

# **ENERGIEADVIES AANNEMINGSBEDRIJF REEK B.V.**

## **Koele lucht uit de bodem**

F.G.H. Koene  
F.A.T.M. Ligthart

## Verantwoording

Deze rapportage is door ECN Duurzame Energie in de Gebouwde Omgeving gemaakt in opdracht van Aannemingsbedrijf Reek B.V. Het onderzoek is uitgevoerd onder projectnummer 7.8009.03.19.

## INHOUD

1.	INLEIDING	7
2.	OPZET VAN HET KOELSYSTEEM	8
3.	HET NIEUWE GEBOUW	9
4.	ERVARINGEN MET EEN SYSTEEM VAN BODEMKOELING IN DEVENTER	10
5.	GEBRUIKTE MODELLEN VOOR HET BODEMSYSTEEM	12
5.1	Eenvoudig statisch model	12
5.2	Dynamisch model van de bodem	13
6.	DIMENSIONERING VAN HET BODEMSYSTEEM	15
6.1	Buizenplan	15
6.2	Resultaten van de berekeningen	16
6.2.1	Eenvoudig statisch model	16
6.2.2	Dynamisch model van de bodem	18
7.	HET VOORGESTELDE VENTILATIE- EN KOELSYSTEEM	22
7.1	Beschrijving van het ventilatie- en koelsysteem	22
7.2	Energetische vergelijking tussen bodemsysteem en conventioneel systeem	24
7.3	Economische vergelijking tussen bodemsysteem en conventioneel systeem	25
8.	CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN	27
9.	REFERENTIES	29



## SAMENVATTING

Voor de nieuwbouw van Aannemingsbedrijf Reek B.V. is gezocht naar toepassing van energiebesparende technieken bij het bereiken van een comfortabel binnenklimaat. Om oververhitting van de kantoorruimtes in de zomer te voorkomen is door ECN het voorstel gedaan om te werken met een passief koelsysteem, dat de ventilatielucht koelt met behulp van in de bodem opgeslagen koude. Hierdoor wordt het gebruik van airconditioners vermeden, waardoor een aanzienlijke besparing wordt bereikt op het energiegebruik.

Een soortgelijk systeem is toegepast bij de brandweerkazerne in Deventer. Het evaluatierapport, dat in opdracht van NOVEM is gemaakt, is bestudeerd en er is een gesprek geweest met de gebruikers van het systeem. Op basis daarvan is een aantal verbeteringen in het systeem voorgesteld.

Voor het dimensioneren van het bodemsysteem is gebruik gemaakt van een tweetal mathematische modellen. Met een eenvoudig statisch model kan snel worden berekend wat het effect op het koelvermogen is van buislengte, buisdiameter, luchtdebiet etc. Met een uitgebreider, dynamisch model kan vervolgens het bodemsysteem gedurende een periode van meerdere jaren worden doorgerekend.

Zo blijkt uit het dynamische model, dat de bodem geleidelijk zal opwarmen (tot 16 á 17°C in 10 jaar), indien er uitsluitend koude aan wordt onttrokken. Hierdoor zal het koelend vermogen aanzienlijk teruglopen. Om dit te voorkomen, zal er ook koude in de bodem ingebracht moeten worden ('regeneratie' van de bodem). Dit kan op efficiënte wijze door bij voldoende lage buitentemperaturen (vooral in de winter) lucht door de buizen te blazen.

Het blijkt dat het bodemsysteem een koelvermogen van ca. 19 kW kan leveren bij een luchtdebiet van 1 m<sup>3</sup>/s. Bij dat debiet kan er naar schatting 18.000 kWh per jaar aan koude aan de bodem worden onttrokken. De SPF (Seasonal Performance Factor), gedefinieerd als het (jaargemiddeld) aantal delen koude, dat met één deel elektriciteit (voor de ventilatoren) kan worden onttrokken, bedraagt bij dat debiet 20-30, afhankelijk van de uitvoering van het bodemsysteem. Bij lagere debieten en navenant lager koelvermogen, kan de SPF oplopen tot boven de 100. Het bodemsysteem blijkt daarmee een zeer energie-efficiënt koelsysteem.

Het concept is uitgewerkt in een opzet voor een ventilatie- en koelsysteem voor het nieuwe pand van Reek B.V. Hierbij wordt gebruik gemaakt van een combinatie van bodemkoeling en een warmteterugwin-unit. Tevens is een regelstrategie voorgesteld, die het comfort in het kantoor waarborgt, en die ervoor zorgt dat de bodem voldoende wordt geregenereerd. Het blijkt dat de benodigde investeringen voor dit systeem hoger zijn dan die voor een conventioneel systeem (met een airconditioning unit voor de koeling). Echter, door de efficiënte werking van het bodemsysteem (rekening houdend met de kosten van regeneratie) verdient het systeem zich in 3 tot 5 jaren terug (afhankelijk van de uitvoering).

Uiteindelijk is het voorgestelde ventilatie- en koelsysteem om verschillende redenen niet geïmplementeerd.

- De voor de bouw noodzakelijke kraan kwam op het perceel te staan, waardoor ofwel het bodemsysteem niet over het gehele perceel kon worden aangebracht ofwel het bodemsysteem in fasen moest worden aangebracht. Dat laatste leverde praktische problemen met de uitvoering op.
- Door de bouwkundige situatie bleek het moeilijk een geschikte aanzuigopening voor het ventilatie/koelsysteem te vinden. Immers, temperaturen op het dak lopen te hoog op en aan

de zijkanten van het pand kunnen uitlaatgassen van langskomend verkeer worden aangezogen.

- De indruk bestaat dat de aannemer terugschrok van de benodigde meerinvestering.
- Tenslotte zorgde onbekendheid met het systeem bij met name de elektrotechnisch installateur voor koudwatervrees.

## 1. INLEIDING

Aannemingsbedrijf Reek B.V. was in de zomer van 1999 bezig met de voorbereidingen voor een nieuwbouw van hun kantoor. De ambities met betrekking tot toepassing van energiebesparende technieken maar ook ten aanzien van het comfort zijn hoog gesteld. Bij het zoeken naar een oplossing voor het voorkomen van oververhitting van de kantoorruimtes in de zomer is door ECN het voorstel gedaan om te werken met een passief koelsysteem, gebruik makend van bodemkoeling met lucht. Door deze koeling toe te passen kan de inzet van airconditioners met bijbehorend energiegebruik worden vermeden.

## 2. OPZET VAN HET KOELSYSTEEM

Het betrekken van de bodem in de warmtehuishouding van een gebouw wordt steeds vaker gedaan. Meestal wordt dan zowel warmte als koude aan de bodem onttrokken. De warmte wordt in de winter gebruikt om het gebouw te verwarmen, de koude om het gebouw 's zomers te koelen. De onttrokken warmte is van relatief laag niveau: de temperatuur ligt tussen de 5 en de 10°C. Om die warmte voor gebouwverwarming te kunnen inzetten, moet het temperatuur niveau worden verhoogd naar 30 à 40°C (bij gebruik van lage temperatuur verwarming) of hoger, waardoor de investering in een warmtepomp noodzakelijk is.

Voor het nieuwe kantoor van Reek B.V. is gekozen voor een systeem, waarbij de investering in een warmtepomp niet nodig is. Die keuze wordt mede ingegeven door het feit dat bij goed geïsoleerde kantoren het koelen in de zomer steeds vaker een probleem is dan het verwarmen in de winter. Immers, de interne warmteproductie van verlichting, PC's en andere apparatuur, personen en zoninstraling, die de verwarming in de winter helpen, bemoeilijkt de koeling in de zomer. Het voorgestelde bodemsysteem is dan ook vooral bedoeld om het kantoorpand in de zomer te koelen (door warmte uit het gebouw in de grond te stoppen).

Het bodemsysteem bestaat uit een aantal PVC of PE buizen met een diameter van 0,1 à 0,2 m, die op een diepte van ongeveer 1 m horizontaal in de grond worden gelegd. 's Zomers wordt ventilatielucht door de buizen aangevoerd, die daardoor afkoelt. De afgekoelde ventilatielucht wordt vervolgens het gebouw ingebracht.

In principe kan het systeem ook in de winter worden gebruikt. De ventilatielucht wordt dan voorverwarmd door de buitenlucht door de relatief warme bodem te voeren. Uit ervaringen met een eender project [1] blijkt echter, dat deze functie beter vervuld kan worden door een warmteterugwin-unit. Immers, in de tussenseizoenen is voorverwarmen van de ventilatielucht via de bodem slechts beperkt mogelijk aangezien de buitenlucht ongeveer dezelfde temperatuur heeft als de bodem. Er is dan weinig energetische winst door toepassing van een bodemsysteem.

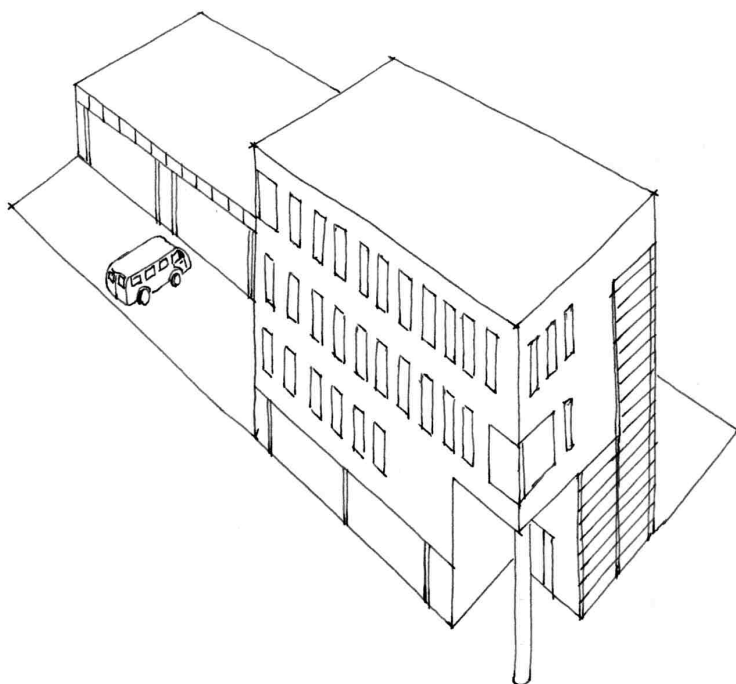
Daarentegen functioneert een warmteterugwin-unit weer niet goed op koude winterdagen. De afgevoerde lucht, met daarin het in het gebouw geproduceerde vocht, wordt in de warmteterugwin-unit dan zover afgekoeld, dat condensatie en mogelijk zelfs bevriezing optreedt. De gebruikelijke methode om dit te voorkomen, is het 'bypassen' van de warmteterugwin-unit, zodat de koude buitenlucht zonder voorverwarming in het gebouw wordt gebracht.

Bij het voorgestelde systeem van Reek B.V. worden de voordelen van beide systemen gecombineerd. In de tussenseizoenen functioneert alleen de warmteterugwin-unit. In de winter, dat wil zeggen bij buitentemperaturen onder het vriespunt, wordt de koude buitenlucht opgewarmd door het bodemsysteem en vervolgens door de warmteterugwin-unit. Dit heeft tevens het voordeel dat de grond in de winter afkoelt en op die manier de volgende zomer beter in staat is het gebouw te koelen.



### 3. HET NIEUWE GEBOUW

De nieuwbouw wordt gerealiseerd op de plek van de bestaande bouw. De kavel meet ca. 15 bij 30 m<sup>2</sup> en wordt bebouwd met een bedrijfsruimte en een kantoorpand. De bedrijfsruimte bestaat uit laagbouw, het kantoorgebouw heeft 4 verdiepingen met een grondoppervlak van ca. 15 bij 9 m<sup>2</sup> (zie figuur 1).



Figuur 1 *Schets van de nieuwbouw van Aannemingsbedrijf Reek in Alkmaar. De auto staat voor de oostgevel van de bedrijfsruimte.*

De ventilatiebehoefte van het gebouw hangt voornamelijk af van het aantal in het kantoor aanwezige personen. Indien er 20 mensen aanwezig zijn, is de ventilatiebehoefte ca. 700 m<sup>3</sup>/uur (0,2 m<sup>3</sup>/s).

Een standaard koellast berekening [2] geeft aan dat de interne warmteproductie van personen, PC's en verlichting 8 à 9 kW bedraagt. Tijdens hoogzomerperiodes komt daar nog eens 7 à 8 kW aan zoninstraling bij. Daarbij is zonwering aanwezig verondersteld (zonder zonwering wordt de zoninstraling ca. 18 kW). De totale warmtelast bedraagt dus ongeveer 16 kW. Zonder koeling zal de binnentemperatuur overdag tot onacceptabel hoge waarden kunnen oplopen.

Om de temperatuur in het gebouw constant te houden, moet er een zelfde vermogen aan koeling worden opgesteld (16 kW). Ook met een lager koelvermogen kan een acceptabel binnenklimaat worden gerealiseerd, door gebruik te maken van het warmteaccumulerend vermogen van het gebouw en additionele koeling door middel van zomernachtventilatie.

#### 4. ERVARINGEN MET EEN SYSTEEM VAN BODEMKOELING IN DEVENTER

In 1991 is de brandweerkazerne van Deventer in gebruik genomen. Dit gebouw is ontworpen door architecten- en ingenieurbureau Kristinsson, die ook het ventilatie- en koelsysteem heeft ontworpen. Onder de remise van de kazerne is op een diepte van 0,8 m onder het maaiveld (net boven het grondwaterniveau) een 12-tal PVC-buizen van rond 200 mm in een zandlaag gelegd. Via 4 aanzuigroosters op maaiveldhoogte aan de noordzijde van de remise wordt de buitenlucht aangezogen en via het buizenstelsel het gebouw ingezogen.

In de zomer wordt het gebouw gekoeld met in de bodem afgekoelde buitenlucht. In de winter wordt de ventilatielucht voor het gebouw door de bodem voorverwarmd, waardoor wordt bespaard op de verwarmingskosten. Er is namelijk geen warmteterugwin-unit in het ventilatiesysteem aanwezig. In de tussenseizoenen is het bodemsysteem grotendeels buiten bedrijf en wordt lucht rechtstreeks (dat wil zeggen niet via het buizenstelsel) aangezogen.

Doordat in de zomer de buitenlucht afkoelt in het buizenstelsel, is het mogelijk dat de temperatuur daalt tot beneden het dauwpunt. Er kan dan condensatie in de buizen optreden. Om te voorkomen dat het condensatievocht in de buizen blijft staan, met mogelijk algengroei als gevolg, zijn de buizen onder afschot gelegd. Op het diepste punt (bij de buisuitgang) is een pomp geplaatst, die het verzamelde condensaat afvoert naar het riool.

Nadat de installatie ongeveer een jaar in bedrijf is geweest, heeft de installateur, Eco Energy Engineering B.V., in opdracht van Novem het systeem geëvalueerd. De belangrijkste conclusies van dat onderzoek waren [1]:

- De warmteoverdracht van grond naar ventilatielucht is goed.
- Er treedt geen condensatie op in het buizenstelsel.
- De installatie heeft geen storingen of onderhoud opgeleverd.
- De installatie kan weliswaar economisch concurreren met een warmteterugwin-unit, maar energetisch is een warmteterugwin-unit beter.
- De installatie is ongeveer een factor 1½ overgedimensioneerd (op 1,67 m<sup>3</sup>/s i.p.v. de maximaal gebruikte 1,14 m<sup>3</sup>/s).
- De gebruikte regeling is niet optimaal, wat vooral betreft de criteria waarop beslist wordt of de buitenlucht rechtstreeks dan wel via het buizenstelsel wordt aangezogen.

Om de ervaringen van de gebruikers van een op dat moment negen jaar geleden opgeleverde installatie na te gaan, is een gesprek gevoerd met de brandwachtcommandant, de heer Kamst. Als belangrijkste punten komen naar voren:

- De binnentemperaturen zijn 's zomers aangenaam. Echter, niet prettig is dat de koele lucht aan één kant van de kamers wordt ingeblazen. Doordat deze onvoldoende met de ruimtelucht wordt gemengd, wordt de koele lucht al snel als (hinderlijke) tocht ervaren.
- Het koelvermogen is in de loop der jaren niet merkbaar teruggelopen. Blijkbaar zijn de aan de bodem toegevoerde warmte (in de zomer) en de aan de bodem onttrokken warmte (in de winter) min of meer in evenwicht.
- Het effect van voorverwarmen van de koude buitenlucht in de winter is moeilijk in te schatten. De capaciteit van de ketels is voldoende om ook bij een falende bodeminstallatie het gebouw op temperatuur te houden.
- In negen jaar bedrijf is er geen meetbare condensatie in de buizen opgetreden. Het is dus de vraag of plaatsing van de bodembuizen onder afschot nodig is.

- De lucht bevatte geen onaangename geurtjes, wat er op duidt dat er geen groei van schimmels of algen in de buizen heeft plaatsgevonden. Echter, de plaats van de aanzuigroosters blijkt niet optimaal: uitlaatgassen van voor het gebouw staande vrachtauto's worden vrij gemakkelijk het gebouw binnengezogen.
- De regeling van de koellucht was niet optimaal: het debiet is constant (niet regelbaar) en de buitenlucht wordt ofwel volledig via het buizensysteem ofwel volledig rechtstreeks aangezogen. Er wordt dus niet gemengd.
- In de zomer is het geluid van de installatie licht te horen, maar storend is dat niet.
- Het is niet mogelijk per kamer de ventilatie te regelen.
- Het inregelen van de installatie heeft enige tijd geduurd.

Samenvattend kan worden geconcludeerd dat het basisidee van de installatie voldoet, maar dat er op een aantal punten nog verbetering mogelijk is. Zo kan de regeling worden geoptimaliseerd en kunnen de sterke punten van een systeem van bodemopslag (eenvoudig, milieuvriendelijk) worden gecombineerd met die van een warmte terugwin unit (hoog energetisch rendement in met name de tussenseizoenen).

## 5. GEBRUIKTE MODELLEN VOOR HET BODEMSYSTEEM

Voor de dimensionering van het bodemsysteem is het wenselijk om het thermisch gedrag van de bodem met de daarin aanwezige buizen te kunnen modelleren. Daartoe is een tweetal computermodellen gebruikt, die in de volgende paragrafen worden besproken.

### 5.1 Eenvoudig statisch model

Met dit model wordt de temperatuurdaling berekend van de lucht, die door een in de bodem geplaatste buis stroomt.

De hoeveelheid warmte, die door de lucht aan de wanden wordt afgestaan, hangt af van het temperatuurverschil tussen lucht en bodem en de 'warmte weerstand'. Dat laatste is de weerstand, die de warmtestroom ondervindt door onder meer de isolerende werking van de stilstaande grenslaag aan de buiswand en de isolerende werking van het buismateriaal (PVC of PE). Belangrijkste parameter bij de warmteoverdracht van stromende lucht naar een wand is het dimensieloze Nusselt-getal (Nu), dat onder meer afhangt van het eveneens dimensieloze Reynolds-getal (Re).

Hoewel de temperatuur van de lucht zal dalen tussen ingang en uitgang, wordt voor het berekenen van de warmteoverdracht een gemiddelde luchttemperatuur en een gemiddelde bodemtemperatuur aangenomen. In formulevorm wordt deze warmtestroom:

$$Q_1 = A_{\text{buisw}} \cdot \Delta T_{\text{lucht-bodem rondom de buis}} / R_{\text{tot}}, \quad (1)$$

met  $Q_1$  de warmtestroom van lucht naar bodem in W,  $A_{\text{buisw}}$  het oppervlak van de buiswand in  $\text{m}^2$ ,  $\Delta T_{\text{lucht-bodem rondom de buis}}$  het gemiddeld temperatuurverschil tussen lucht en bodem rondom de buis in K, en  $R_{\text{tot}}$  de totale warmte weerstand in  $\text{m}^2\text{K/W}$ .

Indien de buizen in de bodem liggen, moet de warmte, die door de buiswand dringt, voldoende snel door de om de buis liggende grond kunnen 'wegdiffunderen'. Dat wordt weer gedicteerd door de warmte diffusievergelijking en de eigenschappen van de bodem. Om een uitdrukking te vinden voor deze warmtestroom, maken we een aantal benaderingen. Allereerst vereenvoudigen we de geometrie. De warmtestroom van buis naar grond wordt 'uitgesmeerd' gedacht over een horizontaal vlak ter diepte van de buis, zodat we eendimensionaal kunnen rekenen. Verder nemen we het analytisch bekende geval van een halfoneindige ruimte, waarbij de temperatuur aan het oppervlak sinusvormig varieert, als benadering voor de dag/nacht cyclus. Voor de 'wegdiffunderende' warmtestroom, nemen we de uitdrukking voor de maximale warmtestroom, die hoort bij dagelijkse temperatuurvariaties aan het oppervlak. In formule:

$$Q_2 = A_{\text{grond}} \cdot \Delta T_{\text{bodem rondom buis-bodem op grote diepte}} / R_{\text{warmte diffusie}}, \quad (2)$$

met  $Q_2$  de warmtestroom door de bodem in W,  $A_{\text{grond}}$  het oppervlak van de reep grond, die bij een enkele buis 'hoort' in  $\text{m}^2$ ,  $\Delta T_{\text{bodem rondom buis-bodem op grote diepte}}$  het gemiddeld temperatuurverschil tussen bodem rondom de buis en de bodem op grote diepte in K, en  $R_{\text{warmte diffusie}}$  de weerstand voor de warmte diffusie in  $\text{m}^2\text{K/W}$ . De warmtestroom  $Q_2$  moet uiteraard gelijk zijn aan de warmtestroom  $Q_1$ .

De warmtestroom van lucht naar bodem is loodrecht op de stromingsrichting van de lucht. Daarnaast moet in de stromingsrichting gelden dat de mate van afkoeling van de lucht wordt bepaald door de hoeveelheid warmte, die de lucht tijdens het transport door de buis heeft afgestaan. Voor deze warmtestroom geldt:

$$Q_3 = \Phi \cdot c_p \cdot \Delta T_{\text{uitgang buis-ingang buis}} \quad (3)$$

met  $Q_3$  de warmtestroom ten gevolge van afkoeling van de lucht in  $W$ ,  $\Phi$  het luchtdebiet in  $m^3/s$ ,  $c_p$  de warmtecapaciteit van de lucht in  $J/m^3$  en  $\Delta T_{\text{uitgang buis-ingang buis}}$  het temperatuurverschil van de lucht tussen ingang en uitgang van de buis. Ook deze warmtestroom moet gelijk zijn aan elk van de vorige twee warmtestromen.

In dit model worden het luchtdebiet en de luchttemperatuur aan de buisingang als gegeven beschouwd. De temperatuur aan de uitgang van de buis en de temperatuur van de grond rondom de buis worden vervolgens iteratief bepaald, zodanig dat geldt:  $Q_1=Q_2=Q_3$ .

Naast de warmtestroom wordt ook de drukval over de buizen berekend. Die wordt voornamelijk bepaald door het Reynolds-getal, dat weer afhangt van onder meer het luchtdebiet en de buisdiameter. Aangezien de temperatuur van de lucht slechts in een beperkte range varieert is voor de viscositeit van de lucht de waarde bij  $10^\circ C$  genomen.

Met dit model is eenvoudig te berekenen wat bij benadering het effect is van de buislengte, buisdiameter, buitentemperatuur, het debiet etc. op het koelvermogen van het bodemsysteem. Ook het benodigde elektrisch vermogen van de ventilator wordt berekend, waarbij een rendement van ventilator en elektromotor van 60% is verondersteld [3].

## 5.2 Dynamisch model van de bodem

Het dynamische gedrag van de bodem wordt in het statische model slechts in beperkte mate benaderd. Zo kan de bodem aan het eind van de zomer zijn opgewarmd, zodat het koelend vermogen terugloopt. Aangezien voldoende koelvermogen gedurende het jaar een vereiste van het bodemkoeling systeem is, is de bodem in meer detail in een apart model gemodelleerd.

Met het dynamische model wordt nagegaan hoe een bodemsysteem, dat is gedimensioneerd met het in de vorige paragraaf beschreven model, zich gedurende een jaar (het testreferentiejaar van De Bilt) gedraagt.

De bodem onder het gebouw wordt gesimuleerd als een rechte aardkorst met een dikte van 40 m. De bovenkant van de korst (direct onder het gebouw) wordt geïsoleerd gedacht (warmtestroom nul). Immers, door het gebouw vindt er immers geen zoninstraling op de bodem meer plaats. Aan de onderkant van de 40 m diepe korst zijn de temperatuurvariaties in de bovenste aardlagen ten gevolge van toe- en afvoer van warmte door de buizen voldoende uitgedempt. Jaarlijkse temperatuurvariaties zijn op een diepte van 40 m afgenomen met een factor  $10^5$ , dagelijkse variaties zelfs met een factor  $10^{10}$ . Ook aan de onderkant is de warmtestroom daarom nul verondersteld.

Op een diepte van 1 m zijn de buizen geplaatst. De warmtestroom vanuit of naar de buizen wordt verondersteld gelijkmatig te zijn 'uitgesmeerd' over een vlak op 1 m diepte. Voor het gedrag van de bodem is deze vereenvoudiging toegestaan zolang de schaal waarop de warmtestroom plaatsvindt (10 m) groot is t.o.v. de afstand van de buizen (1 à 1,5 m).

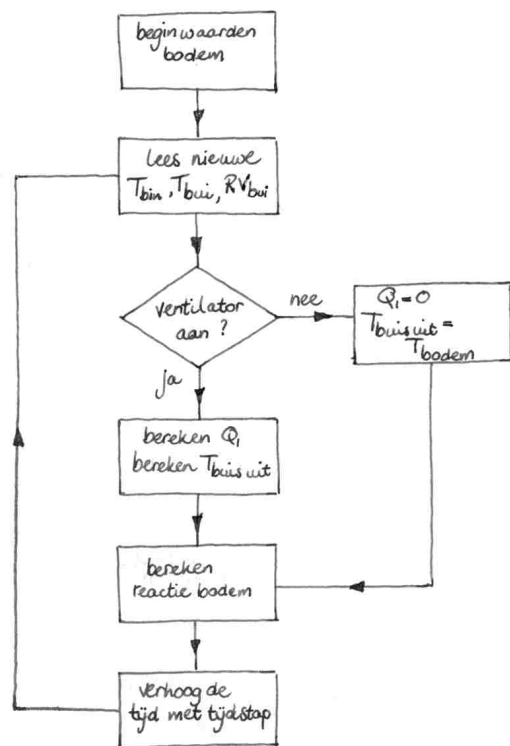
Door deze vereenvoudigingen, kunnen we de eendimensionale warmtediffusie-vergelijking gebruiken:

$$\partial T / \partial t = a \partial^2 T / \partial z^2, \quad (4)$$

met  $T$  de bodemtemperatuur (in K) op diepte  $z$  (in m),  $t$  de tijd (in s) en  $a$  de zogeheten 'temperatuurvereffeningscoëfficiënt' (in  $m^2/s$ ). Het effect van grondwaterstroming is niet meegenomen.

Aan het begin van de (dynamische) simulatie wordt gerekend met beginwaarden voor bodemtemperaturen (tot 40 m diep) en temperaturen van ingaande en uittredende luchtstroom. Net als bij het eenvoudige model (paragraaf 5.1) wordt met deze temperaturen de warmteoverdracht van lucht naar bodem berekend uit het gemiddelde temperatuurverschil tussen lucht en bodem en de totale warmteweerstand volgens formule (1). Enerzijds bepaalt deze warmtestroom hoeveel de lucht in de buis opwarmt (of afkoelt) via de uitdrukking voor  $Q_3$  volgens formule (3). Anderzijds wordt met deze warmtestroom de reactie van de bodem vanaf het oppervlak tot een diepte van 40 m berekend. Met de nieuwe waarden voor bodemtemperatuur etc. herhalen zich deze stappen.

De bodem wordt op die manier voor de periode van een aantal jaren 'doorgerekend', waarbij uurlijkse waarden van de binnen- en buitentemperatuur uit een file worden gelezen. Deze waarden komen uit het testreferentiejaar van De Bilt. Op die wijze kan het thermisch gedrag van de bodem, met inbegrip van het dynamisch effect van het warmte-accumulerend vermogen worden berekend. Een flowschema van het model is afgebeeld in figuur 2.



Figuur 2 Flowschema van het simulatiemodel

## 6. DIMENSIONERING VAN HET BODEMSYSTEEM

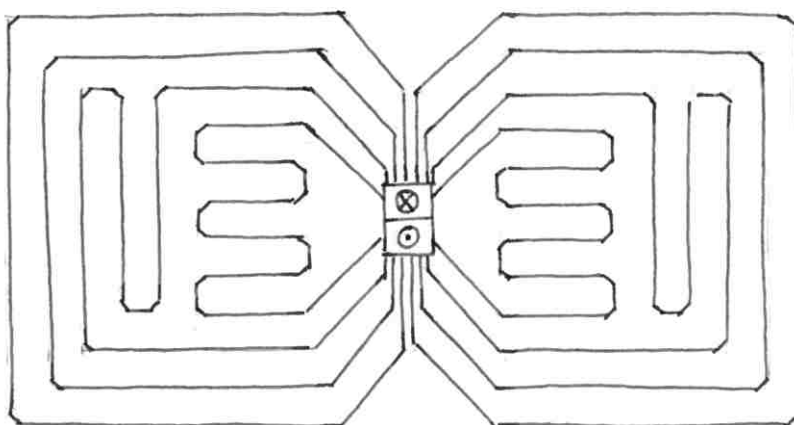
Voor een dimensionering van het bodemsysteem is in eerste instantie het eenvoudige model gebruikt. Met de gevonden waarden is vervolgens het thermisch gedrag van de bodem en daarin aangebrachte buizen gedurende een aantal jaren gesimuleerd.

### 6.1 Buizenplan

De ervaringen in Deventer wijzen erop dat de inlaatopeningen van het buizensysteem niet op straathoogte moeten worden aangebracht vanwege het gevaar van het aanzuigen van uitlaatgassen van langskomend verkeer. Aan de andere kant is het aanbrengen van de openingen op een plat dak ook geen goede oplossing omdat de temperatuur daar in de zomer kan oplopen tot zo'n 60°C. Het beste is een aanzuigopening onder de dakrand aan de noordgevel. Dit bleek echter bij het nieuwe kantoorpand vanwege de gebouwindeling moeilijk te realiseren.

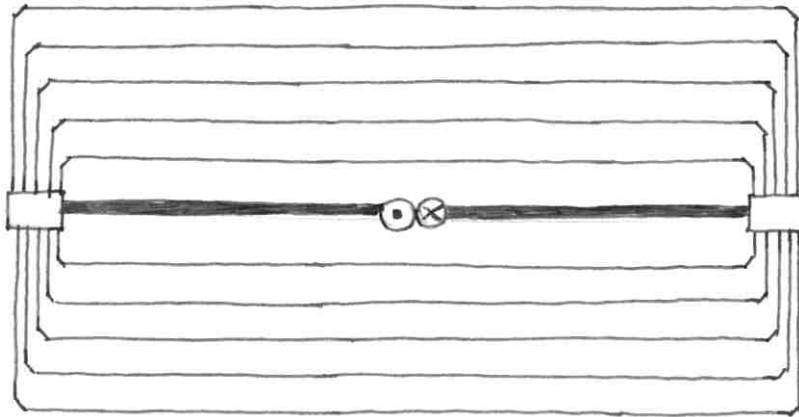
De luchtleidingen voor het verdelen van de gekoelde lucht in het kantoor zullen moeten lopen in de leidingschacht in de zuidwesthoek van het kantoor. Het ligt dan voor de hand om de aanzuigen afblaasopeningen van de ventilatie in de buurt hiervan aan te brengen, min of meer centraal in de kavel. Voor het buizenplan is daarom uitgegaan van verdeelbakken, die centraal in de kavel in de grond zijn gelegen. Hier komt de aangezogen lucht uit een aantal in de grond gelegen buizen tezamen en wordt vervolgens door de centrale toe- en afvoerleiding in het gebouw gebracht. Om de stromingsweerstand van de lucht in de bodembuizen te minimaliseren, zijn alle buizen parallel aangesloten.

Om ervoor te zorgen dat de lucht gelijkmatig wordt verdeeld over alle buizen, moet de stromingsweerstand van de individuele buizen zo goed mogelijk gelijk zijn. Om die reden is in de 'binnenste' buizen een aantal extra bochten opgenomen. De stromingsweerstand van de afzonderlijke buizen verschilt zodanig maximaal 25%. Een schema van een mogelijk buizenpatroon is weergegeven in figuur 3.



Figuur 3 *Schema van het voorgestelde buizenplan met 8 parallelle buizen. De 'binnenste' buizen hebben extra bochten om een even grote drukval te krijgen als in de 'buitenste' buizen. In het centrum de centrale verdeelbakken, die dienen als ingang en uitgang van het buizenstelsel.*

Omdat het aantal bochten, met name bij een diameter van 0,2 m een aanzienlijke kostenpost blijkt (tabel 2), is ook gerekend met een eenvoudiger buizenplan, zoals weergegeven in figuur 4. De variatie in stromingsweerstand is hierbij iets groter, ca. 35%.



Figuur 4 *Alternatief schema van het voorgestelde buizenplan met 10 parallelle buizen. In het centrum ligt een centrale toe- en afvoerleiding naar de verdeelbakken aan beide einden.*

Uit metingen met een peilbuis in dezelfde straat (ter hoogte van Pettemerweg 33) blijkt het grondwaterniveau in de afgelopen 2 jaren tussen 1,12 en 1,42 m onder het maaiveld te hebben gelegen [4]. Indien de buizen op een diepte van 1 m worden aangebracht, liggen zij boven het grondwaterniveau. Een eventuele lekkage in de buizen of aansluitingen zal dan niet leiden tot het vollopen van de buizen.

## 6.2 Resultaten van de berekeningen

### 6.2.1 Eenvoudig statisch model

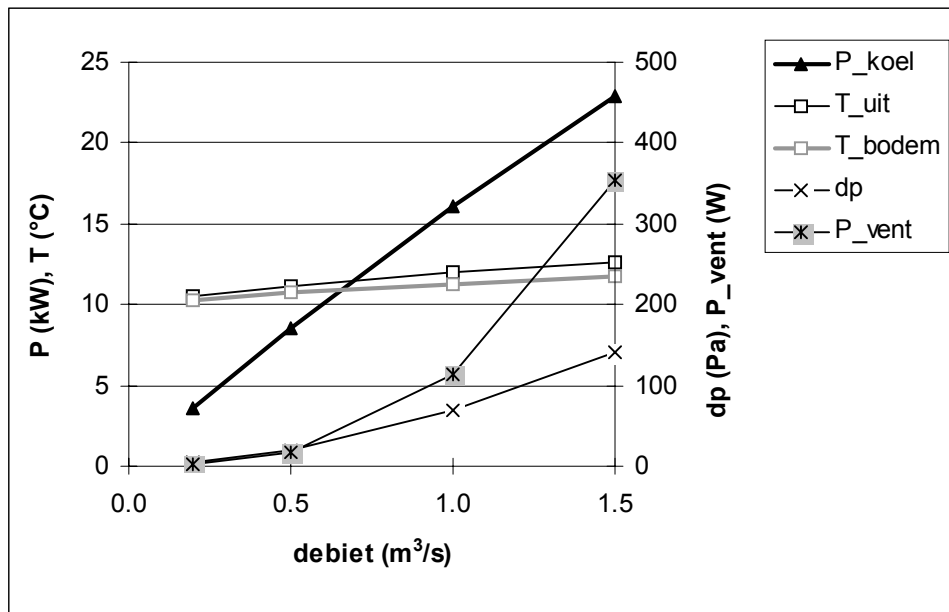
#### *Aannames*

Met het kiezen van het buizenpatroon (zie paragraaf 6.1) ligt de lengte van de buizen min of meer vast, ongeveer 50 m voor de 'buitenste' buizen in het patroon van figuur 3. Met het eenvoudige model is vervolgens nagegaan hoeveel koelvermogen een dergelijk systeem kan leveren. Voor de berekeningen is uitgegaan van een bodemtemperatuur van 10°C, een buitentemperatuur van 20°C en een binnentemperatuur van 25°C. Dat is een situatie, die kan voorkomen tijdens een warme dag aan het begin van de zomer. In eerste instantie nemen we een buisdiameter van 0,2 m, zoals die in Deventer is gebruikt.

#### *Variatie van het debiet*

Met bovenstaande waarden zijn de temperatuur aan de buisuitgang, de temperatuur van de bodem rondom de buis, het koelvermogen, en drukval en het door de ventilator opgenomen vermogen berekend voor debieten van 0,2 tot 1,5 m<sup>3</sup>/s. Een debiet van 0,2 m<sup>3</sup>/s is minimaal nodig voor de ventilatie, uitgaande van een bezetting van het kantoor van 20 personen. Bij hogere debieten is een groter koelvermogen mogelijk. De resultaten van de berekening zijn weergegeven in figuur 5.





Figuur 5 Temperaturen en koelvermogen tijdens een warme dag aan het begin van de zomer bij verschillende debieten, buizenpatroon volgens figuur 3, buisdiameter 0,2 m.

Het blijkt dat er een koelvermogen gehaald kan worden van 3,5 kW bij 0,2 m<sup>3</sup>/s tot 23 kW bij 1,5 m<sup>3</sup>/s. Om de interne warmtelast van 16 kW volledig weg te kunnen koelen (hoofdstuk 3) volstaat een debiet van ca. 1 m<sup>3</sup>/s.

Verder blijkt dat, zoals verwacht, het temperatuurverschil tussen uit de buis komende lucht en de omringende bodem toeneemt bij toenemend debiet. De lucht krijgt bij hogere debieten geen tijd om zoveel warmte af te staan dat de bodemtemperatuur wordt bereikt. Aan de andere kant betekent een te klein temperatuur verschil dat het systeem niet optimaal is gedimensioneerd. Immers, de warmteoverdracht in het laatste stuk van de buis is dan erg klein, terwijl de lucht wel de weerstand van dat stuk buis moet overwinnen. Het laatste stuk buis koelt dan niet efficiënt.

Samenvattend kan worden geconcludeerd dat een debiet van 0,5 tot 1 m<sup>3</sup>/s zal volstaan om een aangenaam binnenklimaat te kunnen waarborgen. De berekende drukval in de buizen, inclusief 30 m centrale toe- en afvoerleiding varieert bij die debieten van 20 tot 70 Pa. Nemen we voor de ventilator en elektromotor een rendement van 60% dan varieert het door de ventilator opgenomen vermogen van 20 tot 120 W.

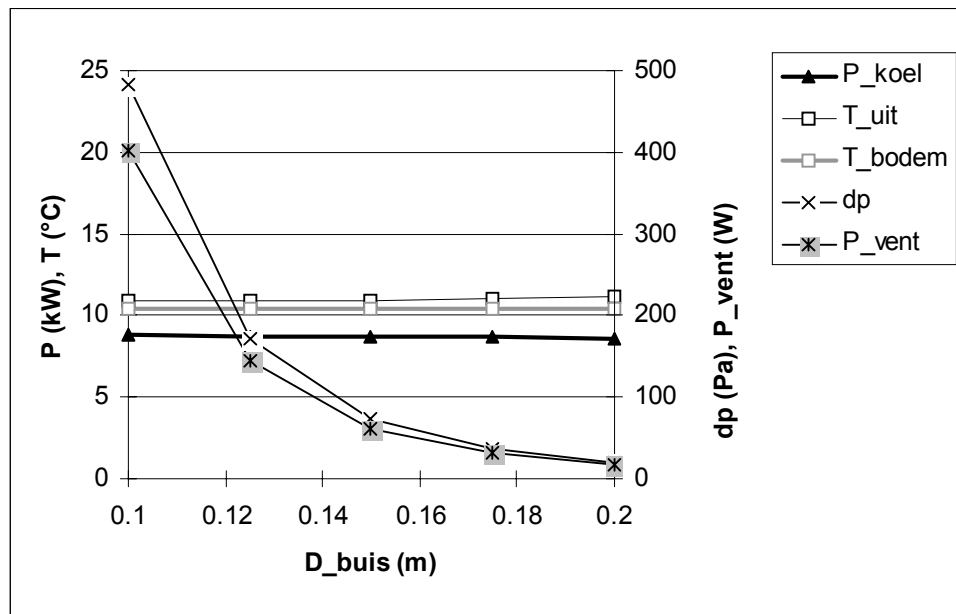
#### Variatie van de buisdiameter

Buisdiameters groter dan 0,2 m zijn niet bekeken omdat de stromingsweerstand van buizen van 0,2 m al klein is ten opzichte van de stromingsweerstand van de rest van de installatie (filters etc.). Kleinere diameters zijn vooral interessant omdat dunnere buizen aanzienlijk goedkoper zijn dan buizen met een diameter van 0,2 m.

Bij kleinere diameters neemt de lichtsnelheid toe (bij gelijk debiet) en daardoor de warmteoverdracht van lucht naar wand. Daar staat tegenover dat het warmtewisselend oppervlak van de buis kleiner is. Het blijkt dat beide effecten elkaar vrijwel compenseren.

De invloed van verkleining van de buisdiameter (bij een constant debiet van 0,5 m<sup>3</sup>/s) is in figuur 6 weergegeven. Het koelvermogen en temperaturen van bodem en buis blijken nauwelijks te veranderen bij een verkleining van de buisdiameter van 0,2 naar 0,1 m. Wel neemt

de drukval toe van 20 tot bijna 500 Pa en het opgenomen vermogen van de ventilator van 20 naar ruim 400 W. Het is energetisch gezien dus gunstig om een zo groot mogelijke buisdiameter te nemen.



Figuur 6 Temperaturen en koelvermogen tijdens een warme dag aan het begin van de zomer bij verschillende buisdiameters, debiet  $0,5 \text{ m}^3/\text{s}$ .

#### Onderlinge afstand van de buizen

Het effect van de onderlinge afstand kan niet rechtstreeks worden berekend, aangezien het model in slechts één enkele richting 'reken', namelijk van het aardoppervlak naar de diepere aardlagen. Echter, uit de met het dynamische bodemmodel berekende temperatuurprofielen (figuur 7) blijkt dat elke buis de omringende grond tot een afstand van ca. 5 m opwarmt (temperatuurvariatie op 5m diepte is ca.  $\pm 1^\circ\text{C}$ ). Het heeft dus weinig zin om de buizen dichter op elkaar te leggen, omdat de buizen dan teveel van 'elkaars grond' beïnvloeden. De afstand groter maken lijkt ook niet zinvol omdat dan de tussen de buizen liggende grond thermisch niet volledig wordt benut.

#### 6.2.2 Dynamisch model van de bodem

##### Aannames

De temperatuur aan het begin van de buis wordt gelijk genomen aan de buitentemperatuur. Hiervoor worden waarden genomen uit het testreferentiejaar van de Bilt. Deze waarde wordt uurlijks uit een invoerfile gelezen.

Een uitgebreide simulatie van het kantoorgebouw, met name de optredende binnentemperaturen, viel buiten het kader van de opdracht. De binnentemperatuur is daarom als volgt benaderd. De temperatuur in het gebouw is berekend uit het 48-uurs gemiddelde van de buitentemperatuur, vermeerderd met  $8^\circ\text{C}$ . Die waarde is gebaseerd op een inschatting van de isolatie van het gebouw en de interne warmteproductie en zinstraling. Bij een binnentemperatuur onder de  $20^\circ\text{C}$  wordt de verwarming geacht in bedrijf te komen, die ervoor zorgt dat het binnen niet kouder wordt dan  $20^\circ\text{C}$ .

Het koelend vermogen van de bodem wordt vervolgens berekend aan de hand van het verschil tussen binnentemperatuur en temperatuur van de lucht uit de bodembuizen, en het luchtdebiet.

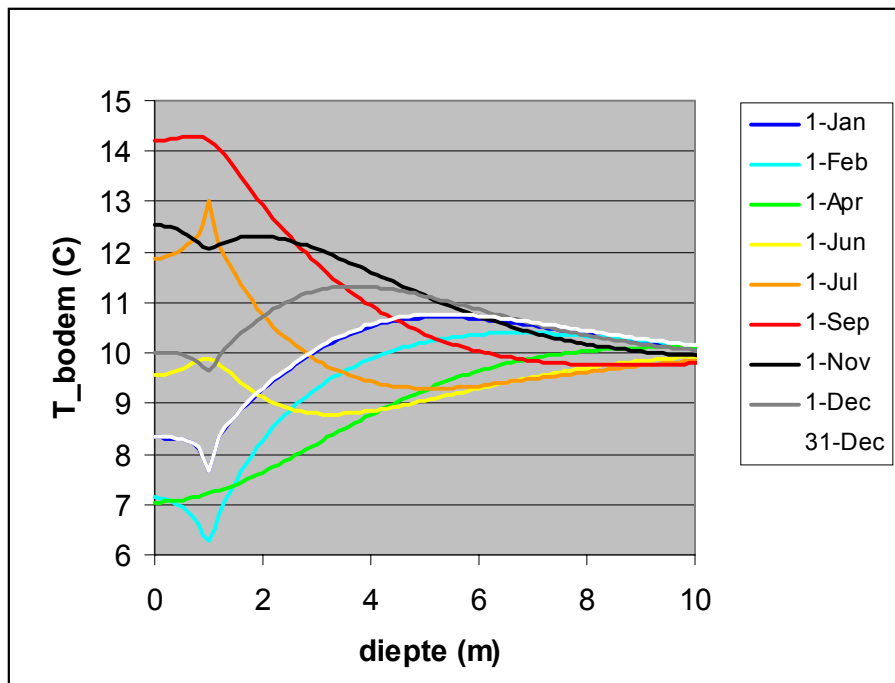
Verder is er gerekend met een constant luchtdebiet, dat wil zeggen, dat het luchtdebiet niet is aangepast aan de binnentemperatuur en dus de koelbehoefte, hetgeen in een reële situatie wel het geval zal zijn.

Het systeem van bodemkoeling wordt vervolgens 10 jaar doorgerekend. Aan het begin wordt een egale bodemtemperatuur van 10°C verondersteld, daarna bepaalt de hoeveelheid opgenomen en afgestane warmte de temperatuur van de bodem op de verschillende diepten.

*Berekening van koelvermogen en hoeveelheid koude.*

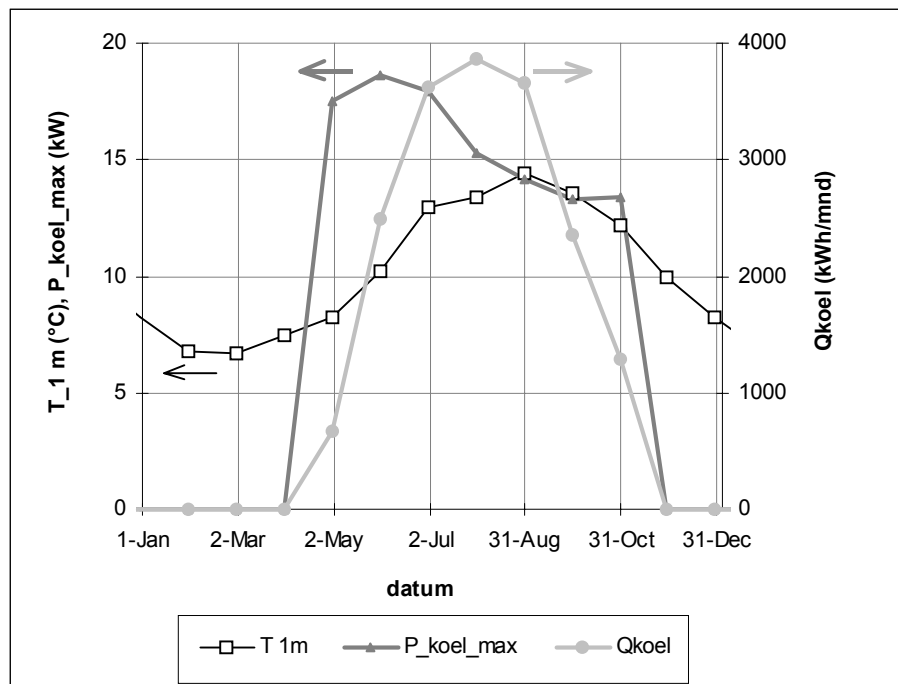
Uit de berekeningen blijkt dat de bodem geleidelijk opwarmt indien er alleen koude aan onttrokken wordt (warmte in wordt gestopt). De warmte wordt blijkbaar niet voldoende snel afgevoerd naar de diepere aardlagen. Bij een debiet van 1 m<sup>3</sup>/s loopt de gemiddelde temperatuur rondom de buizen na 10 jaar op van 10 tot 16 à 17°C en de temperatuur op 10 m diepte loopt op naar ca. 14°C. Het koelvermogen loopt daarbij uiteraard ook terug. Het is dus noodzakelijk om de bodem in te winter weer af te koelen ('te regenereren') voor de volgende zomer. Dat gebeurt door lucht door de buizen te blazen bij voldoende lage buitentemperaturen.. De lucht, die dan zelf opwarmt, wordt niet het gebouw ingeblazen, maar weer naar buiten afgevoerd. Het is ook mogelijk om de opgewarmde lucht te gebruiken als aanvoer voor de warmteterugwin-unit (zie paragraaf 7.1). Indien het regeneratiedebiet even groot is als het koeldebiet, is de regeneratie voldoende groot indien uitsluitend wordt geregenereerd bij buitentemperaturen, die 7 °C lager zijn dan de bodemtemperatuur (op 1 m diepte). In tabel 2 wordt de energie berekend, die het regenereren in dat geval kost. Deze energie kan met minimaal een factor 3 worden verlaagd worden door een lager regeneratiedebiet te kiezen. Er moet dan wel al worden geregenereerd bij hogere buiten temperaturen (bijvoorbeeld 5°C i.p.v. 7°C onder de bodemtemperatuur).

Voor het geval er geregenereerd wordt, is het temperatuur profiel van de bodem op 1 m diepte berekend op verschillende dagen van het jaar (zie figuur 7).



Figuur 7 *Temperatuur profiel van de bodem op verschillende dagen van het jaar (met regeneratie). De pieken en dalen op 1 m diepte geven aan dat op deze diepte de buizen liggen.*

In figuur 8 zijn geschetst: de temperatuur van de bodem op 1 m diepte (dunne zwarte lijn), het maximale koelvermogen in kW (dikke donkergrijze lijn) alsmede de maandelijkse hoeveelheid koude in kWh/maand (dikke lichtgrijze lijn), die wordt onttrokken bij een debiet van  $1 \text{ m}^3/\text{s}$ .



Figuur 8 De bodemtemperatuur op buisdiepte, het maximale koelvermogen (in kW) per maand en de maandelijkse hoeveelheid koude (in kWh/maand), die wordt onttrokken bij een debiet van  $1 \text{ m}^3/\text{s}$ . De pijlen geven aan op welke verticale -as moet worden afgelezen.

Het blijkt dat er bij een debiet van  $1 \text{ m}^3/\text{s}$  maximaal bijna 19 kW aan koude aan de bodem kan worden onttrokken (in juni). Dat is hoger dan de 16 kW, die met het eenvoudige model is berekend (paragraaf 6.2.1). Op zich is dat een goede overeenstemming tussen statisch en dynamisch model, aangezien in het eerste het gedrag van de bodem slechts grof is benaderd. Bovendien is de hogere waarde uit het dynamisch model te verklaren uit het feit dat de bodem - door de regeneratie in de voorafgaande winter - is afgekoeld tot onder de  $10^\circ\text{C}$ . Hoewel de bodem op buisdiepte ca.  $10^\circ\text{C}$  is bij het bereiken van het maximale koelvermogen (figuur 8, begin juni), is de rest van de bodem nog onder de  $10^\circ\text{C}$  (figuur 7), zodat de warmte makkelijker de bodem in 'diffundeert'.

Het koelvermogen blijkt in de loop van de zomer terug te lopen tot ca. 14 kW door onder meer het opwarmen van de bodem. Gedurende het jaar kan ca. 18000 kWh aan de bodem worden onttrokken. Deze waarden, alsmede die voor een debiet van  $0,5 \text{ m}^3/\text{s}$  zijn in tabel 1 samengevat.

Er is ook gerekend met het alternatieve buispatroon (figuur 4), met 10 parallelle buizen met een diameter van 0,125 m. Zowel de kleinere diameter als het kleinere aantal bochten maken dat dit buizenstelsel een lagere investering behoeft (tabel 3). Uit figuur 6 bleek al dat het koelvermogen hierdoor slechts in verwaarloosbare mate verandert. Dit beeld wordt bevestigd door het dynamische model (tabel 1). Wel wordt - bij gelijkblijvend debiet - de drukval, en daarmee het door de ventilatoren opgenomen vermogen fors verhoogd. Hierop wordt in paragraaf 7.3 teruggekomen.

Samenvattend kan worden geconcludeerd dat het bodemsysteem bij debieten van  $0,5$  tot  $1 \text{ m}^3/\text{s}$  het gevraagde koelvermogen kan leveren.

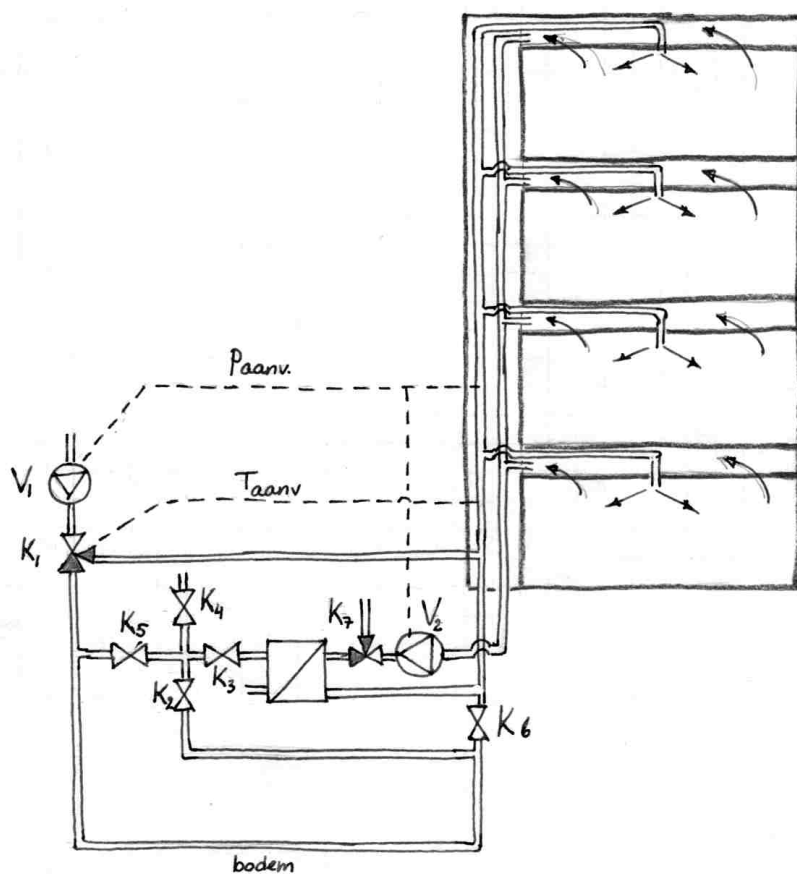
Tabel 1 *Hoeveelheid koude en maximaal koelvermogen bij debieten van 0,5 en 1 m<sup>3</sup>/s voor de buispatronen uit figuur 3 en 4.*

Aantal buizen [-]	buisdiameter [m]	debiet [m <sup>3</sup> /s]	Q <sub>koel</sub> [kWh/jr]	max P <sub>koel</sub> [kW]
8	0,2	0,5	10.300	10,1
8	0,2	1	17.800	18,5
10	0,125	0,5	10.600	11,1
10	0,125	1	18.100	18,9

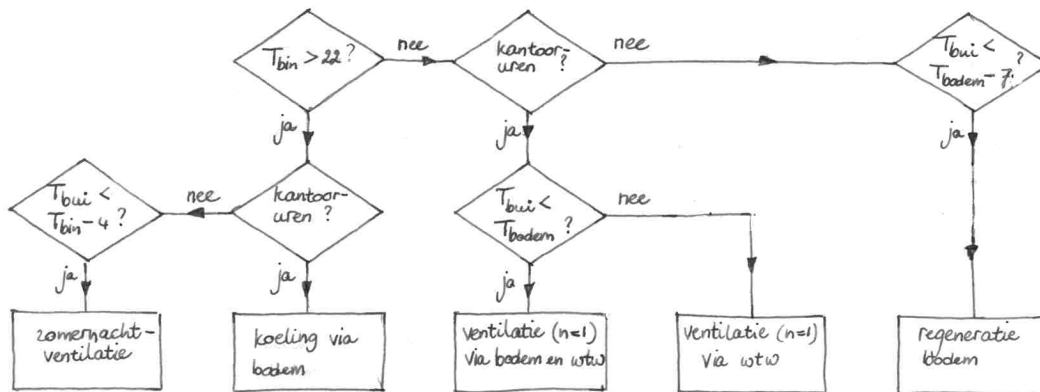
## 7. HET VOORGESTELDE VENTILATIE- EN KOELSYSTEEM

### 7.1 Beschrijving van het ventilatie- en koelsysteem

Het door ECN voorgestelde ventilatie- en koelsysteem integreert de functies van ventilatie en koeling, gebruikmakend van een combinatie van bodemopslag en warmteterugwin-unit. Een schema van het voorgestelde systeem is weergegeven in figuur 9. Een flowschema van de regeling is weergegeven in figuur 10.



Figuur 9 Schema van het voorgestelde ventilatie- en koelsysteem. V1 en V2 zijn ventilatoren, K1-K7 zijn kleppen.



Figuur 10 Flowschema van de regeling van het voorgestelde ventilatie- en koelsysteem.

### Zomer

De eerste keuze, die de regeling maakt, is aan de hand van de binnentemperatuur (figuur 10). Indien deze een bepaalde grenswaarde overschrijdt (bijvoorbeeld 22°C) wordt het kantoor tijdens kantooruren gekoeld door (een deel van) de buitenlucht via het bodemsysteem aan te voeren. De mengklep K1 bepaalt de fractie van de buitenlucht, die met behulp van ventilator V1 door de buizen wordt geblazen. Deze lucht wordt na uittreding uit de bodem gemengd met de overige (niet afgekoelde) buitenlucht, zodanig dat de temperatuur van de menglucht ca. 18°C is. Deze lucht wordt vervolgens door het gebouw verspreid door ventilatieroosters, die in het plenum op elke verdieping zijn aangebracht. Met centrifugaalroosters wordt de gekoelde lucht goed met de ruimtelucht gemengd, zodat de koele lucht niet als (hinderlijke) tocht wordt ervaren. De ruimtelucht wordt aan één kant van het plenum weer afgezogen met ventilator V2.

Door het aanbrengen van een motorisch gestuurde klep in de toevoerleiding op elke verdieping, kan de hoeveelheid koele lucht en dus de mate van koeling per verdieping worden geregeld. De meest dichte stand van de klep komt overeen met een ventilatievoud, die nodig is om de kwaliteit van de lucht op peil te houden (0,2 m<sup>3</sup>/s, overeenkomend met een ventilatievoud van ca. 1 per uur). De maximale waarde komt overeen met een debiet van 1 m<sup>3</sup>/s (ventilatievoud 4 per uur), waarbij een koelvermogen van maximaal 19 kW wordt gehaald (tabel 1). Zowel ventilator V1 als V2 worden gestuurd op overdruk in de toevoerleiding. Bij verder dichtzetten van de door de bewoners te bedienen kleppen (middels meerkeuzeschakelaars), neemt de overdruk in de toevoerleiding toe, hetgeen de ventilatoren omlaag zal 'toeren'.

Buiten kantoor uren (nog steeds bij te hoge binnentemperaturen) wordt zomernacht ventilatie toegepast met een ventilatievoud van 4 onder de voorwaarde dat de buitentemperatuur voldoende laag is, bijvoorbeeld 4°C lager dan de binnentemperatuur.

### Stookseizoen

Indien als de binnentemperatuur lager is dan de grenswaarde van 22°C, hoeft er niet gekoeld te worden. Tijdens kantooruren kan daarom worden volstaan met een ventilatievoud van 1 per uur. Bij lage buitentemperaturen wordt de lucht via het bodemsysteem en de warmteterugwin-unit aangevoerd. Bij een buitentemperatuur hoger dan de bodemtemperatuur, hetgeen vooral in de tussenseizoenen het geval zal zijn, is aanzuigen via de bodem niet zinvol. Het rendement van de warmteterugwin-unit is dan voldoende hoog zodat de buitenlucht rechtstreeks via de warmteterugwin-unit aangezogen kan worden.

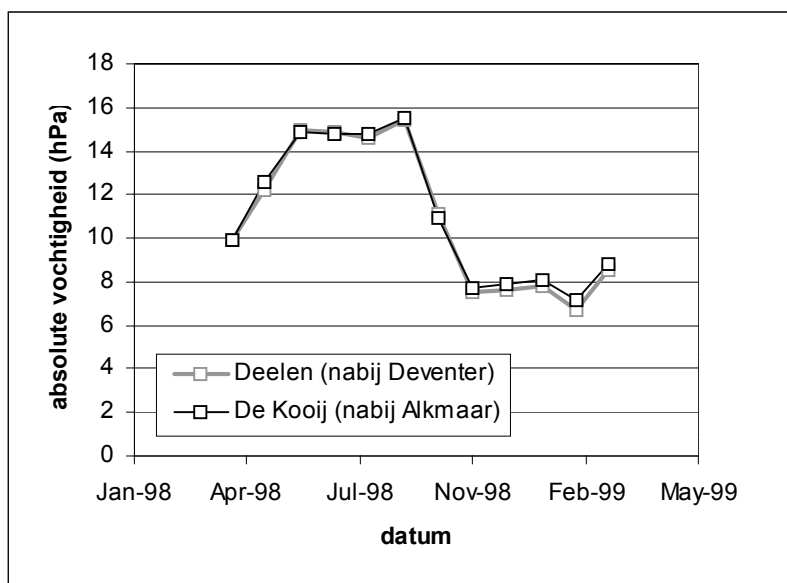
### Regeneratie

Tenslotte wordt voorgesteld de bodem te regenereren, indien de buitentemperatuur voldoende laag is (bijvoorbeeld 7°C lager dan de bodemtemperatuur). In de winter kan dat door de lucht via de bodem en de warmteterugwin-unit aan te voeren. In het voor- en naseizoen kan buiten kantooruren buitenlucht door de bodembuizen worden geblazen, zonder verdere passage door het kantoor (kleppen K2 en K4 open, overige kleppen dicht).

### Condensatie.

Uit de waarden van temperatuur en relatieve vochtigheid van de buitenlucht en de mate van afkoeling in de buis (berekend met het bodemmodel) kan eenvoudig berekend worden of en hoeveel condensatie optreedt. Het blijkt dat er, met name op vochtige dagen, condensatie in de buizen kan plaatsvinden. De ervaring bij de brandweerkazerne in Deventer is echter dat er geen condensatie in het buizenstelsel optreedt. Datzelfde geldt voor de brandweerkazerne in Soest, hoewel de installatie daar pas een jaar in bedrijf is. Een mogelijke verklaring is dat er wellicht (een geringe) mate van condensatie plaatsvindt tegen de buiswand, maar dat het condensaat weer verdampt (als er weer drogere lucht doorstroomt) voor het de gelegenheid heeft gehad om zich te verzamelen aan het buiseinde.

Verder is nagegaan of de hoeveelheid vocht in de lucht aan de kust (Alkmaar) wellicht hoger is dan verder landinwaarts (Soest, Deventer). Uit figuur 11, gebaseerd op meteogegevens van het KNMI uit 1999 blijkt dat alleen in de wintermaanden de lucht in Alkmaar iets meer vocht bevat dan die in Deventer. In de winter warmt de lucht in de bodembuis op en kan er dus geen condensatie plaats vinden.



Figuur 11 De absolute hoeveelheid vocht in de lucht nabij Alkmaar en Deventer.

## 7.2 Energetische vergelijking tussen bodemsysteem en conventioneel systeem

Hieronder zal vanuit energetisch oogpunt een vergelijking worden gemaakt tussen het systeem van bodemkoeling en een conventioneel systeem (met airco-unit voor de koeling). Criterium is de hoeveelheid elektrische energie, die nodig is voor het produceren van een bepaalde hoeveelheid koude.

Daarbij zijn de volgende aannamen gedaan. Ventilatie tijdens kantooruren is zowel bij het bodemsysteem als bij het conventionele systeem nodig, dus de daarvoor benodigde energie is niet meegenomen in de vergelijking.



Bij het koelen moet bij het bodemsysteem de stromingsweerstand van de buizen en de rest van het luchtbehandelingsysteem worden overwonnen. Daarnaast vindt er bij het bodemsysteem regeneratie van de bodem plaats, daarvoor hoeft de ventilator alleen de stromingsweerstand van de buizen te overwinnen. De waarden zijn in onderstaande tabel samengevat. Ook berekend is de SPF (Seasonal Performance Factor) van het koelsysteem, gedefinieerd als de jaargemiddelde waarde van de hoeveelheid koude (in kWh), die per kWh elektrische energie kan worden opgewekt.

Tabel 2 Door het bodemsysteem opgenomen elektrische energie bij debieten van 0,5 en 1 m<sup>3</sup>/s en buisdiameters van 0,125 en 0,2 m.

D <sub>buis</sub>	$\Phi$	Q <sub>koel</sub>	$\Delta p$	$\Delta p$	t <sub>koel</sub>	t <sub>regen</sub>	E <sub>koel</sub>	E <sub>regen</sub>	E <sub>tot</sub>	SPF
[m]	[m <sup>3</sup> /s]	[kWh/jr]	[Pa]	buizen overig [Pa]	[hr]	[hr]	[kWh/jr]	[kWh/jr]	[kWh/jr]	
0,2	0,5	10300	20	40	1420	540	71	9	80	128
0,2	1	17800	70	140	1420	450	498	52	550	32
0,125	0,5	10600	80	40	1420	500	142	33	176	60
0,125	1	18100	170	140	1420	410	735	116	850	21

Zonder toepassing van een bodemsysteem, moet de koude met behulp van een airconditioning unit worden geproduceerd. Over het algemeen is de SPF van de airco ongeveer 3, wat een stuk slechter is dan de SPF van het bodemsysteem (tabel 2), zelfs indien buizen met een diameter van 0,125 worden gebruikt. Het bodemsysteem verdient dus vanuit energetisch oogpunt de voorkeur.

### 7.3 Economische vergelijking tussen bodemsysteem en conventioneel systeem

De vergelijking tussen een bodemsysteem en een conventioneel systeem voor koeling kan ook gemaakt worden op economische gronden. Daarbij spelen tevens de kosten van aanleg, onderhoud etc. een rol. De kosten van het energetisch optimale bodemsysteem (buisdiameter 0,2 m) en die van het kosteneffectieve bodemsysteem (buisdiameter 0,125 m) zijn in onderstaande tabel vergeleken met die van een conventioneel ventilatie systeem met airconditioning unit. De waarden zijn gebaseerd op een opgave van Reek [5].

Tabel 3 *Vergelijking tussen kosten van bodemsystemen met een conventioneel ventilatie- en koelsysteem (airco).*

	e-optimaal bodemsysteem	kosten-effectief bodemsysteem	conv. systeem + airco
omschrijving	8 buizen, D = 0,2 m	10 buizen, D = 0,125 m	
elektrische energie (kWh/jr)	550	850	3500
kosten elektrische energie (NLG/jr)	165	255	1050
kosten onderhoud (NLG/jr)	200	200	1000
subtotaal: jaarlijkse exploitatiekosten	915	1305	5550
<b>investering bodemsysteem</b>			
PVC verdeelbakken (2 st.)	5280	5280	
bochten	3530	930	
350 m buis	19600	10880	
centrale buis 35 m 0,6 m	6130	6130	
grondwerk in 2 fases	2250	2250	
subtotaal bodemsysteem	36780	25470	
<b>ventilatiesysteem</b>	65840	65840	24460
airco (20 kW)			52850
AF: subsidie			
investering totaal	102630	91300	77310
terugverdientijd (jaar)	5,5	3,3	-

Het blijkt dat de terugverdientijd van het energetisch optimale bodemsysteem (gedefinieerd als de meerinvestering t.o.v. het conventionele systeem gedeeld door de jaarlijkse besparing in exploitatiekosten t.o.v. het conventionele systeem) ca. 5,5 jaar bedraagt. De terugverdientijd van het kosten-effectieve bodemsysteem bedraagt iets meer dan 3 jaar.

## 8. CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

Een analyse van het bodemsysteem bij de brandweerkazerne in Deventer toont aan dat het basisidee voldoet, maar dat het systeem in Deventer op een aantal punten nog kan worden verbeterd. Zo kan de regeling worden geoptimaliseerd en kunnen de sterke punten van het bodemsysteem (eenvoudig, milieuvriendelijk) worden gecombineerd met die van een warmteterugwin-unit (hoog energetisch rendement in met name de tussenseizoenen).

Het bodemsysteem voor de nieuwbouw van Reek is met behulp van twee mathematische modellen gedimensioneerd. Het complexere, dynamische model berekent dat er bij een debiet van 1 m<sup>3</sup>/s maximaal bijna 19 kW aan koude aan de bodem kan worden onttrokken (in juni). Dat is hoger dan de 16 kW, die met het eenvoudige, statische model worden berekend. Op zich is dat een goede overeenstemming tussen beide modellen, aangezien het gedrag van de bodem in het eerste model slechts grof is benaderd. Bovendien is de hogere waarde uit het dynamisch model te verklaren uit het feit dat de bodem - door de regeneratie in de voorafgaande winter - is afgekoeld.

Een debiet van 0,5 tot 1 m<sup>3</sup>/s volstaat aldus om een aangenaam binnenklimaat in de nieuwbouw van aannemingsbedrijf Reek te kunnen waarborgen. Bij een debiet van 1 m<sup>3</sup>/s kan er jaarlijks ca. 18.000 kWh aan koude aan de bodem worden onttrokken.

Uit de berekeningen blijkt verder dat de bodem geleidelijk opwarmt indien er alleen koude aan onttrokken wordt (warmte in wordt gestopt). De warmte wordt blijkbaar niet voldoende snel afgevoerd naar de diepere aardlagen. Bij een debiet van 1 m<sup>3</sup>/s loopt de gemiddelde temperatuur rondom de buizen na 10 jaar op van 10 tot 16 à 17°C en de temperatuur op 10 m diepte loopt op naar ca. 14°C. Het koelvermogen van het bodemsysteem loopt daarbij uiteraard ook terug. Het is dus noodzakelijk om de bodem in te winter weer af te koelen ('te regenereren') voor de volgende zomer. Dat gebeurt door lucht door de buizen te blazen bij voldoende lage buitentemperaturen.

Een buisdiameter van 0,2 m is energetisch het gunstigst. Bij kleinere diameters wordt de drukval over de buizen aanzienlijk groter en daarmee het door de ventilator opgenomen vermogen. Bij grotere diameters is de winst gering. Echter, door de relatief hoge kosten van buizen van 0,2 m is ook met een buisdiameter van de meer gangbare maat van 0,125 m gerekend. Het systeem met buizen van 0,2 m wordt het energetisch optimale bodemsysteem genoemd, het systeem met buizen van 0,125 m het kosten-effectieve systeem. Bovendien zijn bij het laatste systeem minder (relatief dure) bochten gebruikt, waardoor de verdeling van de lucht over de 10 parallel lopende buizen iets minder goed is dan bij het energetisch optimale bodemsysteem (8 parallelle kanalen).

Het koelvermogen en bodemtemperaturen blijken bij beide systemen nauwelijks te verschillen. Wel is het door de ventilator opgenomen vermogen bij het kosteneffectieve systeem aanzienlijk hoger, en daarmee de jaarlijkse energiekosten. De SPF (Seasonal Performance Factor) van het koelsysteem, gedefinieerd als de jaargemiddelde waarde van de hoeveelheid koude (in kWh), die per kWh elektrische energie kan worden opgewekt bedraagt ca. 32 voor het energetisch optimale bodemsysteem en ca. 21 voor het kosten effectieve systeem.

Voor een economische analyse zijn beide bodemsystemen vergeleken met een conventioneel ventilatiesysteem, waarbij voor de koeling een airconditioning unit wordt ingezet. De investering voor beide bodemsystemen is hoger, de jaarlijkse exploitatiekosten (energie, onderhoud) zijn lager dan die van het conventionele systeem. De terugverdientijd (gedefinieerd als de meerinvestering t.o.v. het conventionele systeem gedeeld door de jaarlijkse besparing in

exploitatiekosten) van het energetisch optimale bodemsysteem bedraagt ca. 5,5 jaar, De terugverdientijd van het kosten-effectieve bodemsysteem bedraagt iets meer dan 3 jaar.

Uit ervaringen met het bodemsysteem in Deventer blijkt dat er niet of nauwelijks condensatie optreedt doordat waterdamp in de lucht tijdens het afkoelen in de buizen condenseert. Het lijkt dus niet nodig om de buizen onder afschot te plaatsen, zoals in Deventer is gebeurd. Uit meteogegevens van het KNMI uit 1999 blijkt dat de lucht alleen in de wintermaanden (als zij in de bodembuis opwarmt en er dus geen condensatie kan plaatsvinden) in Alkmaar iets meer vocht bevat dan die in Deventer. Klaarblijkelijk is het gevaar van condensatie en daarbij mogelijk gepaard gaande algengroei of schimmelvorming in Alkmaar niet groter dan in Deventer.

Samenvattend kan worden gesteld dat een bodemsysteem zowel op energetische als economische gronden kan worden aangeraden, en dat er blijkens eerdere ervaringen niet of nauwelijks problemen mee te verwachten zijn.

## 9. REFERENTIES

- [1] Meetprogramma Bodemwarmte-installatie Brandweer Deventer, ECO Engineering, december 1991
- [2] Koellast berekening fa. S. Bakker d.d. 23.03.1999, aangepast door ECN
- [3] Telefonisch contact met dhr. Meefout Sr., fa. Regent Eco B.V., d.d. 17.05.1999
- [4] Peilmetingen van peilbuis ter hoogte van Pettemerweg 33, telefonisch contact met dhr. Balstra, gemeente Alkmaar, d.d. 17.05.1999
- [5] Fax van J. K. Telleman (Reek B.V.) aan ECN d.d. 23.06.1999