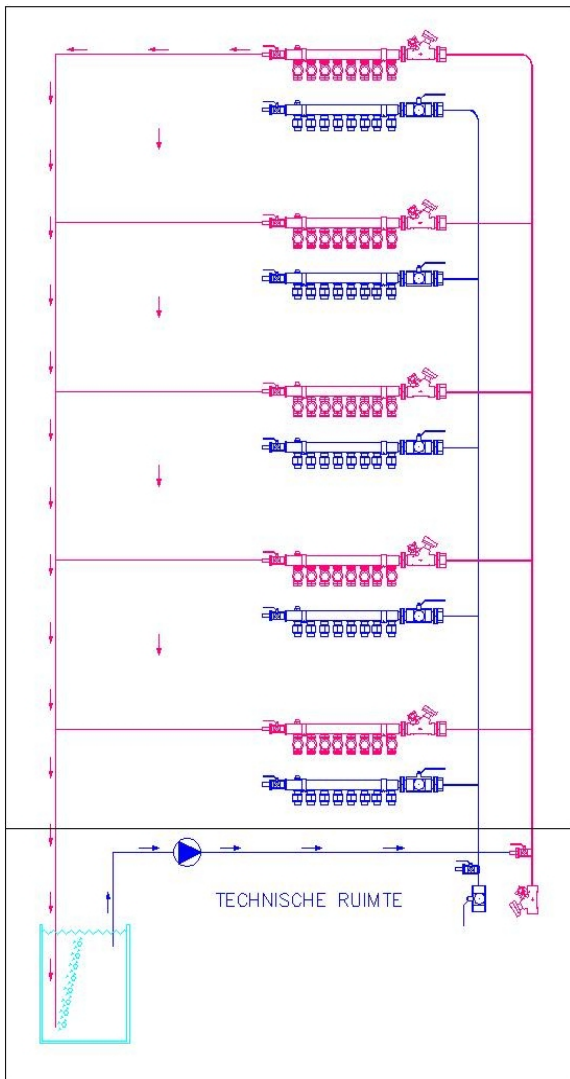
luchtbellen meer uit de retourslang komen. Eventueel vuil blijft als bezinksel achter in het mediumvat. De gevulde groep wordt afgesloten, en de procedure wordt herhaald totdat alle groepen zijn gevuld (zie ook figuur 31).

Bij de besproken seriekoppeling ontstaan er tussen de palen ‘buiken’ in de slangen waarin zich lucht en vuil kan ophopen. Het is daarom belangrijk iedere individuele groep met een zo’n hoog mogelijke mediumsnelheid te vullen om de lucht en het vuil effectief uit de groep te drijven.



Figuur 31 Vullen van een verdeler/verzamelaar.

Als er een antivriesmiddel wordt toegepast in het definitieve medium, dan dient dit in gemengde vorm te worden ingebracht in het systeem. Als er geen antivriesmiddel wordt toegepast, dan dient rekening te worden gehouden met eventueel vorstgevaar.



Figuur 32 Vullen van de aanvoer- en retourleidingen.

Het vullen van de aanvoer- en retourleidingen van de verdelers/verzamelaars naar de technische ruimte wordt uitgevoerd vanaf de technische ruimte. In onderstaande figuur wordt de retourleiding gevuld (rode delen in figuur 32). Alle kogelkranen en inregelafsluiters worden volledig dichtgezet met uitzondering van de inregelafsluiter en de vul/aftapkraan van de verzamelaar die zich het verst van de technische ruimte bevindt: die worden na het aansluiten van de vulset volledig open gezet. De vulset wordt aangesloten op de vul/aftapkranen op de verzamelaar en vlak achter de regelafsluiter in de technische ruimte. Vervolgens wordt er schoon medium (boven uit het vat) in de groep geperst totdat er geen luchtballen meer uit de retourslang komen. Eventueel vuil blijft als bezinskel achter in het mediumvat.

Vervolgens worden er via de overige verzamelaars op analoge wijze terug gewerkt naar de technische ruimte tot de volledige retourleiding is gevuld. In dit geval hoeven uitsluitend de aftakleidingen naar de verzamelaars te worden gevuld.

De aanvoerleiding (blauwe delen in de figuur) wordt aansluitend op analoge wijze gevuld via de verdelers.

Ontluchten

Als de aanvoer- en retourleidingen naar de verdelers/verzamelaars onder de beganegrandvloer worden gemonteerd, kunnen deze leidingdelen over het algemeen uitstekend worden ontlucht m.b.t. de vul/aftapkranen t.p.v. de verdelers/verzamelaars en de technische ruimte, en zijn er meestal geen aanvullende maatregelen noodzakelijk.

Indien deze aanvoer- en retourleidingen echter bovengronds worden gemonteerd, is het raadzaam op de hoogste punten luchtpotten met (automatische) ontluchters te plaatsen.

Er dient in de eerste periode na de inbedrijfstelling rekening te worden gehouden met ontluichtings- en bijvulwerkzaamheden.

5.8 Hydraulisch balanceren van de installatie

5.8.1 Balanceren van de paalgroepen

Afhankelijk van de verschillen m.b.t. leidinglengte en ontwerpdebiet tussen de paalgroepen op een verdeler/verzamelaar is het onderling balanceren van de paalgroepen noodzakelijk om belastingsverschillen tussen energiepalen te vermijden. In de praktijk wordt op de verzamelaar per groep een inregelafsluiterje opgenomen die dit mogelijk maakt. Er kan gekozen worden uit verschillende varianten waarbij al of geen meetmogelijkheid beschikbaar is. Zorg onafhankelijk van de keuze voor een verzelemogelijkheid van de gemaakte instelling.



33a Taco flowmeter



33b Inregelafsluiter met meetnippels



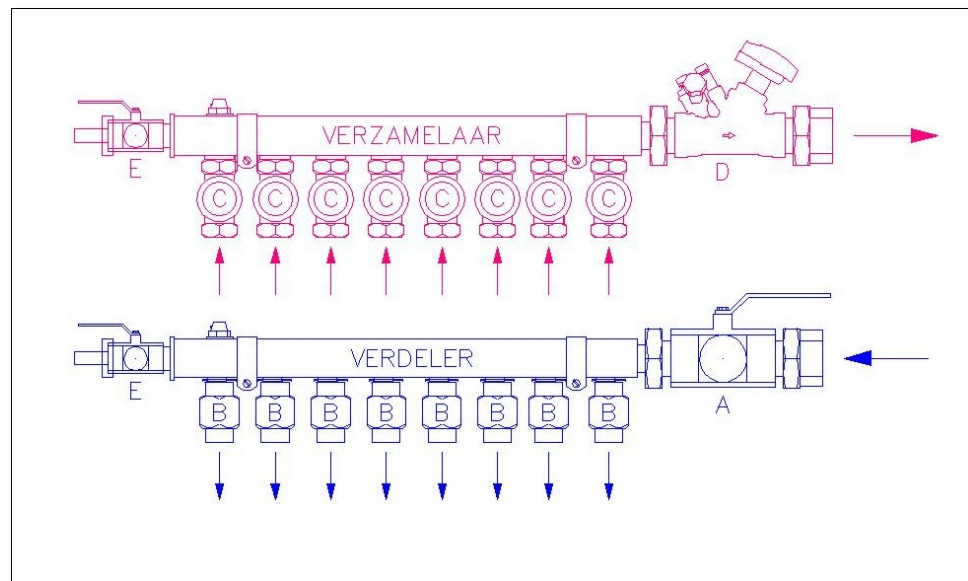
33c Inregelafsluiter zonder meetnippels

Figuur 34 Appendages t.b.v. hydraulisch balanceren.

De taco flowmeter (figuur 33a) geeft een visuele indicatie van het debiet. Er zijn typen beschikbaar met een geïntegreerde inregelmogelijkheid (anders moet daar apart in worden voorzien). Denk bij de selectie om het juiste meetbereik. De inregelafsluiter met meetnippels (figuur 33b) maakt gebruik van de meetbare drukval over de afsluiter. Gecombineerd met de instelling van het meerslagen handwiel kan het debiet worden bepaald en aangepast. Om kosten te beperken kunnen inregelafsluiters zonder meetnippels (figuur 33c) worden gekozen. In dit geval dient de instelling rekenkundig te worden bepaald. Een meerslagen verstelling maakt een nauwkeurige instelling mogelijk. Als de leidingweerstand en debietverschillen tussen de paalgroepen op een verdeler/verzamelaar onderling beperkt zijn (<10%) kan de inregelmogelijkheid ten behoeve van de onderlinge balancerings vervallen. In dat geval kunnen de groepen worden gekoppeld met kogelkraantjes. De voordelen zijn lagere kosten en een lagere drukval.

Groep-nummer	Paal-nummer	Palen-serie	lengte hor-leiding (m)	lengte paal-lussen (m)	totale groep-lengte (m)	Ontwerp-debiet (l/m)	Leiding-dP (Pa/m)	Leiding-dP (kPa)	Ventiel-dP open (kPa)	Totaal-dP (ongecor.)	Correctie (kPa)	Instel-Kvs (m ³ /h)	Instel-dP (kPa)	Totaal-dP (gecorr.)
1.1	6-8-11-7	4	45	144	189	4.8023	199.10	37.63	2.30	39.93	0.00	1.90	2.30	39.93
1.2	7-11-8-6	4	45	144	189	4.8023	199.10	37.63	2.30	39.93	0.00	1.90	2.30	39.93
1.3	5-3-2-1	4	45	144	189	4.8023	199.10	37.63	2.30	39.93	0.00	1.90	2.30	39.93
1.4	1-2-3-5	4	45	144	189	4.8023	199.10	37.63	2.30	39.93	0.00	1.90	2.30	39.93
1.5	9-10-20-13	3	75	108	183	3.6017	149.60	27.38	1.29	28.67	11.26	0.61	12.55	39.93
1.6	13-10-20-9	3	75	108	183	3.6017	149.60	27.38	1.29	28.67	11.26	0.61	12.55	39.93
1.7	26-33-38	3	85	108	193	3.6017	149.60	28.87	1.29	30.17	9.76	0.65	11.06	39.93
1.8	38-33-26	3	85	108	193	3.6017	149.60	28.87	1.29	30.17	9.76	0.65	11.06	39.93
1.9	44-48-51	3	105	108	213	3.6017	149.60	31.86	1.29	33.16	6.77	0.76	8.06	39.93
1.10	51-48-44	3	105	108	213	3.6017	149.60	31.86	1.29	33.16	6.77	0.76	8.06	39.93
1.11	61-65-69	3	110	108	218	3.6017	149.60	32.61	1.29	33.91	6.02	0.80	7.32	39.93
			820	1332	2152	44.4214	199.10	37.63	2.30	39.93	11.26		12.55	39.93
2.1	69-65-61	3	110	108	218	3.6017	149.60	32.61	1.29	33.91	13.99	0.55	15.28	47.89
2.2	72-75-76	3	120	108	228	3.6017	149.60	34.11	1.29	35.40	12.49	0.58	13.78	47.89
2.3	76-75-72	3	120	108	228	3.6017	149.60	34.11	1.29	35.40	12.49	0.58	13.78	47.89
2.4	77-78-79	3	120	108	228	3.6017	149.60	34.11	1.29	35.40	12.49	0.58	13.78	47.89
2.5	79-78-77	3	120	108	228	3.6017	149.60	34.11	1.29	35.40	12.49	0.58	13.78	47.89
2.6	80-73-70	3	110	108	218	3.6017	149.60	32.61	1.29	33.91	13.99	0.55	15.28	47.89
2.7	70-73-80	3	110	108	218	3.6017	149.60	32.61	1.29	33.91	13.99	0.55	15.28	47.89
2.8	66-62-58-46	4	85	144	229	4.8023	199.10	45.59	2.30	47.89	0.00	1.90	2.30	47.89
2.9	46-58-62-66	4	85	144	229	4.8023	199.10	45.59	2.30	47.89	0.00	1.90	2.30	47.89
2.10	41-34-30-23	4	55	144	199	4.8023	199.10	39.62	2.30	41.92	5.97	1.00	8.27	47.89
2.11	23-30-34-41	4	55	144	199	4.8023	199.10	39.62	2.30	41.92	5.97	1.00	8.27	47.89
			1090	1332	2422	44.4214	199.10	45.59	2.30	47.89	13.99		15.28	47.89

Figuur 34 Rekenkundige bepaling van de instelling van de inregelafsluiters.



Figuur 35 Verdeler/verzamelaar met appendages.

- A: Kogelkraan (1...1¼") t.b.v. aansluiting verdeler op aanvoerleiding
- B: Kogelkraan ½" met 20 mm koppeling t.b.v. aansluiting paalgroep
- C: Inregelafsluiter ½" zonder meetnippels met 20 mm koppeling t.b.v. aansluiting en balanceren paalgroep
- D: Inregelafsluiter met meetnippels t.b.v. aansluiting verzamelaar op retourleiding en balanceren verdeler/verzamelaar
- E: vul/aftapkraan ½"

In figuur 34 is een voorbeeld gegeven van de rekenkundige bepaling van de instellingen voor de onderlinge balancerings.

5.8.2 Balanceren van de verdelers/verzamelaars

Er wordt vanuit gegaan dat alle verdelers/verzamelaars op één set aanvoer- en retourleidingen worden aangesloten die naar de technische ruimte wordt gevoerd. Dat wil zeggen er wordt één pomp gebruikt voor het volledige energiepalensysteem. Alle verzamelaars worden uitgevoerd met inregelafsluiters met meetnippels (figuur 33b). Er dient vóór deze inregelafsluiter te worden voorzien in een recht leidingstuk zonder appendages met een lengte van 5 x de leidingdiameter om een drukverschilmeting te bereiken met voldoende nauwkeurigheid.

Hoewel het in principe mogelijk is om de instelling van de inregelafsluiters rekenkundig te bepalen en deze instelling met behulp van de meetnippels te controleren, blijkt in de praktijk dat dit bij grotere systemen vaak resulteert in een onvoldoende gebalanceerde installatie. Dit kan worden verklaard door het gegeven dat de praktische uitvoering van de aanvoer- en retourleidingen vaak afwijkt van het oorspron-

kelijke ontwerp. Er wordt een beter resultaat bereikt door gebruik te maken van een tijdbesparende geautomatiseerde procedure die een aantal leveranciers van inregelafsluiters biedt. Hierbij wordt gebruik gemaakt van meetapparatuur waarin de relevante eigenschappen van alle inregelafsluiters kunnen worden gedefinieerd (medium, type en maatvoering). Er wordt uitgegaan van een gebruiksklare installatie met ingeschakelde pomp, waarbij alle inregelafsluiters een voorinstelling hebben gekregen die een voor de procedure minimaal noodzakelijk drukverschil over alle individuele inregelafsluiters oplevert. Er wordt bij deze situatie een meting verricht bij alle inregelafsluiters waarvan de resultaten worden opgeslagen in de meetapparatuur. Vervolgens berekent de meetapparatuur met behulp van deze meetinformatie de definitieve instelling van iedere inregelafsluiter die aansluitend moet worden ingesteld. Er wordt hierbij rekening gehouden met de drukval over het leidingennet. Na het voltooien van de procedure volstaat een aantal steekproeven om te controleren of de individuele ontwerpdebieten bereikt zijn.

5.8.3 Inregelafsluiter in centrale retourleiding

Het is raadzaam om de centrale retourleiding in de technische ruimte ook uit te rusten met een inregelafsluiter met meetnippels (of een meetflens) en deze te betrekken in bovenstaande geautomatiseerde procedure. Met dit element is het mogelijk de drukval in het achterliggende systeem te balanceren bij een minimale drukval en het drukoverschot van de pomp vast te stellen. Dit drukoverschot vertegenwoordigt in feite de overdimensionering van de pomp. Als er een frequentieregeling (of andersoortige toerenregeling) wordt toegepast op de pomp, kan deze waarde worden gebruikt om het maximaal noodzakelijke toerental van de pomp te bepalen en zo het energieverbruik bij vollast tot een minimum te beperken. De afsluiter dient bij deze situatie uiteraard helemaal open te worden gezet omdat het drukoverschot niet wordt weggesmoord, maar niet meer wordt geleverd.

Als er geen toerenregeling op de pomp wordt toegepast kan het eventuele drukoverschot, afhankelijk van het hydraulisch ontwerp t.p.v. de technische ruimte, worden weggesmoord met de inregelafsluiter. Er kan ook worden gekozen dit niet te doen en gebruik te maken van het kleinere temperatuurverschil en de dus gemiddeld hogere mediumtemperatuur (hogere COP van de warmtepomp). Over het algemeen is de laatste optie te prefereren.

Bovengenoemde inregelafsluiter (of meetflens) kan gecombineerd met een drukverschil meetzender een meetwaarde leveren die benut kan worden in een meet- en regelsysteem. De meetwaarde kan in combinatie met de instelwaarde van de afsluiter worden omgerekend naar een actueel debiet dat door het volledige energiepallensysteem wordt gevoerd. Als ook de aanvoer- en retourtemperatuur wordt gemeten, kan gecombineerd met de mediuimeigenschappen als functie van de actuele temperatuur, het actuele vermogen (onttrekken of regenereren) worden berekend.

Deze informatie kan worden gebruikt voor monitoringsdoeleinden en regeldoelinden.

5.8.4 Beveiliging van de installatie

Er zijn een aantal kritische punten die bij het gebruik van het energiepalensysteem in acht moeten worden genomen om beschadiging aan de bouwkundige constructie en/of het hydraulische systeem te voorkomen.

Minimale medium-aanvoertemperatuur naar het energiepalen systeem

Ijsafzetting op de buitenzijde van de energiepalen dient te worden voorkómen, om zo de bouwkundige functie te garanderen (in het geval de draagkracht op kleef berust). Het gevaar van ijsafzetting kan zich alleen voordoen wanneer het energiepalensysteem is onder-gedimensioneerd; als er teveel energie aan het systeem wordt onttrokken, dan zal de gemiddelde mediumtemperatuur dalen en mogelijk in de gevarenzone terecht komen. Momentaan kan deze situatie zich voordoen als er langdurig op pieklast moet worden geleverd. Structureel kan deze situatie zich voordoen als er wordt uitgegaan van een te hoge basislast.

De keuze van het medium (met of zonder antivries) bepaalt de minimale mogelijke mediumtemperatuur; deze dient met de warmtepompleverancier te worden afgestemd in verband met de beveiliging van de verdamper .

De gemiddelde mediumtemp dient groter of gelijk aan 0 °C te zijn; in dat geval is de temperatuur aan de buitenzijde van de energiepaal is altijd hoger vanwege de warmtestroom naar de leidingen in de paal.

Normaal gesproken zal het temperatuurtraject (verschil tussen aanvoer en retourtemperatuur) ca. 4 K zijn. De aanvoer temperatuur dient dan begrensd te worden op -2 °C.

Gebruik nauwkeurige en kwalitatief hoogwaardige meetapparatuur, en controleer de meet- en aanspreekwaarden met geijkte referentieapparatuur.

De interventie van het autonome beveiligingselement op de warmtepompinstallatie dient onvoorwaardelijk te zijn; het is mogelijk de capaciteit van het warmtepompsysteem te beperken of (beter) deze volledig uit te schakelen. Laat bij deze situatie de energiepalenpomp draaien om de mediumtemperatuur te nivelleren en te verhogen onder invloed van de energieopname via de energiepalen.

Maximale mediaanvoertemperatuur naar het energiepalensysteem

De maximaal toelaatbare waarde wordt bepaald door de drukleiding met de laagste drukklasse die voorkomt in het energiepalensysteem (ontwerpgegeven), en is bedoeld om beschadiging (lekkage) aan de HDPE drukleidingen te voorkomen. Omdat een groot deel van het leidingensysteem onder de beganegrondvloer wordt geïnstalleerd, en daarmee definitief buiten bereik is, is het belang van deze beveiliging evident.

Aandacht voor dit punt is vooral van belang bij systemen waarbij de warmtepompinstallatie wordt gebruikt als koelmachine. In dit geval wordt de condensorenergie afgevoerd naar het energiepalensysteem, en kan de mediumtemperatuur dus aanmerkelijk hoger worden dan bij situaties waarbij uitsluitend gebruik wordt gemaakt van vrije koeling; temperaturen hoger dan 35 à 40 °C zullen normaal gesproken echter niet voorkomen. Bij HDPE drukleidingen is de maximaal toelaatbare mediumdruk afhankelijk van de drukklasse en de mediumtemperatuur. Over het algemeen is de maximale druk binnen een normaal verwarmings- en koelsysteem bepaald op drie bar ten opzichte van de atmosferische druk. Bepaal bij deze druk de maximale mediumtemperatuur van de HDPE drukleiding met de laagste drukklasse, en stel het beveiligingselement in met een veiligheidsmarge naar beneden. Gebruik ook nu nauwkeurige en kwalitatief hoogwaardige meetapparatuur, en controleer de meet- en aanspreekwaarden met geijkte referentieapparatuur. De interventie van het autonome beveiligingselement op de warmtepompinstallatie dient onvoorwaardelijk te zijn; het is mogelijk de capaciteit van het warmtepompsysteem te beperken of (beter) deze volledig uit te schakelen. Laat bij deze situatie de energiepalenpomp draaien om de mediumtemperatuur te nivelleren en te verlagen onder invloed van de energieafgifte via de energiepalen.

Maximale druk binnen het energiepalensysteem

Analoog aan de motivatie voor de beperking van de maximale aanvoertemperatuur dient de maximale druk binnen het energiepalen systeem te worden beperkt. Over het algemeen volstaat de plaatsing van mechanische overdrukventielen met de juiste capaciteit en een aanspreekwaarde van drie bar ten opzichte van de atmosferische druk (de aanspreekwaarde dient te worden gecontroleerd), de plaatsing van een expansievat waarbij rekening is gehouden met de maximale temperatuurvariaties die zich binnen het systeem kunnen voordoen, en een instelbare maximaalpressostaat met verbreekcontact welke aanspreekt op een waarde die iets boven de aanspreekwaarde van de mechanisch overdrukventielen ligt (empirisch te bepalen). De interventie van de autonome pressostaat op de installatie dient onvoorwaardelijk te zijn; het warmteaanbod naar het energiepalensysteem dient onmiddellijk onderbroken te worden om een verdere drukstijging te voorkomen. Laat bij deze situatie de energiepalenpomp draaien om de mediumtemperatuur (en daarmee de druk) te verlagen onder invloed van de energieafgifte via de energiepalen.

6. Energiepalen in de praktijk

6.1 Gerealiseerde projecten

In Nederland zijn vanaf 1997 ruim tien projecten gerealiseerd waarin energiepalen zijn toegepast. Gedurende de realisatie van deze projecten is veel ervaring opgedaan met betrekking tot de uitvoering. De resultaten hiervan zijn verwerkt in hoofdstuk 5.

Van een aantal van deze projecten zijn na de oplevering de prestaties gedurende het gebruik gemeten. Sinds kort zijn deze gegevens beschikbaar gekomen. Een beknopte samenvatting van de gemeten prestaties zijn opgenomen in dit handboek ter illustratie van het gebruik van energiepalen.

6.1.1 Sander Douma - Schermerhorn



Naam	Woning Architect Sander Douma
Plaats	Schermerhorn
Soort gebouw	Woning
Opleverdatum	September 1999
Gebruikersoppervlak	242 m ²
Stempeloppervlak	146 m ²
Schiloppervlak (exclusief beganegrandvloer)	440 m ²
Oppervlak glas in gevel	50 m ²
Oppervlak glas in dak	0 m ²
Rc-waarde dichte geveldelen (gevel, dak, vloer)	Rc = 4,0 / 4,9 / 3,5 m ² ·K/W
U-waarde raam	U = 1,1 W/m ² ·K

Type verwarmingssysteem (mono- of bivalent)	Monovalent
Thermisch verwarmingsvermogen van warmtepomp	1 x aan/uit warmtepomp; verwarmingsvermogen 15,6 kW
Gemiddelde brontemperatuur van de warmtepomp	Tussen 8°C en 12°C (stook- resp. koelseizoen)
Afgifte temperatuur van de warmtepomp	Gemiddeld 32°C in stookseizoen
Koelvermogen	7,4 kW (gemiddeld in augustus 2002 / rechtstreekse uitwisseling tussen gebouw en energieheipalensysteem <i>zonder</i> warmtewisselaar)
Aantal constructief benodigde fundatiepalen	30 stuks
Aantal in gebruik zijnde energieheipalen	30 stuks
Bruto / thermisch effectieve lengte van één energiepaal	16,25 m / 14,25 m
Totaal thermisch effectieve paallengte	30 x 14,25 ~ 428 m
Overige energiebesparende maatregelen (warmterugwinning, verlichting etc)	Uitgebreide bouwkundige maatregelen, horizontale zonweringslamellen boven glaspartijen, PV-panelen op zuidkant dak, zeer laag temperatuur vloer- en wandverwarming (<35°C), hoog temperatuur vloer- en wandkoeling, natuurlijk luchttoevoersysteem met automatisch corrigerende gevelroosters, warmterugwinning uit ventilatielucht, warmtepompboiler t.b.v. tapwater.
Gemeten SPF & PER (totaal maart 2002 – maart 2003)	SPF : 3,8 / PER : 1,5 (bw ¹) / 1,6 (ow ²)
Gemeten SPF & PER (verwarmen maart 2002 – maart 2003)	SPF : 3,5 / PER : 1,4 (bw) / 1,5 ow)
Gemeten SPF & PER (koelen maart 2002 – maart 2003)	SPF : 20,0 / PER : 7,8 (bw) / 8,4 (ow)

¹ Bovenste verbrandingswaarde van aardgas (zie trefwoordenlijst)

² Onderste verbrandingswaarde van aardgas (zie trefwoordenlijst)

6.1.2 Kodi - Heerhugowaard



Naam bedrijf	Kodi b.v – Energiebesparende Technieken
Plaats	Heerhugowaard
Soort gebouw	Kantoor en bedrijfsruimte
Aantal werknemers	15 (werkzaam in het pand)
Opleverdatum	Juli 1998
Gebruikersoppervlak	960 m ²
Stempeloppervlak	650 m ²
Schiloppervlak (exclusief beganegrondvloer)	1500 m ²
Oppervlak glas in gevel	120 m ²
Oppervlak glas in dak	6 m ² (glaskoepel t.b.v. natuurlijke luchtafvoer)
Rc-waarde dichte geveldelen (gevel, dak, vloer)	Rc = 3,0 m ² ·K/W
U-waarde raam	U = 1,1 W/m ² ·K

Type verwarmingssysteem (mono- of bivalent)	Monovalent
Thermisch verwarmingsvermogen van warmtepomp	2 x traploos modulerende warmtepompen (prototype); verwarmingsvermogen 2 x (10...50kW)
Gemiddelde brontemperatuur van de warmtepomp	Tussen 7°C en 12°C (stook- resp. koelseizoen)
Afgifte temperatuur van de warmtepomp	Gemiddeld 32°C in stookseizoen (met stooklijn)
Koelvermogen	27 kW (geschatte ontwerpvermogen freecooler)
Aantal constructief benodigde fundatiepalen	65 stuks
Aantal in gebruik zijnde energiepalen	62 + één niet gekoppelde tempertuurmeetpaal
Bruto / thermisch effectieve lengte van één energiepaal	19,50 m / 17,50 m (gemiddelde waarden)
Totaal thermisch effectieve paallengte	62 x 17,50 ~ 1085 m
Bijzonderheden	Eerste energiepalenproject in Nederland
Overige energiebesparende maatregelen	Automatische binnenzonwering (folie), zeer laag temperatuur vloerverwarming (<35°C), hoog temperatuur vloer- en plafondkoeling (aangesloten op freecooler), natuurlijk luchttoevoersysteem met automatisch corrigerende gevelroosters, hybride luchtafvoersysteem (natuurlijk d.m.v. glazen dakkoepel en mechanisch), warmteterugwinning uit ventilatielucht, HF-verlichting met persoondetectie en daglichtregeling, warmtepompboilers t.b.v. tapwater.
Gemeten SPF & PER (totaal april 2000 – maart 2001)	SPF : 2,6 / PER : 1,0 (bw) / 1,1 (ow)
Gemeten SPF & PER (verwarmen april 2000 – maart 2001)	SPF : 2,7 / PER : 1,1 (bw) / 1,1 ow)
Gemeten SPF & PER (koelen april 2000 – maart 2001)	SPF : 10,0 / PER : 3,9 (bw) / 4,2 (ow)

6.1.3 Noordersluis – Bouwbedrijf – Lelystad



Naam bedrijf	Bouwbedrijf Noordersluis
Plaats	Lelystad
Soort gebouw	Kantoor
Aantal werknemers	35 à 40
Opleverdatum	Mei 1999
Gebruikersoppervlak	1063 m ²
Stempeloppervlak	23 x 23 m ²
Schiloppervlak (incl. vloer)	1953 m ²
Oppervlak glas in gevel	279 m ²
Oppervlak glas in dak	51,4 m ²
Re-waarde dichte geveldelen (gevel, dak, vloer)	Re gevel = 3,8 Re dak = 5,3 Re vloer = 3,5 m ² K/W
U-waarde raam	U = 1,1 W/m ² K

Type verwarmingssysteem (mono- of bivalent)	Bivalent (Warmtepomp en HR-ketel)
Thermisch verwarmingsvermogen van warmtepomp	20 kW
Gemiddelde brontemperatuur van de warmtepomp	Bodembron (wordt niet gemeten)
Afgifte temperatuur van de warmtepomp	Niet gemeten
Koelvermogen	27 kW (geschatte vermogen van freecooler)
Aantal constructief benodigde fundatiepalen	80
Aantal in gebruik zijnde energiepalen	23
Lengte van 1 energiepaal	15 m
Overige energiebesparende maatregelen (warmte-terugwinning, verlichting etc)	Goede kierdichting, HR-wtw, zuinige verlichting, LT-verwarming
Gemeten SPF	Niet gemeten
Gemeten PER (boven- en onderwaarde vermelden)	Niet gemeten

6.1.4 Pilkes Infra – Stompetoren



Naam bedrijf	Pilkes Infra
Plaats	Stompetoren
Soort gebouw	Kantoor + magazijn
Aantal werknemers	90
Opleverdatum	Oktober 1999
Gebruikersoppervlak	4000 m ²
Stempeloppervlak	3000 m ²
Schiloppervlak (exclusief beganegrondvloer)	4500 m ²
Oppervlak glas in gevel	250 m ²
Oppervlak glas in dak	35 m ² (glaskoepel t.b.v. natuurlijke luchtafvoer)
Rc-waarde dichte geveldelen (gevel, dak, vloer)	Rc = 3,2 m ² ·K/W
U-waarde raam	U = 1,1 W/m ² ·K

Type verwarmingssysteem (mono- of bivalent)	Monovalent
Thermisch verwarmingsvermogen van warmtepomp	2 x traploos modulerende warmtepompen; verwarmingsvermogen 2 x (20...70kW)
Gemiddelde brontemperatuur van de warmtepomp	Tussen 8°C en 13°C (stook- resp. koelseizoen)
Afgifte temperatuur van de warmtepomp	Gemiddeld 32 °C in stookseizoen (met stooklijn)
Koelvermogen	40 kW (geschatte ontwerpvermogen van free-cooler)
Aantal constructief benodigde fundatiepalen	174 stuks
Aantal in gebruik zijnde energiepalen	139 stuks
Bruto / thermisch effectieve lengte van één energiepaal	17,20 m / 15,20 (gemiddelde waarden)
Totaal thermisch effectieve paallengte	139 x 15,2 ~ 2113 m
Overige energiebesparende maatregelen (warmterugwinning, verlichting etc)	Horizontale zonweringslamellen boven glaspartijen, handbediende binnenzonwering, zeer laag temperatuur vloerverwarming (<35°C), hoog temperatuur vloer- en plafondkoeling (aangesloten op freecooler), natuurlijk luchttoevoersysteem met automatisch corrigerende gevelroosters, hybride luchtafvoersysteem (natuurlijk d.m.v. glazen dakkoepel en mechanisch), warmterugwinning uit ventilatielucht, HF-verlichting met persoondetectie en daglichtregeling, warmtepompboilers t.b.v. tapwater.
Gemeten SPF & PER (totaal feb. 2002 – feb. 2003)	SPF : 3,7 / PER : 1,4 (bw) / 1,5 (ow)
Gemeten SPF & PER (verwarmen feb. 2002 – feb. 2003)	SPF : 3,3 / PER : 1,3 (bw) / 1,4 (ow)
Gemeten SPF & PER (koelen feb. 2002 – feb. 2003)	SPF : 9,4 / PER : 3,7 (bw) / 4,0 (ow)

6.1.5 Trind Cosmetics – Nibbixwoud



Naam bedrijf	Trind Cosmetics BV.
Plaats	Nibbixwoud (Noord-Holland)
Soort gebouw	bedrijfskantoor (kantoor + werkplaats/magazijn)
Aantal werknemers (gemiddeld dagelijks aanwezig)	± 15 (in 2001)
Opleverdatum	september 1999
Gebruikersoppervlak	1490 m ²
Stempeloppervlak	731 m ² BG-vloer
Schiloppervlak	2248 m ² (incl. BG-vloer)
Oppervlak glas in gevel	141 m ²
Oppervlak glas in dak	-
Rc-waarde dichte geveldelen (gevel, dak, vloer)	gevel muur Rc=3,5 / gevel panelen Rc=6,7 / dak Rc=5,0 / vloer Rc=3,0 m ² .K/W
U-waarde glas	U=1,1 W/m ² .K

Type verwarmingssysteem (mono- of bivalent)	bivalent
Thermisch verwarmingsvermogen van warmtepomp	14 kW
Gemiddelde brontemperatuur van de warmtepomp	11,3 °C
Afgifte temperatuur van de warmtepomp	25,5 °C
Koeling	vrije koeling
Aantal constructief benodigde fundatiepalen	134 fundatiepalen
Aantal in gebruik zijnde energiepalen	24 energiepalen
Thermisch effectieve lengte van 1 energiepaal	± 14 m
Overige energiebesparende maatregelen (warmterugwinning, verlichting etc)	Goede kierdichting, HR-wtw ventilatielucht, zuinige verlichting met vertrekschakelaar, LT-verwarming
Gemeten SPF & PER (totaal, april 2000 - april 2002)	SPF = 4,2 / PER = 1,8 (b.w) / PER = 2,0 (o.w.)
Gemeten SPF & PER (koelen, april 2000 - april 2002)	SPF = 9,3 / PER = 3,6 (b.w) / PER = 4,0 (o.w.)

6.1.6 ZTI Mechatronics – Tuitjenhorn



Naam bedrijf	ZTI Mechatronics
Plaats	Tuitjenhorn
Soort gebouw	Kantoor + werkplaats
Aantal werknemers	10
Opleverdatum	december 1998
Gebruikersoppervlak	845 m ²
Stempeloppervlak	700 m ²
Schiloppervlak (exclusief beganegrondvloer)	1510 m ²
Oppervlak glas in gevel	150 m ²
Oppervlak glas in dak	33 m ² (wintertuin tussen kantoor en werkplaats)
Rc-waarde dichte geveldelen (gevel, dak, vloer)	Rc = 2,6 m ² ·K /W
U-waarde raam	U = 1,2 W/m ² ·K

Type verwarmingssysteem (mono- of bivalent)	Bivalent (energieheipalensysteem ontworpen voor monovalent gebruik / in een later stadium heeft de opdrachtgever gekozen voor de bivalente oplossing)
Thermisch verwarmingsvermogen van warmtepomp	1 x aan/uit warmtepomp; verwarmingsvermogen 20 kW
Gemiddelde brontemperatuur van de warmtepomp	Tussen 10°C en 15°C (stook- resp. koelseizoen)
Afgifte temperatuur van de warmtepomp	Gemiddeld 30,5 °C tijdens stookseizoen
Koelvermogen	27 kW (geschatte ontwerpvermogen van free-cooler)
Aantal constructief benodigde fundatiepalen	66 stuks
Aantal in gebruik zijnde energieheipalen	65 + één niet gekoppelde temperatuurmeetpaal
Bruto / thermisch effectieve lengte van één energieheipaal	22,25m / 20,25 m (gemiddelde waarden)
Totaal thermisch effectieve paallengte	65 x 20,25 ~ 1316 m
Overige energiebesparende maatregelen (warmterugwinning, verlichting etc)	Horizontale zonweringslamellen boven glaspartijen, zeer laag temperatuur vloerverwarming (<35°C), hoog temperatuur vloerkoeling, warmterugwinning uit ventilatielucht, HF-verlichting met persoondetectie en daglichtregeling, hoog temperatuur ventilatiekoeling en vloerkoeling (aangesloten op freecooler).
Gemeten SPF & PER (totaal jan. 2002 – jan. 2003)	SPF : 2,6 / PER : 1,5 (bw) / 1,6 (ow)
Gemeten SPF & PER (verwarmen jan. 2002 – jan. 2003)	SPF : 2,0 / PER : 1,2 (bw) / 1,3 ow)
Gemeten SPF & PER (koelen jan. 2002 – jan. 2003)	SPF : 14,0 / PER : 5,5 (bw) / 5,9 (ow)

6.1.7 Kender Thijssen – Veenendaal



Naam bedrijf	Kender Thijssen
Plaats	Veenendaal
Soort gebouw	Kantoor + magazijn +technische dienst
Aantal gebouwgebruikers	350
Opleverdatum	November 2000
Gebruikersoppervlak	12000 m ²
Stempeloppervlak	6400 m ²
Schiloppervlak (exclusief beganegrondvloer)	1510 m ²
Oppervlak glas in gevel	2400 m ²
Oppervlak glas in dak	
Rc-waarde dichte geveldelen (gevel, dak, vloer)	Rc = 3,2 m ² .K /W
U-waarde raam	U = 1,9 W/m ² .K

Type verwarmingssysteem (mono- of bivalent)	Bivalent (warmtepomp dekt met ca. 30% van het vermogen 75% van de vraag)
Thermisch verwarmingsvermogen van warmtepomp	2 x aan/uit warmtepomp; verwarmingsvermogen totaal 90 kW
Gemiddelde brontemperatuur van de warmtepomp	Tussen 10°C en 15°C (stook- resp. koelseizoen)
Afgifte temperatuur van de warmtepomp	Gemiddeld 30,5 °C tijdens stookseizoen
Koelvermogen	140 kW met WP; 500 kW met koelmachine; WP dekt ca. 75% van de koelvraag
Aantal constructief benodigde fundatiepalen	ca. 400
Aantal in gebruik zijnde energiepalen	140
Bruto / thermisch effectieve lengte van één energiepaal	18 m / 16 m (gemiddelde waarden)
Totaal thermisch effectieve paallengte	140 x 16 ~ 2240 m
Overige energiebesparende maatregelen (warmteterugwinning, verlichting etc)	Automatische buitenzonwering, laag temperatuur klimaatplafonds (<45°C), hoog temperatuur koeling (>10°C), warmteterugwinning uit ventilatielucht, HF-verlichting met persoondetectie, daglichtregeling en veegschakeling,
Gemeten SPF & PER (totaal april 2002 - april 2003)	SPF : 1,8 / PER 1,0 (bw) / 1,1 (ow)

6.2 Kosten

De kosten van energiepalen hangen sterk af van een aantal projectgebonden factoren. De in dit handboek genoemde bedragen dienen dan ook slechts als richtwaarden te worden opgevat.

De onderhoudskosten van een energiepalensysteem zijn relatief laag. Het systeem is hydraulisch volledig gesloten waardoor geen problemen zoals vervuiling en verstopping kunnen ontstaan. Dit is een belangrijk verschil met aquifersystemen. Daarnaast hoeven er geen additionele vergunningen te worden aangevraagd om energiepalen te gebruiken. Dit resulteert in tijdwinst.

Het energiepalensysteem is in mechanisch opzicht uitstekend beschermd doordat de slangen zijn geïntegreerd in de betonnen heipaal. De overige leidingen bevinden zich volledig onder het gebouw. Het gevaar van beschadiging door bijvoorbeeld boomwortels of graafwerkzaamheden rond het gebouw is dus minimaal.

Kosten energieheipalen

Voor de levering en montage van een energiepalensysteem, waarbij de demarcatie is gesteld op het aansluitpunt aanvoer/retour in de technische ruimte, is de meerprijs ten opzichte van 'normale' heipalen ca. € 600,- per kW onttrekkingsvermogen. De meerprijs is gebaseerd op een onttrekkingsvermogen van 35 W per meter thermisch effectieve paallengte. Bij de inschatting van de meerkosten is rekening gehouden met de volgende punten:

1. Ontwerp productiegegevens energieheipalen.
2. Levering en productie van de slangen welke opgenomen worden in de energieheipalen.
3. Ontwerp en koppeling van de energieheipalen op de verdelers/verzamelaars (horizontaal slangensysteem).
4. Levering en montage punt 3.
5. Ontwerp onderlinge hydraulische koppeling van de verdelers/verzamelaars tot aansluitpunt aanvoer/retour in de technische ruimte.
6. Levering en montage punt 5.
7. Vullen van het systeem met warmtetransportmedium.
8. Hydraulisch inregelen van verdelers/verzamelaars.

In de meerprijs zijn niet opgenomen de kosten voor een haalbaarheidsstudie, de bepaling van de geometrie en de eventueel benodigde computersimulatie.

Subsidie

De subsidie mogelijkheden zijn op dit moment (eind 2003) beperkt.

De EIA¹ is voor winstgevende bedrijven een mogelijkheid subsidie te verkrijgen.

In bijlage 2 is een rekenvoorbeeld opgenomen.

¹ Energie Investerings Aftrek

7. Referenties en literatuur

Bakker, E.J., Helden, van, W.G.J. (2001) Evaluatie kosten en prestatie praktijk-experiment, bedrijfskantoor Trend Cosmetics B.V. te Nibbixwoud, rapport ECN-C--01-086, Energieonderzoek Centrum Nederland, Petten, september 2001.

Claesson, J., Eskilson, P. (1988) PC Design model for heat extraction boreholes, Proc. 4th Int. Conf. Energy Storage JIGASTOCK 88, pp. 135-137

Claesson, J. (1991) PC Design model for thermally interacting deep ground heat exchangers, IEA Heat Pump Centre report HPC-WR-8, 95-104

DWA (2003), Meting energetische prestaties concentrische energiepalen, project 6833, DWA, 19 februari 2003

Eskilson, P., Claesson, J. (1988), Simulation model for thermally interacting heat extraction boreholes, Numerical Heat Transfer, vol. 13, pp. 149-165

Geelen, C.P.J.M., Bootsveld, N.R. (2000/rev. 2002) Standaard Opzet Monitoring Warmtepopen in de Utiliteit, TNO-rapport R 2000/035, januari 2000, aangepast februari 2002

Geelen, C.P.J.M., Knipscheer, H.J.M. (2002), Quick-Scan Warmtepompsystemen Utiliteit, versie 2.2, (TNO-MEP/IB Knipscheer), november 2002

Geelen, C.P.J.M., Mieog, A.J., (2003) Monitoring warmtepompsysteem Pilkes volgens SOM-WP, TNO-Rapport R 2003/134, maart 2003

Geelen, C.P.J.M., Mieog, A.J., (2003) Rapportage monitoring warmtepompsysteem Trind Cosmetics, TNO-Rapport R 2003/135, maart 2003

Geelen, C.P.J.M., Mieog, A.J., (2003) Rapportage monitoring warmtepompsysteem ZTI Megatronics, TNO-Rapport R 2003/136, maart 2003

Guernsey, E.N., Betz, P.L., Skan, N.H. (1949), Earth as a heat source and storage medium for the heat pump, ASHVE Trans., vol. 55, pp. 321-344

Helden, van, W.G. J., Wassenaar, R.H. (1999) Haalbaarheidsstudie energiebesparende maatregelen: bedrijfsgebouw Trind Cosmetics b.v. Wognum, rapport ECN-C--99-004, Energieonderzoek Centrum Nederland, Petten, april 1999.

Hellström, G. (1996) Inventory of UTESS design and analysis tools, Int. Energy Agency, ECES, Annex 8, Subtask 4, final report may 1996,

Hellström, G., Sanner, B., (1994) Software for dimensioning of deep boreholes for heat extraction, Proc. 6th Int. Conf. Energy Storage CALORSTOCK 94, pp. 195-202

Hellström, G., Sanner, B., PC-programs and modelling for borehole heat exchanger design, Int. Summer School on direct application of geothermal energy

Hellström, G., Sanner, B., Klugescheid, M., Gonka, T., Martensson, S. (1997), Experiences with the borehole heat exchanger software EED, Proc. 7th Int. Conf. Energy Storage MEGASTOCK 97, pp. 247-252

IF Technology, NITG-TNO (2001) "Bodemgeschiktheid voor toepassing van verticale bodemwarmtewisselaars" versie 1.0; september 2001; Novem bestelnr. 2WPWB01.06

Ingersoll, L.R., Zobel, O.J., Ingersoll, A.C. (1948) Heat conduction with engineering and geological application, McGraw-Hill, New York

Ingersoll, L.R., Plass, H.J. (1948) Theory of the ground pipe source for the heat pump, ASHVE Trans, vol. 54, pp. 339-348

Kavanaugh, S.P., Rafferty, K. (1997) Ground-Source Heat Pumps – Design of Geothermal systems for commercial and institutional buildings, ASHRAE, Atlanta GA

KLIC, Kabels en Leidingen Informatie Centrum, Maarsse

Koene, F.G.H. (2002) Monitoring Kodi: energieheipalen als fundament onder een energiezuinig gebouw, rapport ECN-C--02-035, Energieonderzoek Centrum Nederland, Petten, juli 2002.

Koene, F.G.H., Geelen, C.P.J.M. (2000) Energy piles as an efficient way to store heat, (ECN/TNO-MEP), artikel in Caddet Energy Efficiency, 2000.

Sanner, B., Auslegung von Erdwärmesonden mit PC-Programmen und Anwendung numerischer Simulation in der Oberflächennahen Geothermie, Inst. F. Angewandte Geowissenschaften, Gießen, Duitsland

Shonder, J.A., Baxter, V., Thornton, J., Hughes, P.J. (1999) A new comparison of vertical ground heat exchanger design methods for residential applications, ASHRAE, SE-99-20-01, 1999 Annual meeting, Seattle WA

Shonder, J.A. (2000) Comparison of commercially available design software for closed-loop vertical ground heat exchangers, Proc. 4th Int. Heat Pumps in Cold Climates Conf., Aylmer, Québec, Aug. 17-18, 2000

Sijpheer, N.C., Helden, van, W.G.J. (2000) Energiegebruik van het kantoorgebouw van bouwbedrijf Noordersluis, rapport ECN-C--00-096, Energieonderzoek Centrum Nederland, Petten, november 2000.

Spitler, J.D. (2000) GLHEPRO – A design tool for commercial building ground loop heat exchangers, Proc.. 4th Int. Heat Pumps in Cold Climates Conf., Aylmer, Québec, Aug. 17-18, 2000

Meer informatie:

Leveranciers energiepalen

BetonSon,
Ekkersrijt 3301
Postbus 5
5690 AA Son
<http://www.betonson.nl/>

Voorbij Prefab Beton B.V.
Zuider IJdijk 70
1095 KN Amsterdam
<http://www.voorbij-groep.nl/>

Samenstellers van dit Handboek Energiepalen

ECN
Westerduinweg 3
Postbus 1
1755 ZG Petten
<http://www.ecn.nl>

Kodi Energiebesparende Technieken
Galileistraat 61
Postbus 430
1700 AK Heerhugowaard
<http://www.kodi.nl>

TNO-MEP
Laan van Westenenk 501
Postbus 342
7300 AH Apeldoorn
<http://www.mep.tno.nl>

8. Verantwoording

Naam en adres van de opdrachtgever:

Novem
T.a.v. Roger Ravelli

Namen en functies van de projectmedewerkers:

TNO-MEP:
Charles Geelen
Lucienne Krosse

KODI:
Peter Sterrenburg

ECN:
Ernst-Jan Bakker
Niels Sijpheer

Namen van instellingen waaraan een deel van het onderzoek is uitbesteed:

ECN te Petten
KODI te Heerhugowaard

Datum waarop, of tijdsbestek waarin, het onderzoek heeft plaatsgehad:

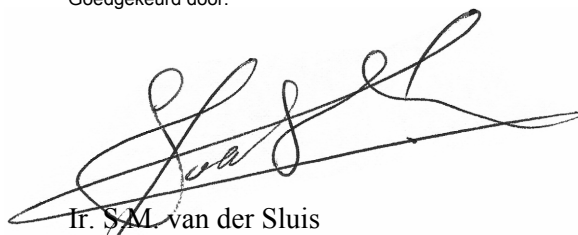
Oktober 2001 t/m november 2003

Ondertekening:



Ir. C.P.J.M. Geelen
projectleider

Goedgekeurd door:



Ir. S.M. van der Sluis
afdelingshoofd

Bijlage 1 Trefwoordenlijst

Aanvoertemperatuur

De temperatuur van een mediumstroom die zich van de warmtepomp af beweegt. Bij verwarmingswater is dat dus de warme stroom, bij het bronmedium de koude stroom van de verdampers naar de energiepalen. Deze externe temperaturen worden in hoge mate bepaald door de interne condensor respectievelijk verdampertemperaturen van de warmtepomp.

Aanvoertemperatuur bron ($T_{bron,a}$)

De temperatuur van het bronmedium zoals dat de warmtepomp verlaat.

Bivalent

Bij een bivalent warmtepompsysteem maakt de warmtepomp slechts een deel uit van de totaal geïnstalleerde warmte (en/of koude) capaciteit. De ontbrekende capaciteit wordt ingevuld met een hulpstookinstallatie. Deze bestaat meestal uit een gasgestookte ketel of uit elektrische weerstandsverwarming (dit laatste vooral bij tapwatersystemen).

Bovenwaarde (H_b)

Bovenste verbrandingswaarde van aardgas: 35,1 MJ/nm³; wordt in de EPN gebruikt om $\eta_{centrale}$ te bepalen. Op basis van bovenwaarde is het huidige gemiddelde centrale opwekkendement (incl. netverliezen) ca. 39%. De beste Nederlandse centrale heeft bij deze definitie een rendement van 50%.

COP (Coefficient of Performance)

De efficiency waarmee een warmtepomp warmte respectievelijk koude produceert:

- bij warmte productie is dit het quotiënt van de geleverde warmte door de condensor en de toegevoerde elektriciteit.
- bij koude productie is dit het quotiënt van de geleverde koude door de verdampers en de toegevoerde elektriciteit.

Dit kengetal heeft alleen betrekking op de warmtepomp zelf, hierin wordt geen hulpenergie van circulatie- of voedingspompen meegenomen.

Dekkingsgraad

Aandeel van de totale vraag aan warmte of koude dat door de warmtepomp wordt geleverd.

(bij een monovalent systeem is de dekkingsgraad dus altijd 100%).

Efficiency vrije koeling

De verhouding tussen geleverde koeling uit het bronsysteem (de energiepalen) en de daarvoor benodigde pompenergie. Bij de pompenergie wordt zowel de bronpomp als de (eventuele) centrale transportpomp naar de afnemers meegerekend. In de praktijk zal dit kengetal een waarde hebben tussen 15 en 25.

Nadrukkelijk wordt gesteld dat aan dit kengetal niet de aanduiding “COP” mag worden gekoppeld; de benaming COP is voorbehouden aan de omzetting van arbeid in warmte bij thermodynamische kringprocessen, zoals die bijvoorbeeld in een warmtepomp plaatsvinden.

(zie ook passieve koeling)

Energie (hei)paal

Heipaal waarin een (of meerdere) warmtewisselaars zijn geïntegreerd. Een energiepaal heeft een dubbele functie, enerzijds de conventionele constructieve functie en anderzijds de functie als ‘bodemwarmtewisselaar’.

Equivalentente vollasturen

Aantal uren per jaar dat een energieomzetter (of installatie) op vol vermogen in bedrijf zou moeten zijn om een bepaalde hoeveelheid energie te leveren. Bij apparaten die alleen de toestand aan/uit (100% / 0%) kennen is het aantal equivalente vollasturen gelijk aan de bedrijfstijd.

Hybride systeem

Bij een hybride systeem zijn naast de warmtepomp nog andere energiebesparende opwekkingstechnieken toegepast, bijvoorbeeld een thermische zonnecollector.

Jaarbelastingduurkromme

Weergave van de energievraag (voor verwarming, koeling, elektriciteit) gesorteerd naar grootte van het vermogen. Meestal gebaseerd op uurlijkse waarden van de energievraag gedurende een jaar.

Koeling, actieve

Koeling waarbij de warmtepomp van functie omkeert en koeling aan het gebouw levert. De condensorwarmte wordt aan de bodem toegevoerd (en opgeslagen voor perioden met warmtevraag). In vergelijking met passieve koeling kan meer warmte met een hoger vermogen aan de bodem worden afgegeven vanwege de hogere mediumtemperatuur in de energiepalen. De warmtepomp levert koude met een hoge COP (ca. 5 tot 7) omdat de verdamper en condensortemperaturen dicht bij elkaar liggen dan bij een koelmachine die de condensorwarmte aan de buitenlucht afgeeft.

Koeling, passieve

Koeling waarbij de warmtepomp buiten bedrijf is. Het circuit in de energiepalen wordt via een warmtewisselaar aan het afgiftesysteem in het gebouw gekoppeld. Hiermee is koeling met een beperkt vermogen tegen een zeer lage hoeveelheid pompenergie (factor ca. 15 tot 25) te realiseren. De benodigde temperatuur van het gekoeld water systeem is de beperkende factor: hoe lager, hoe meer koeling aan het gebouw kan worden afgegeven (warmteopname uit het gebouw); hoe hoger deze temperatuur, hoe meer warmte aan de bodem kan worden afgegeven.

Monovalent

Bij een monovalent warmtepompsysteem wordt alle warmte uitsluitend door de warmtepomp geleverd. De warmtepomp is de enige opwekker. Zie ook Bivalent en Hybride.

Nuttig geleverde warmte en koude

Nuttig geleverde warmte en koude is de energie die het “ketelhuis” verlaat. Deze definitie vindt zijn oorsprong in de SOM-WP; het gaat hierbij om een duidelijke afbakening van de systeemgrens. In de SOM-WP gaat het om het rendement van de centrale opwekinstallatie: de daar optredende verliezen worden meegenomen in het systeemrendement. Verdere verliezen bij het transport naar of in het gebouw of woning van de afnemers blijven hier buiten beschouwing.

Onderwaarde (H_0)

Onderste verbrandingswaarde van aardgas: 31,65 MJ/nm³; wordt buiten de EPN vaak gebruikt om $\eta_{cv-ketel}$ en $\eta_{centrale}$ weer te geven. Op basis van onderwaarde wordt momenteel (2003) een gemiddelde centrale rendement van ca. 45% gehanteerd (inclusief distributie verliezen); de beste Nederlandse centrale heeft een rendement van 55%. Bij deze definitie kunnen HR-ketels een rendement van meer dan 100% (max. 110%) halen.

Primaire Energie

Het energiegebruik uitgedrukt in m³ aardgas. Elektriciteit wordt hierbij omgerekend naar de daarvoor benodigde hoeveelheid aardgas in een elektriciteitscentrale. Let hierbij op het consequent gebruik van “Onderwaarde” of “Bovenwaarde”.

Primary Energy Ratio (PER)

De verhouding tussen de nuttig geleverde warmte en koude en de hiervoor benodigde primaire energie berekend over een bepaalde periode.

Quick Scan WP-Utiliteit

Software programma voor haalbaarheidsberekeningen ten aanzien van warmtepomp toepassing in kantoren en verpleeghuizen. [Geelen (2002)]

Seasonal Performance Factor (SPF)

De verhouding tussen de nuttig geleverde warmte en koude, en de totaal daarvoor toegevoerde energie, berekend over een bepaalde periode.

Dit kengetal heeft betrekking op het totale opweksysteem: de warmtepomp inclusief alle hulpenergie: pompenergie en ook eventuele bijstook of aanvullende koeling.

SOM-WP

De SOM-WP (Standaard Opzet Monitoring Warmtepompen) is een door TNO-MEP, in opdracht van Novem, opgezette methodiek waarmee de prestaties van verschillende warmtepompsystemen onderling vergeleken kunnen worden.

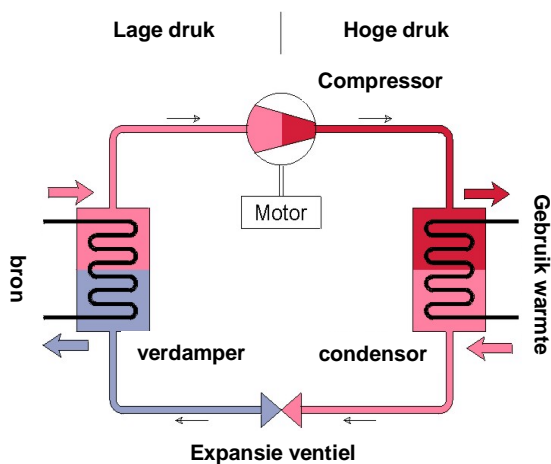
De SOM-WP is beschikbaar voor de woningbouw en de utiliteit.

Warmtelevering door de bron

Dit is de thermische energie (warmte) die door de bron gedurende een bepaalde periode wordt geleverd aan de verdamper van de warmtepomp.

Warmtepomp

Het apparaat dat warmte uit een bron kan opnemen en kan afgeven op een voor verwarmingsdoeleinden geschikt hoger temperatuurniveau.



Figuur 1 Warmtepomp.

Warmtepompsysteem

Het totale systeem, waarvan de warmtepomp deel uitmaakt, dat in een woning of gebouw zorgt voor ruimteverwarming en/of warmtapwater. Het warmtepompsysteem omvat de warmtebron tot en met het afgiftesysteem, inclusief de regeling ervan.

Bijlage 2 Rekenvoorbeeld EIA

In het onderstaande berekeningsvoorbeeld wordt uitgegaan van een onttrekkingsvermogen van 100 kW.

De bruto meerkosten ten opzichte van een 'normaal' heipalensysteem zijn:

$$100\text{kW} * 600/\text{kW} = 60.000$$

Vennootschapsbelasting 29% over de eerste 22.689,- winst (a) en 34,5% over de resterende winst (b).

$$(a) 55\% * 29,0\% * 22.689 = 3.620,-$$

$$(b) 55\% * 34,5\% * (60.000 - 22.689) = 7.080,-$$

$$\text{Totaal EIA-voordeel} = (a) + (b) = 10.700,-$$

$$\text{Netto meerkosten} = 60.000 - 10.700 = 49.300,-$$

$$\text{Netto meerkosten per kW onttrekkingsvermogen} = 493 \sim 500/\text{kW}$$

Korte achtergrond EIA 2003 (Bron: Senter)

Doel van de regeling Energie-investeringsaftrek (EIA) is energiebesparing en de inzet van duurzame energie door het Nederlandse bedrijfsleven te stimuleren. De EIA biedt de ondernemer een fiscaal voordeel als die investeert in energiebesparende bedrijfsmiddelen en duurzame energie. 55% van de investeringskosten van deze bedrijfsmiddelen is aftrekbaar van de fiscale winst. Het voordeel is duidelijk: de EIA drukt de fiscale winst. Over één of meer jaren hoeft er minder inkomstenbelasting of vennootschapsbelasting te worden betaald.

Om in aanmerking te komen voor de EIA moet het bedrag aan energie-investeringen ten minste 2.000 per kalenderjaar bedragen. De EIA is een percentage van het totale bedrag aan energie-investeringen in een kalenderjaar. Het percentage bedraagt in het jaar 2003 55%, ongeacht de omvang van de investering.

In één kalenderjaar wordt per fiscale eenheid/ondernemer over ten hoogste 103 miljoen aan energie investeringen EIA verleend. Dit betekent dat bij een bedrag aan energie-investeringen van bijvoorbeeld 150 miljoen in één kalenderjaar, de EIA 55% van 103 miljoen bedraagt. Over het resterende bedrag wordt geen EIA verleend. Het totale budget voor de EIA bedraagt in het jaar 2003 ongeveer 161 miljoen aan netto fiscaal voordeel. Het bedrijfsleven kan hiervoor meer dan 1 miljard aan energie-investeringen doen. Op de internetsite van Senter kan het budgettaire verloop gevolgd worden (<http://www.senter.nl/eia>).