

Industrieel toepasbaar stoom geproduceerd met ultradiepe geothermie

1 November 2011



Internship at IF technology by Maarten Holtkamp

Stageverslag

Door: Maarten Holtkamp – s0148393

Bedrijf: IF Technology

Locatie: Arnhem

Supervisor: Koen Hellebrand

Period: September, 2011 – December, 2011

Universiteit: University of Twente

Faculteit: Engineering Technology

Research group: Thermal Engineering

Supervisor: Prof.dr.ir. T.H. van der Meer

Samenvatting:

Voorwoord

Om de Master opleiding Sustainable Energy Technology af te ronden dient er in het 2^e jaar een stage gevolgd te worden. Deze stage heb ik mogen volgen bij IF technology te Arnhem. Tijdens mijn stage periode heb ik onderzocht hoe met ultradiepe geothermie stoom gemaakt kon worden voor industriële toepassingen. Deze opdracht heb ik gedaan bij het team Energie en Beleid onder begeleiding van Koen Hellebrand.

Naast het literatuur onderzoek en de fictieve cases, heb ik tijdens mijn stage ook meegewerkt aan lopende projecten. Ik heb hier kunnen ervaren hoe het er in een professionele omgeving aan toe gaat. Hierbij kon ik voor het eerst mijn opgedane kennis daadwerkelijk toepassen.

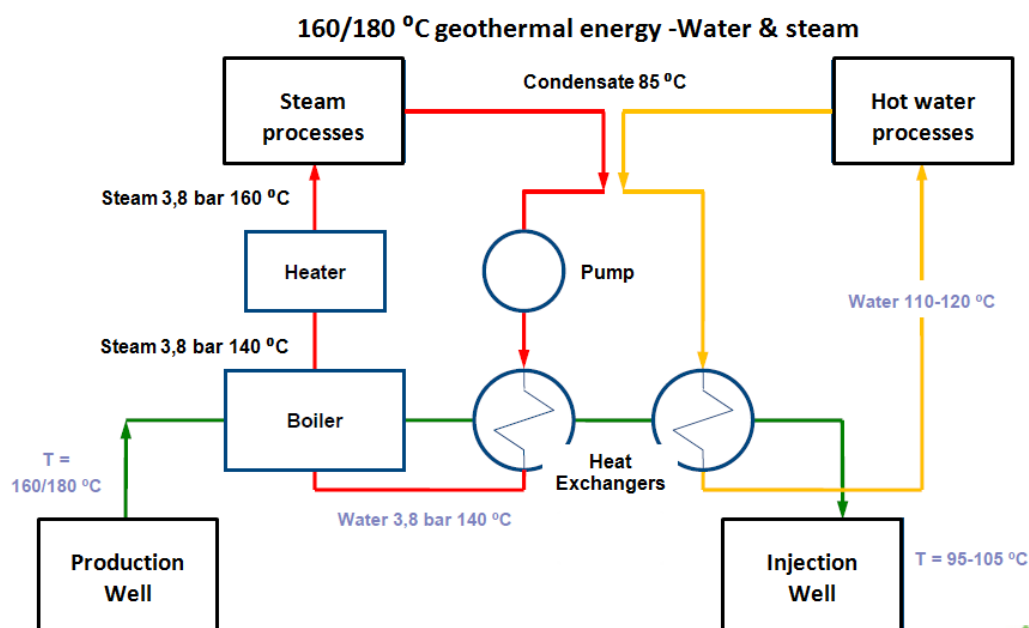
Bij deze wil ik dan ook alle collega's van IF bedanken voor hun bijdrage in mijn onderzoek. In het bijzonder wil ik Koen Hellebrand en Mark Gankema bedanken voor hun begeleiding en medewerking. Ik heb deze stage ervaren als zeer leerzaam en vond het ook zeer leuk om aan echte cases te werken. Ik hoop dan ook dat mijn onderzoek heeft kunnen bijdragen aan de ontwikkeling van ultradiepe geothermie.

Samenvatting

Stoom wordt zeer veel toegepast in de industrie. Om het te produceren is veel energie nodig, welke verkregen wordt met fossiele brandstoffen. Als deze stoom geproduceerd kan worden met geothermische warmte, kan dit bedrijven veel geld besparen. Tevens vermindert het de uitstoot van broeikasgassen.

Tijdens het onderzoek is er eerst de gekeken waar stoom gebruikt wordt en wat de eigenschappen zijn, dit doormiddel van een literatuur studie. De verkregen resultaten zijn vervolgens met geologische data verwerkt tot bruikbare concepten. Er is in het onderzoek ook ruimte gemaakt om te rekenen aan de concepten, voornamelijk op het technische vlak.

Uit de literatuur studie is gebleken dat de stoom van de meeste processen produceerbaar is met ultradiepe geothermie. Onderstaand figuur laat 1 van de concepten zien die ontworpen zijn. Het is namelijk niet altijd mogelijk om de benodigde hoeveelheid stoom te produceren. Er kan dan gekeken worden om een deel van de processen om te bouwen.



Figuur 1 Producteren van stoom en warm water.

In bovenstaand ontwerp kan een zo groot mogelijk thermisch vermogen van de bron gebruikt worden. Het nuttige thermische vermogen van de bron lag hierbij op 27MW, wat een besparing van meer dan 6 miljoen euro per jaar oplevert. De bovenstaande case had een CO₂ reductie van 85% tot gevolg. Hiermee zal ook de leefkwaliteit van omgeving verbeteren.

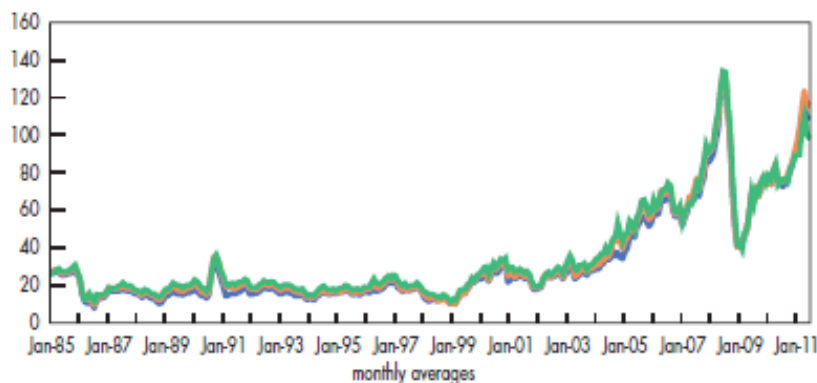
De hoge investeringen beperken het gebruik tot grote schaal toepassingen. De hoge investeringskosten worden vooral veroorzaakt door de prijs voor het boren van de bronnen.

Inhoudsopgave

Voorwoord	1
Samenvatting	2
Inhoudsopgave.....	3
1 Introductie.....	4
2 Geothermie.....	6
2.1 Warmte stromen en opbouw van de aarde.....	6
2.2 Direct gebruik van geothermie.....	7
2.3 Indirect gebruik van geothermie.....	8
2.4 WKO.....	9
2.5 Huidige gebruik van geothermie.....	10
3 Literatuur onderzoek.....	14
3.1 Stoom soorten.....	14
3.2 Stoom gebruik in de industrie.....	15
3.3 Thermisch drogen.....	19
3.4 Proces parameters.....	25
4 Theorie.....	26
4.1 Warmte wisselaars.....	26
4.2 Boilers	34
4.3 Comprimeren van gassen.....	36
4.4 Pomp vermogen.....	42
5 Technische concepten.....	44
5.1 Produceren van stoom of warmwater.....	44
5.2 Produceren van stoom en warmwater.....	46
5.3 Produceren stoom, warmwater en elektriciteit.....	47
6 Sustainability.....	49
6.1 Economisch duurzaam.....	49
6.2 Milieutechnisch duurzaam.....	52
6.3 Sociaal duurzaam.....	55
7 Conclusies en Aanbevelingen.....	57
Referenties.....	59
Bijlage A Geothermal properties at different mass flows.....	60
Bijlage B Handleiding Excel model.....	80
Bijlage C Formule kaart	90
Bijlage D Uitgebreide Processchema's.....	94
Bijlage E Versimpeld Excel model voor Norske Skog Parenco.....	100

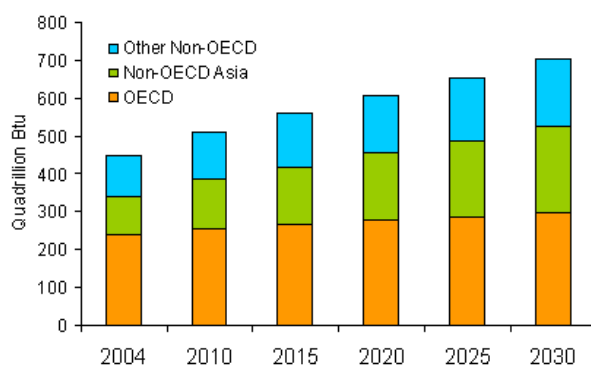
1. Introductie

Het gebruik van fossiele brandstoffen lijkt steeds meer voor problemen te zorgen. De prijs van vooral gas en olie blijft maar stijgen. Terwijl de uitstoot van CO₂ het broeikaseffect verergert. De sterke economische groei van landen als India en China zal de vraag naar fossiele brandstoffen alleen maar doen toenemen. Een toenemende vraag betekend een stijgende prijs. Dit effect zorgt ervoor dat bedrijven, overheden, instellingen en consumenten steeds meer gebruik willen maken van duurzame energie.



Figuur 1.1 Ontwikkeling van de olieprijs van 1985 tot aan 2011.

Dit effect wordt door de overheid vaak nog versterkt, door aan de ene kant fossiele brandstoffen extra te belasten en aan de andere kant subsidies te geven op duurzame energie. Investeren in duurzame energie betekend niet alleen een besparing van geld en milieu, maar het kan ook de toevoer van energie garanderen. Als de vraag naar fossiele brandstoffen over de hele wereld blijft toenemen, kan dit een verschuiving van de machtsverhoudingen beteken. Nu al zijn veel landen afhankelijk van gas uit Rusland en olie uit het Midden-Oosten. Zodra er wordt overgestapt op duurzame energie, zal men minder afhankelijk worden van deze politieke instabiele gebieden.



Figuur 1.2 Verwachte groei van het globale fossiele brandstof verbruik.

Een goed alternatief voor fossiele brandstoffen is het gebruik van ultradiepe geothermie(aardwarmte). De aarde onder onze voeten heeft een enorme energie potentiaal. In Nederland is de gemiddelde temperatuurgradiënt 30 °C per kilometer. Vanaf dieptes van 5000 meter wordt geothermie ook wel ultradiepe geothermie genoemd. De temperatuur is hierbij dusdanig hoog dat deze geschikt is om elektriciteit te produceren of om de warmte direct te gebruiken.

Tijdens dit onderzoek is er gekeken of ultradiepe geothermie toegepast kan worden om stoom te produceren voor industriële processen. Bij veel industriële processen is lage druk stoom nodig, dit kan onder andere zijn om een product te drogen of om ketelwater te ontgassen. Tegenwoordig wordt de

stoom geproduceerd met fossiele brandstoffen. Het kan daarbij een restproduct zijn uit een warmtekrachtcentrale, maar de stoom kan ook direct geproduceerd worden in lage druk stoomketels.

Het probleem bij het maken van stoom is dat dit erg veel energie kost, in de vorm van warmte. Het indampen van 1 liter water bij atmosferische druk kost net zoveel energie als het aan de kook brengen van 6 liter water. Als deze energie geleverd kan worden met ultra diepe geothermische warmte, kan dit voor veel bedrijven een enorme gasbesparing opleveren.

Stoom productie met geothermie is alleen mogelijk als de temperatuur van de geothermische bron hoger is dan de verzadigingstemperatuur proceswater. Deze temperatuur is afhankelijk van de druk waarmee gewerkt wordt. Om te kijken hoe de stoom geproduceerd kan worden, wordt onderzocht welke werktuigen er nodig zijn. Hierbij valt te denken aan pompen, warmtewisselaars, boilers en compressoren. Daarbij moet ook de grote van deze werktuigen berekend worden, om een schatting te maken van de kosten.

Dit verslag is als volgt opgebouwd:

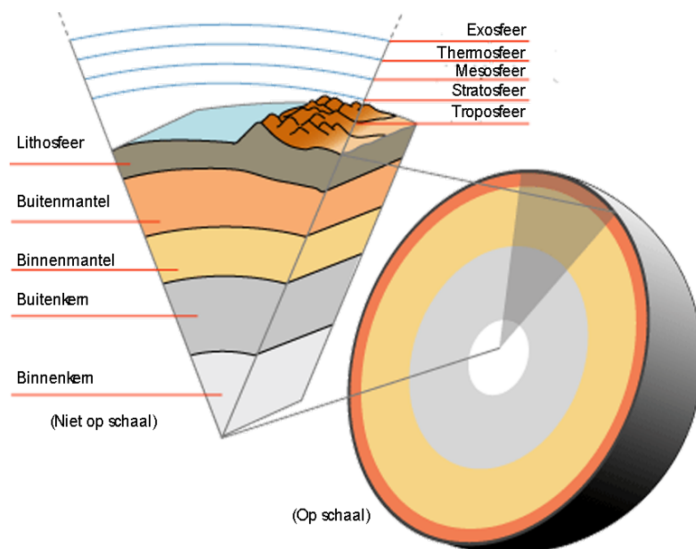
- Hoofdstuk 2: Analyse over geothermische energie
- Hoofdstuk 3: Literatuur onderzoek naar stoom, stoom productie en stoom gebruik.
- Hoofdstuk 4: Thermodynamische theorie achter de benodigde werktuigen
- Hoofdstuk 5: Ontwikkeling van concepten aan de hand van de in hoofdstuk 2-4 opgedane kennis
- Hoofdstuk 6: Analyse over de financiële, milieutechnische en sociale gevolgen van de in hoofdstuk 5 ontwikkelde concepten:

2. Geothermie

Geothermie of aardwarmte is een van de oudste toepasbare energie vormen. In landen met veel vulkanische activiteit, zoals IJsland, wordt het al eeuwen gebruikt. De geothermische warmte kan gebruikt worden om te verwarmen of het kan omgezet worden in elektriciteit. In dit deel wordt er voornamelijk gekeken naar de mechanismes, de type geothermische systemen en waar het wordt toegepast.

2.1 Warmte stromen en opbouw van de Aarde.

Aardwarmte wordt voornamelijk gevormd door twee energie vormen. De eerste vorm is de energie die over is gebleven bij het ontstaan van de aarde. De aarde is ongeveer 5 miljard jaar geleden gevormd. Hierbij werd bewegingsenergie door wrijving omgezet in warmte. Het grootste gedeelte van deze warmte zit nog opgesloten in het binnenste van de aarde. Zoals in figuur 2.1 te zien is, is onze planeet opgebouwd uit verschillende lagen. Kort samengevat bestaat deze uit een binnenkern, een buitenkern, een binnenmantel, een buitenmantel en als laatste de aardkorst. De temperatuur in de kern van de aarde is ongeveer 5000 °C, zie tabel 2.1. Doordat de aarde een slechte warmte geleider is, merk je aan de buiten kan weinig van de grote hoeveelheid warmte aan de binnenkant.



Figuur 2.1 Opbouw van de Aarde

De restwarmte die ontstaan is bij het ontstaan van de aarde bevat 30% van de totale hoeveelheid aardwarmte. De rest (70%) wordt opgewekt door radioactieve vervalprocessen. Radioactieve isotopen in de aarde vervallen zeer langzaam. Bij dit proces komt er dusdanig veel warmte vrij dat na miljoenen jaren van verval, 70% van de aanwezige aardwarmte hierdoor veroorzaakt is. De hoeveelheid warmte die per seconde door radioactieve verval processen geproduceerd wordt is ongeveer 16 TW. De bijbehorende warmteflux aan de rand van de aarde bedraagt hiermee 0.032 W/m².

Hierboven is al vermeld dat door slechte thermische geleiding aan het aardoppervlak weinig te merken is van de warmte onder onze voeten. Als er echter dieper in de grond wordt gekeken, valt te zien dat de temperatuurgradiënt van de aarde toch rond de 25-30 °C per kilometer diepte is.

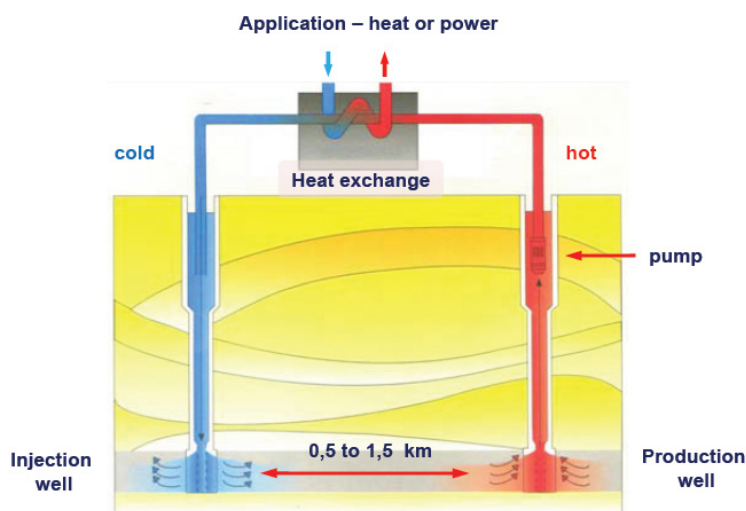
Tabel 2.1 Temperatuur schaal voor verschillende aardlagen.

	Diepte (km)	Temperatuur (°C)	Toestand
Aardkorst	0-40	10-1200	Vast
Mantel	40-2900	1400-3000	Vast/Vloeibaar
Buitenkern	2900-5200	4000-5000	Vloeibaar
Binnenkern	5200-6370	5000-6000	Vast

2.2 Aardwarmte voor thermische doeleinden.

In feite kan de aanwezige aardwarmte op twee manieren gebruikt worden, voor warmte productie (direct gebruik) en voor elektriciteitsproductie (indirect gebruik). In landen als Italië of IJsland worden natuurlijke geothermische bronnen al duizenden jaren gebruikt om mee te koken, in te baden of om mee te verwarmen. Het is daarom ook niet zo gek dat juist deze landen voorop lopen met de ontwikkeling van geothermie.

In tegenstelling tot elektriciteit opwekking, is er bij direct gebruik er geen hoge temperaturen nodig om de energie te gebruiken voor thermische doeleinden. Een voorbeeld hierbij is het gebruik van de bodem om te koelen. Al op geringe dieptes (50m-100m) is de bodem vrij van seizoensgebonden temperatuurswisselingen. Hierdoor ligt de temperatuur op deze dieptes rond de 12-13 °C. In de zomer kan de bodem hiermee gebruikt worden om water af te koelen, dit gekoelde water kan dan dienen als koelmiddel voor gebouwen. In potentie kan hiermee veel energie bespaard worden op airconditioning systemen. Er kan ook gekozen worden om een warmtepomp te gebruiken, dit heeft echter een lager rendement tot gevolg.

**Figuur 2.2 Basis principe van een geothermisch systeem.**

Bij dieptes van 1000 tot 3000 meter zal de temperatuur hoog genoeg zijn om warmte te kunnen winnen zonder warmtepomp. Hiertoe worden er twee putten geboord, zie figuur 2.2. In de injectie put wordt koud water de bodem in gepompt. Dit water trekt door de bodem, waarbij het de aanwezige warmte onttrekt. Het hete water wordt daarna uit de bodem gepompt bij de productie put. In een warmtewisselaar wordt de warmte onttrokken uit het systeem, waarbij het gebruikt kan worden in diverse toepassingen, zoals stadsverwarming. Het afgekoelde water daarna weer via de injectie put de grond in gepompt.

2.3 Aardwarmte voor elektriciteitsopwekking

Het is bijna honderd jaar geleden dat aardwarmte voor het eerst werd toegepast om elektriciteit te produceren. In het Italiaanse plaatsje Larderello werd een kleine centrale gebouwd, die tot op heden nog steeds actief is. In Italië is geothermie op geringe dieptes al mogelijk. Dit komt omdat de Euraziatische plaat en de Afrikaanse plaat elkaar hier treffen. In de buurt van de breuklijnen bevindt zich heet magma al op geringe dieptes, waardoor de bodem een hogere gradiënt heeft. Tegenwoordig wordt in Italië meer dan 800 MW aan elektriciteit geproduceerd met aardwarmte.

Geothermie kan op verschillende manieren gebruikt worden om stroom te produceren. De warmte kan indirect gebruikt worden, door het gebruik van een warmtewisselaar. Met deze warmtewisselaar kan dan water verdampt worden, welke gebruikt kan worden in een stoomturbine. Hiervoor zijn echter wel temperaturen nodig van minstens 120 °C.

Bij temperaturen vanaf 80 °C, kan er in plaats van water ook organische stoffen gebruikt worden. Deze stoffen koken bij een lagere temperatuur en zijn dus eerder geschikt. Het rendement van deze Organic Rankine Cycles (ORC's) is echter met 8-10% vrij laag. Het maximaal haalbare rendement (carnot rendement) is bij lage temperaturen altijd laag. Dit rendement kan berekend worden met [2.1].

$$\eta_{max} = 1 - \frac{T_c}{T_h} \quad [2.1]$$

T_c = omgevings temperatuur (K)

T_h = Temperatuur waarmee het gas de turbine ingaat (K)

Vanaf 150 °C is het ook mogelijk om het water uit de bron direct te gebruiken om elektriciteit op te wekken. Hiertoe wordt het water geflashed. Door de druk sterk te reduceren, zal een deel van het water verdampen, dit wordt flashen genoemd. De hoeveelheid stoom die hiermee geproduceerd wordt, is voornamelijk afhankelijk van de begin temperatuur en de gewenste eind druk. Het percentage van het water dat verdampt kan berekend worden met [2.2].

$$X = 100\% * C_p * \frac{T_h - T_c}{\Delta H_e} \quad [2.2]$$

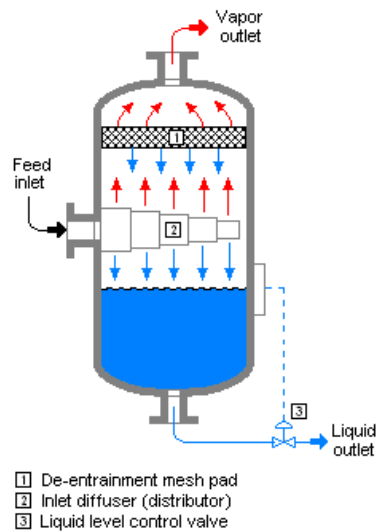
C_p = warmtecapaciteit (J/kgK)

T_h = temperatuur voor flashen (K)

T_c = temperatuur water en stoom na flashen (K)

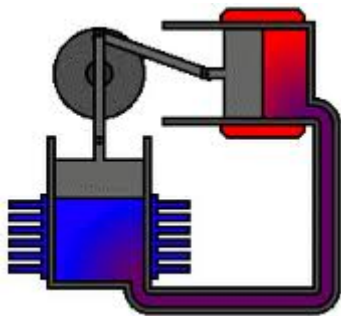
ΔH_e = verdampings warmte van water bij gewenste einddruk (J/kg)

De temperatuur van de stoom na het flashen is druk afhankelijk. Deze zal namelijk liggen op het verzadigingspunt van de gewenste druk. Dit betekent dat bij een einddruk van 1 bar de temperatuur van de stoom 100 °C zal zijn. Een voorbeeld van een flashtank is te zien in figuur 2.3.



Figuur 2.3 Voorbeeld van het flashen van water.

Alternatieven voor het gebruik van stoom of een ORC zijn de Stirlingmotor en de Kalinamethode. De Stirlingmotor is gebaseerd op het principe dat gassen expanderen bij toevoer van warmte en comprimeren bij afkoeling. Heet gas wordt een cilinder in gespoten, waarna deze door afkoeling comprimeert. Het comprimeren zet vervolgens een zuiger in beweging, welke arbeid kan verrichten. Het principe is versimpeld weergegeven in figuur 2.4. Stirlingmotoren worden vooral gebruikt bij installaties tot 200 kW.

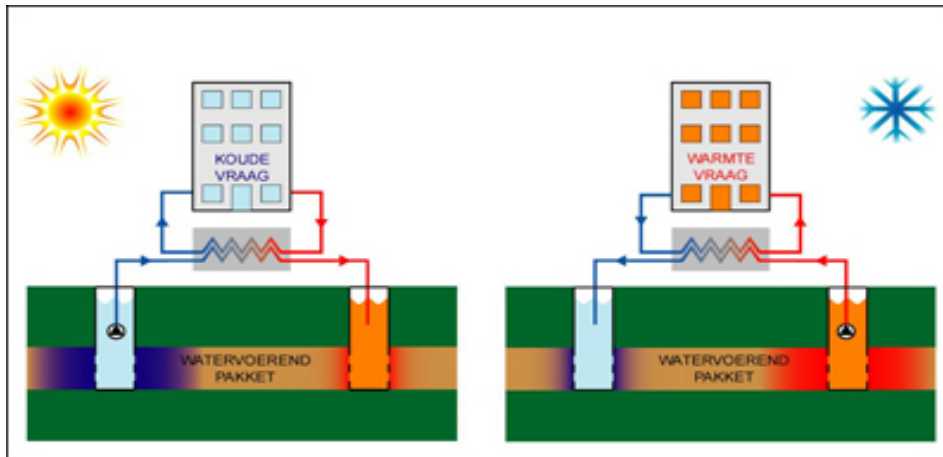


Figuur 2.4 Concept van een Stirlingmotor.

De Kalinamethode maakt gebruik van mengsels van twee stoffen, bijvoorbeeld water en ammoniak. Dit mengsel wordt verdampt, waarna het in een turbine stroom opwekt. Doordat het ammoniak een lager kookpunt heeft dan water kan een groter temperatuursbereik gebruikt. Hierdoor kan het rendement van het systeem wel met 40 procent toenemen.

2.4 WKO

Naast het onttrekken van warmte uit de bodem, kan de aarde ook worden gebruikt om warmte en koude in op te slaan. Bij een diepte van 50-100 meter is de aarde dusdanig geïsoleerd dat het mogelijk is om warmte op te slaan. Er kan zowel warm water als koud water worden opgeslagen. In de winter kan het warme water worden gebruikt voor verwarming en in de zomer kan het koele water worden gebruikt voor verkoeling, zie figuur 2.5.



Figuur 2.5 Schematische weergave van een WKO installatie.

Om WKO toe te passen zijn waterhoudende zand lagen nodig. Om rendabel te zijn moeten deze lagen voldoende dik zijn en een hoge permeabiliteit hebben. Deze lagen moeten omsloten zijn door kleilagen voor isolatie. Als er slecht een dunne waterhoudende zand laag aanwezig is, is het vaak niet rendabel om een WKO installatie te plaatsen. De bodemstructuur in Nederland is in veel gebieden zeer geschikt voor warmte koude opslag.

Er zijn twee systemen mogelijk bij warmte koude opslag. Er is een opensysteem, waarbij het water uit de bodem direct onttrokken wordt. Hierbij kan er gebruik gemaakt worden van mono-bronnen en doubletten. Bij mono-bronnen gebeurt het onttrekken en injecteren op 1 locatie, terwijl er bij doubletten 2 putten geslagen worden, die enige afstand uit elkaar liggen. Naast opensystemen bestaan er ook gesloten systemen. Hierbij wordt een vloeistof rondgepompt die niet in direct contact staat met de omgeving. Hierdoor is het mogelijk om naast water ook andere koelvloeistoffen te gebruiken.

Naast dat de bodem niet overal geschikt is voor WKO, zijn er ook nog andere belemmeringen. Wet- en regelgevingen stellen vaak hoge eisen aan WKO installaties. WKO toepassingen zijn verboden in waterwingebieden, grondwaterbeschermingsgebieden voor de openbare drinkwatervoorziening en gebieden met een boringvrije zone.

2.5 Gebruik van aardwarmte

In potentie is geothermie een van de belangrijkste duurzame energie bronnen. Dit is in veel landen niet onopgemerkt gebleven, en de laatste jaren is daarom een sterke groei gezien. Geothermie is een belangrijke duurzame energiebron. In dit gedeelte wordt er gekeken, waar op deze aardbol, geothermie zoal wordt toegepast. Daarnaast wordt de situatie in Nederland ook bekeken.

2.5.1 Globaal

Direct gebruik

De totale geproduceerde hoeveelheid geothermische energie voor direct gebruik bedroeg in 2005 meer dan 260 duizend Terajoule. Tabel 2.2 is een top vijf van landen met de grootste capaciteit aan geothermisch energie voor direct gebruik. Hierbij valt op dat Zweden een groot aandeel heeft. Dit is opvallend omdat Zweden geologisch gezien niet veel hoogwaardige vindplaatsen heeft. Door een goed en degelijk beleid is het gelukt om groot thermisch vermogen te produceren. Dit biedt hoop aan landen met vergelijkbare bodems, zoals Nederland.

Tabel 2.2 De vijf landen met het meeste geïnstalleerde thermische vermogen.

Land	Gebruikte capaciteit (MWth)	Percentage van nationale productie
Verenigde Staten	7820	-
Zweden	4200	-
China	3690	-
IJsland	1840	16%
Turkije	1500	-

Indirect gebruik

Stroomopwekking is vaak alleen rendabel op hoge temperaturen. Het is wordt daarom vooral toegepast in landen met vulkanische activiteit. In deze landen vind de laatste jaren een groei plaats aan geïnstalleerd vermogen. Bedroeg het totale geïnstalleerde vermogen in 2004 nog 8912 MW, tegenwoordig is dit gestegen naar 10960 MW. Een stijging van meer dan 20 procent. Tabel 2.3 geeft een overzicht van de top vijf landen waar geothermie wordt gebruik om elektriciteit op te wekken

Door de stijgende prijs van fossiele brandstoffen, zal elektriciteitsproductie met geothermie op steeds meer plekken financieel aantrekkelijk worden. Zelfs in landen met alleen laagenthalpische vindplaatsen, zoals in Nederland. Er dient dan wel zeer diep geboord te worden, wat hoge investeringskosten met zich mee zal brengen. Het Geothermie-Kraftwerk Neustad-Glewe is een van de eerste elektriciteitscentrales in een laagenthalpisch gebied.

Tabel 2.3 De 5 landen met het meeste geïnstalleerde elektrische vermogen.

Land	Capaciteit (MWe)	Percentage van nationale productie
Verenigde Staten	3086	0.3%
Filippijnen	1904	27%
Indonesië	1197	3.7%
Mexico	958	3%
Italië	843	1.5%

2.5.2 Nederland*Direct gebruik*

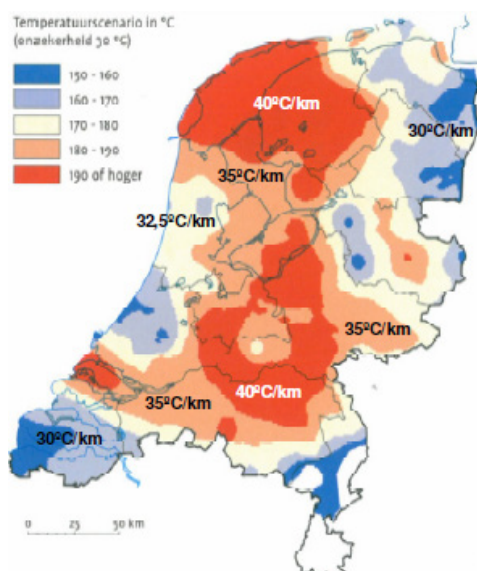
In Nederland wordt de bodem vooral gebruikt voor warmte- koude opslag. Naast dat de bodem hiervoor zeer geschikt is, moet er ook zeer diep geboord worden voordat temperatuur hoog genoeg is voor thermische toepassingen. Figuur 2.6 laat de ontwikkeling van WKO installaties in Nederland zien. Hierbij valt te zien dat de meeste van deze installaties in het westen van het land geplaatst worden, vooral in de regio Den Haag. Dit komt omdat de bodem zich hier uitstekend leent voor warmte koude opslag.



Figuur 2.6 WKO installaties in Nederland

In tegenstelling tot WKO wordt geothermie nauwelijks toegepast in Nederland. Er zijn wel veel plannen om het in de toekomst toe te passen, zoals in de glastuinbouw. Figuur 2.7 laat de temperatuur gradiënt zien voor Nederland. Hier valt te zien dat, vooral in Friesland en Gelderland, geothermie behoorlijk wat mogelijkheden heeft. In Friesland is er echter in verhouding weinig vraag naar warmte.

Diepe geothermie wordt tot op heden alleen toegepast in Den Haag. Bij dit project wordt diepe aardwarmte gebruikt voor stadsverwarming. Het water wordt met een temperatuur van 75 °C uit de 2 kilometer diepe bron gepompt. Het thermische vermogen van deze bron is genoeg om 4000 nieuwe huizen en 20.000 m² aan bedrijfsruimte te verwarmen. Dit betekent een gasbesparing van 3 miljoen kubieke meter per jaar en een CO₂ reductie van 5000 ton per jaar.



Figuur 2.7 Temperatuur gradient in Nederland.

Indirect gebruik

Indirect gebruik van geothermie, dus het opwekken van elektriciteit, wordt in Nederland nog niet toegepast. Wel zijn er op dit moment een aantal pilot projecten bezig. Een project waar IF technology bij betrokken is, is het opwekken van elektriciteit in Hoogeveen. Hier zal een centrale gebouwd worden met een elektrisch vermogen van bijna 12 MW.

2.5.3 Norske Skog Parenco

Parallel aan dit onderzoek liep het ultradiepe geothermie project bij Norske Skog Parenco. Parenco is een papierfabriek gelegen aan de Rijn in Renkum. Elk jaar verstookt deze fabriek bijna 90 miljoen kubieke meter aan aardgas. Het aardgas wordt gebruikt om elektriciteit op te wekken en om stoom te produceren voor verschillende processen.

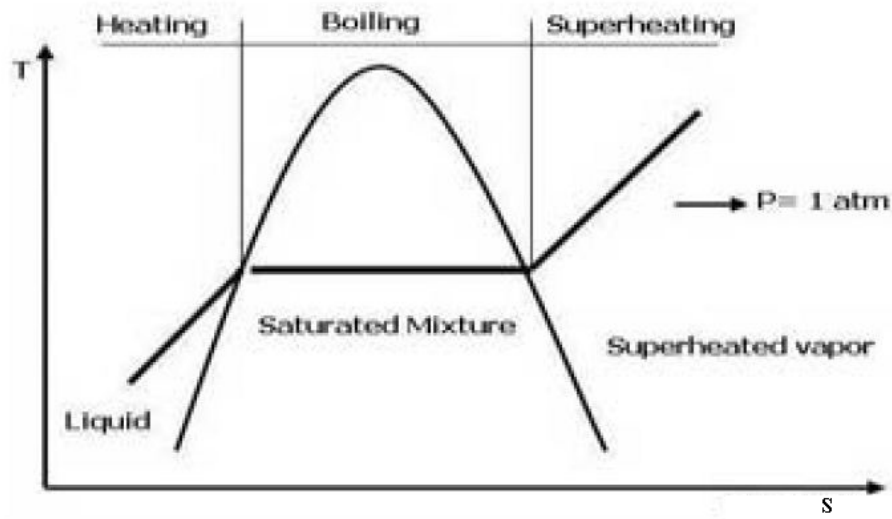
Om de kosten voor het energie verbruik te beperken, is Parenco samen met IF technology een haalbaarheidsstudie gestart naar het gebruik van ultradiepe geothermie. De aardwarmte wordt hierbij gebruikt om stoom en heet water te produceren. De benodigde elektriciteit wordt deels zelf opgewekt en de rest wordt ingekocht. De eerste resultaten van dit onderzoek hebben aangetoond dat het gasverbruik met meer dan 80% zal dalen. Dit kan in combinatie met de ingekochte elektriciteit, tot een besparing leiden van bijna 10 miljoen euro.

3 Literatuur onderzoek

Dit hoofdstuk beschrijft het literatuur onderzoek wat gedaan is om geschikte proces parameters te vinden, die gebruikt kunnen worden in een model. Als eerste zal er worden ingegaan op wat voor soorten stoom er zijn. Daarna wordt kort gekeken hoe deze stoom tegenwoordig geproduceerd wordt. De gemaakte stoom wordt ergens gebruikt, dus is er gekeken naar welke processen er zoal gebruik maken. Een van de belangrijkste processen is hierbij het drogingproces, daarom wordt er dieper ingegaan op dat proces. Als laatste wordt de gevonden informatie gebruikt, om de processen met de juiste proces parameters weer te geven.

3.1 Stoom soorten

In feite bestaan er 3 soorten stoom: natte stoom, oververhitte stoom en verzadigde stoom. Als er gekeken wordt naar een TS-diagram (figuur 3.1) voor het verdampen van water, dan kunnen alle 3 types geclassificeerd worden.



Figuur 3.1 TS-diagram voor het produceren van stoom

Natte stoom

Natte stoom is een toestand waarbij nog niet al het water verdampt is. In het stoom komen dus nog kleine waterdruppels voor. Een voorbeeld van natte stoom is de stoom die ontsnapt uit een fluitketel, zie figuur 3.2. De waterdruppels bij natte stoom zorgen er voor dat de stoom niet kleurloos is. Kijkend naar het TS-diagram bevindt natte stoom zich in het gebied genaamd "Saturated Mixture". Bij verdere verhitting zullen de waterdruppeltjes eerst verdampen, pas daarna zal de temperatuur stijgen.



Figuur 3.2 voorbeeld van natte stoom

Verzadigde stoom

Zodra in het verdampingsproces geen waterdruppeltjes meer aanwezig zijn in het stoom, wordt het verzadigde stoom genoemd. Verzadigde stoom is stoom die condenseert bij verlaging van temperatuur (zie dauwpunt). Deze stoom is ongeschikt voor het aandrijven van een stoomturbine, maar kan wel gebruikt worden voor het aandrijven van een stoommachine of voor de overdracht van warmte.

Oververhitte stoom

Als stoom na het verzadigingspunt verder verhit wordt ontstaat oververhitte stoom. Bij verlies aan warmte zal deze stoom afkoelen zonder dat het condenseert. Oververhit stoom wordt onder andere gebruikt bij elektriciteit opwekking in een stoomturbine.

3.2 Stoom gebruik in de industrie

3.2.1 Produceren van stoom

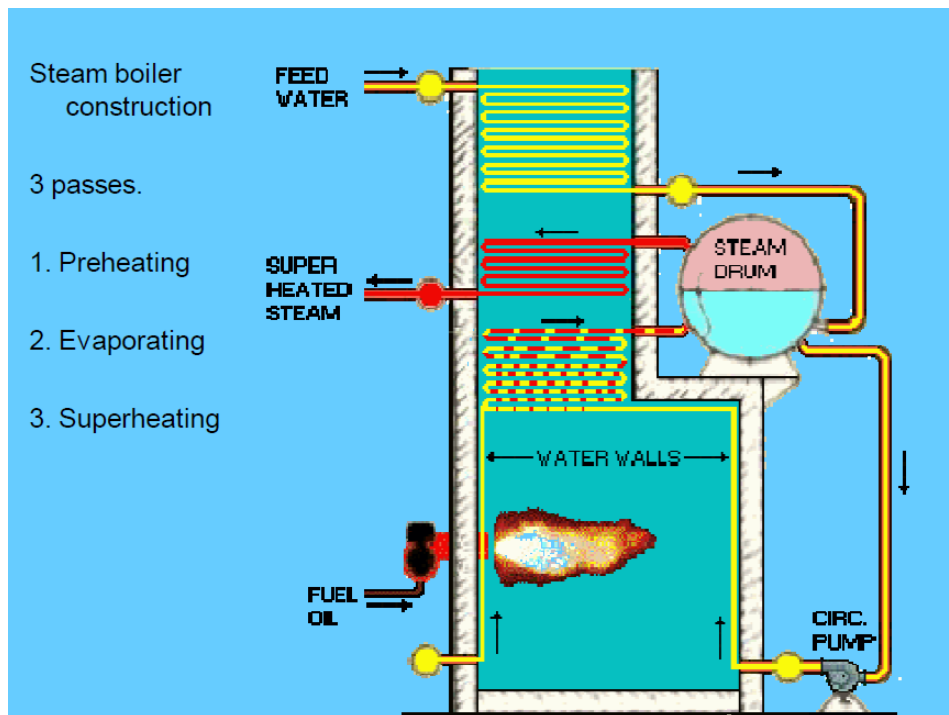
Het produceren van stoom wordt dieper behandeld in hoofdstuk 4. In dit gedeelte wordt er vooral gekeken naar hoe stoom tegenwoordig wordt geproduceerd. De eigenschap waar stoom vooral voor wordt gebruikt is de grote hoeveelheid warmte die het bezit. Stoom van 100 °C bevat 6 keer zoveel warmte als vloeibaar water op dezelfde temperatuur. Naast de Van der Waals verbinding, vormen watermoleculen onderling ook nog waterstofbruggen. Bij een faseovergang moeten deze verbindingen verbroken worden, wat veel energie kost.

Stoomketels

In een stoomketel wordt water onder een bepaalde druk aan de kook verdampt. De stoomketels worden vaak gevoed met aardgas of kolen. Door de zeer hoge verbrandingstemperatuur van deze fossiele brandstoffen zijn de benodigde oppervlaktes om te verdampen relatief klein. Een nadeel van stoomketels is, dat ze toch relatief groot moeten zijn omdat het water sterkt uitzet zodra het van vloeibaar overgaat in een gas.

Warmtewisselaar met stoomvormer.

Een andere manier om het water te verdampen is door het in een warmtewisselaar slecht gedeeltelijk te verdampen. De damp wordt daarna gescheiden van de vloeistof in een stoomvormer. De vloeistof stroomt hierna terug de warmtewisselaar in, waar het proces opnieuw begint. Een voorbeeld van stoom vorming proces met warmtewisselaars is te zien in figuur 3.1.



Figuur 3.3 Voorbeeld van een stoom vorming proces.

Het voedingswater wat bovenin binnenkomt wordt eerst voorverwarmd tot vlak onder het kookpunt. Het stroomt hierna de stoomvormer in waar het gemengd wordt met het water wat uit de verdamper komt. Hierna wordt het water met een pomp in een wand rondom de branders gepompt. Hier is de temperatuur het hoogst en zal het water beginnen te verdampen. Uiteindelijk bereikt het water wat de stoomvormer. De stoom wordt daarna nog een keer langs de uitlaatgassen van de branders geleid, waarbij het oververhit wordt.

3.2.2 Processen

Met ultradiepe geothermie kunnen temperaturen gehaald worden tot ongeveer 250 °C. Deze temperaturen zijn niet geschikt om stoom te maken voor elektriciteit productie, aangezien hierbij meestal gewerkt wordt met drukken van 70-80 bar en temperaturen tot 500°C. Er zal dus gekeken moeten worden naar processen die werken met stoom op lage druk (tot 10 bar) en lage temperatuur (tot 200 °C).

Drogen

Bij bijna alle industriële productie processen komt er een stap waarbij het product gedroogd moet worden. Dit kan in principe op 2 manieren. Het water kan mechanisch uit het product gehaald worden, bijvoorbeeld met een pers of filter. Bij mechanisch drogen, zoals centrifugeren, kan het vochtgehalte in een product teruggebracht worden tot maximaal 65%wt[5].

Bij veel producten moet het vocht gehalte terug worden gebracht tot zelfs 10%. Om dit te bereiken zijn thermische drogers nodig. Bij thermisch drogen wordt het water uit het product verdampt. Om bij een voorgedroogd product met een vochtgehalte van 65%, het vochtgehalte terug te brengen tot 10% moet 96 % van het aanwezige water verdampt worden.

Industriële droging processen kosten dermate veel energie, dat het tezamen wel 20% van de nationale energie consumptie kan bevatten[5]. Er bestaan zeer veel thermische droging processen. Een paar daarvan gebruiken stoom op relatief lage druk en temperatuur. Deze processen kunnen daarom zeer geschikt zijn om ultradiepe geothermie in toe te passen. De thermische droging processen worden dieper uitgewerkt in 3.3.

Schoonmaken

Het voordeel van schoonmaken met stoom is dat er geen reinigingsmiddelen nodig zijn en dat de stoom vaak ook desinfecteerd en steriliseert. De stoom die gebruikt wordt voor het reinigen heeft een druk van enkele bars, en is dus laag van druk. De temperatuur ligt rond de 120-150 °C en de stoom bevat nog een laag vocht gehalte, dit betekent dat er gebruik wordt gemaakt van natte stoom.

Nog een groot voordeel van het gebruiken van stoom is dat het relatief weinig water verbruikt, slechts een fractie van het water verbruik van een tapijtreiniger. Een tapijtreiniger gebruikt heet water in plaats van stoom en heeft dus veel meer nodig om hetzelfde oppervlakte te kunnen reinigen. Doordat er slechts weinig water gebruikt wordt, is het reinigen met stoom geschikt om binnenshuis te gebruiken zonder risico op waterschade.

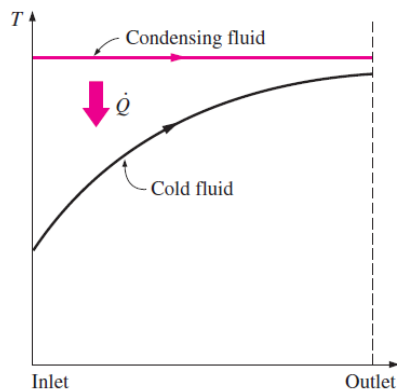
Naast de stoom reinigers die geproduceerd worden voor de consument, bestaan er ook grote geïndustrialiseerde reinigers. Deze reinigers kunnen worden van stoom geproduceerd met geothermie. Hierbij valt te denken aan de textiel industrie om grote oppervlakken textiel te reinigen.

Stoom reinigen wordt vaak gezien al een groene manier van reinigen aangezien er geen gebruik wordt gemaakt van chemicaliën. Echter is het produceren van stoom zeer energie intensief, dus als het echt een groene oplossing wil worden, moet het op een milieuvriendelijke manier geproduceerd worden. Geothermische warmte zou hierbij voor industriële toepassingen een geschikte oplossing kunnen zijn. Wel is het de vraag of de kosten voor het maken van de bron, opwegen tegen de totale stoom behoefte die nodig is bij het reinigen.

Verwarmen/verdampen

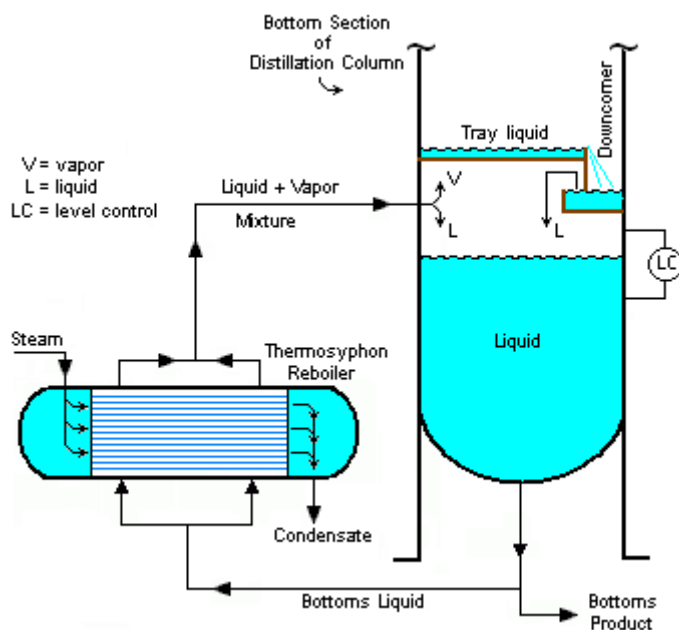
Het verwarmen met stoom is een van de oudste verwarmingstechnieken. Het water wordt verdampt in een boiler waarna het condenseert, en daarmee zijn warmte afgeeft in een radiator. De eerste centrale verwarming systemen voor gebouwen werkten met behulp van stoom, aangezien de stoom geen pomp nodig heeft om door de leidingen te stromen. Het grote voordeel en nadeel van verwarmen met stoom is dat er altijd met een constante temperatuur verwarmt wordt.

In zeer grote opslag ruimtes kunnen er door temperatuursverschillen stromingen ontstaan. Bij Vopak wordt stoom gebruikt om silo's gevuld met vloeistoffen, zoals olie, op een constante temperatuur te houden. De vloeistof wordt door het condenserende stoom gelijkmatig verwarmd. Het is echter wel een zeer inefficiënte manier van verwarmen, aangezien een groot deel van de warmte verloren gaat, zolang niet al het stoom condenseert.



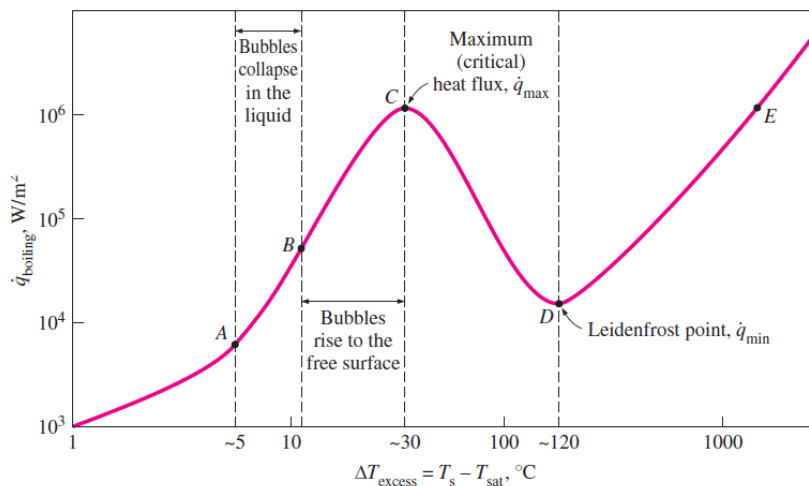
Figuur 3.4 Temperatuur verloop van afkoelend stoom[6].

De eigenschap dat stoom condenseert op een constante temperatuur, kan ook worden gebruikt in een ander verwarmingsproces, namelijk het verdampen. Voorbeelden van verdamper zijn destillatiekolommen, zie figuur 3.5. Bij het destillatie proces worden een aantal vloeistoffen van elkaar gescheiden, door deze deels te verdampen. Alcohol verdampt bij atmosferische druk bij 78 °C, terwijl water bij dezelfde druk verdampt op 100 °C. Opgelost alcohol kan dus gescheiden worden door deze te laten verdampen en daarna af te vangen.



Figuur 3.5 Thermosyphon reboiler om vloeistoffen te verdampen met stoom.

Het verdampen met stoom is zeer geschikt, omdat het temperatuursverschil zo gekozen kan worden dat de warmteflux zo groot mogelijk is. De warmteflux, welke verder beschreven wordt in hoofdstuk 4, bepaald de grote (en dus grotendeels de prijs) van de verdamper. In figuur 3.6 valt te zien dat de maximale warmteflux gehaald wordt bij een bepaald temperatuursverschil.



Figuur 3.6 Warmteflux als functie van het temperatuursverschil[6].

Ontgassen

Een ontgasser is een werktuig dat opgeloste gassen verwijdert uit een vloeistof, zoals water. Opgelost zuurstof en koolstofdioxide hebben een eroderende werking in stoomketels. Om deze gassen uit het proces water te krijgen, wordt stoom toegevoegd en wordt de vloeistof op onderdruk gebracht. Volgens de Wet van Raoult drijft de stoom de andere gassen uit het water. Met een stoom ontgasser kan de concentratie van zuurstof worden teruggebracht tot 7 microgram per liter.

De stoom wat voor deze toepassing wordt gebruikt is vaak iets oververhit. De eroderende werking van de opgeloste stoffen is van een dergelijk mate dat bij vrijwel elke grote stoomketel voor industriële toepassingen ook wel een ontgasser aanwezig is. Bij case studies van twee papierfabrieken is gebleken dat de hoeveelheden stoom, die gebruikt worden voor het ontgassen, relatief laag zijn. Een geothermische bron boren om alleen stoom te maken voor ontgassen zal dus niet rendabel zijn.

3.3 Thermisch drogen

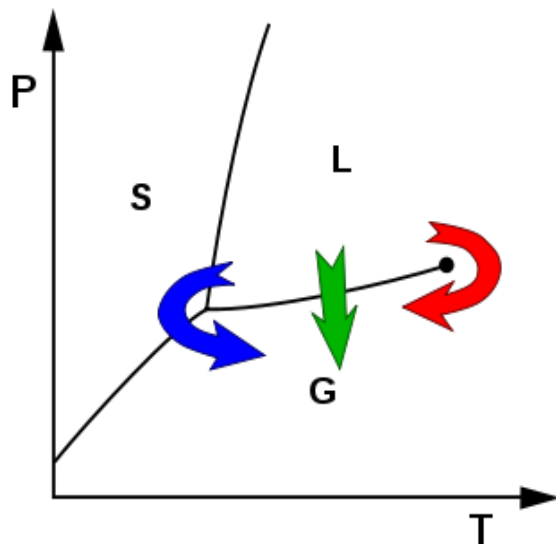
In 3.2 is al kort ingegaan op het droging proces. Er viel te zien dat thermisch drogen een grote energie gebruiker is. Een deel van deze processen gebruikt hierbij lage druk stoom. Er kan dus gas bespaard worden, als deze stoom met geothermische warmte geproduceerd wordt. Stoom wordt vaak gebruikt in plaats van lucht, omdat stoom geen zuurstof en andere stoffen bevat, die kunnen reageren met het product.

3.3.1 Mechanismen

Onder thermisch drogen wordt verstaan het met extra warmte verwijderen van een vloeistof uit een product. De vloeistof kan op twee manieren aanwezig zijn. Het kan zich rondom het product bevinden en het kan geabsorbeerd zijn in het product.

Het droging proces berust op het thermodynamische principe van chemisch potentiaal. "De chemische potentiaal van een bestanddeel in een systeem is de toename in energie die zou optreden als men aan een systeem een eenheid van dat bestanddeel zou toevoegen, bij gelijkblijvende entropie en volume"[8]. Een product zal alleen drogen als er een chemisch potentiaalverschil aanwezig is tussen het product en zijn omgeving.

Het drogingproces stopt zodra het product en de omgeving in evenwicht zijn en dus hetzelfde potentiaal hebben. Het drogen kan bevorderd worden door de druk van de omgeving te verlagen of de temperatuur van de omgeving te verhogen, zie figuur 3.7. Hierdoor zal het chemische potentiaal verschil groter worden, waardoor de snelheid toeneemt. Het verhogen van de temperatuur is het principe achter thermisch drogen. Het versnellen van het drogingproces kan echter wel van invloed zijn op de kwaliteit van het product.



Figuur 3.7 De drie fasen van een stof uitgezet tegen de druk en temperatuur. S = vast L = vloeibaar en G = gas.

Wanneer een product gedroogd wordt, vinden er twee processen simultaan plaats. Het eerste proces is het verdampen van vocht aan het oppervlak van het product, bij thermisch drogen door toevoer van warmte. Het tweede proces is het transport van vocht binnen in het product. Door het verdampen van water aan het oppervlak treedt er binnen het product ook een chemisch potentiaalverschil op. Dit veroorzaakt het inwendige transport van vocht.

De snelheid van het totale drogingproces is afhankelijk van de snelheid waarmee deze twee processen plaatsvinden. Het eerste proces hangt af het materiaal, de temperatuur, de druk de grote van het oppervlak en het type warmteoverdracht. Het tweede proces, het transport van vocht in het product, is afhankelijk van het materiaal, de temperatuur en het vochtgehalte zelf. **3.3.2 Droger classificatie**

De droger kan geclassificeerd worden aan de hand van verschillende factoren. Het kan onder andere beschreven worden aan de hand van het type warmteoverdracht. Het is echter ook mogelijk de droger te classificeren naar zijn vorm of de tijd die nodig is om te drogen. In veel gevallen zullen ze elkaar overlappen.

Classificatie aan de hand van warmteoverdracht.

Het soort warmteoverdracht bepaald grotendeels de drogingtechniek. De twee belangrijkste mechanismen bij drogers zijn convectie en conductie. Een ander mechanisme wat in mindere mate wordt gebruikt is radiatie. Een voorbeeld hiervan is het verdampen van water in een magnetron. De radiogolven in een magnetron verwarmen de watermoleculen in een product, waardoor deze uit het product verdampen. Hieronder worden de twee belangrijkste mechanismen beschreven.

Bij convectie stroomt een stof over het product, waarmee warmte wordt toegediend en vocht wordt weggehaald. Een voorbeeld hiervan is het drogen van haar met een föhn. De warmte van de lucht verdampt hiermee het aanwezige vocht in het haar, daarnaast wordt het waterdamp hierbij afgevoerd door de luchtstroom.

Bij conductie vindt er warmtetransport plaats doormiddel van geleiding. Drogen met behulp van conductie vindt onder andere plaats bij het drogen van een handdoek op de radiator. Hierbij worden de watermoleculen in de handdoek verhit, deze moleculen verdampen hierbij en de handdoek wordt gedroogd.

Voorbeelden van industriële drogers en het soort product wat ze drogen staan in tabel 3.1. De drogers zijn hierbij geclassificeerd aan de hand van het type warmte overdracht. Hierbij zijn alleen conductie en convectie meegenomen, omdat deze het meest gebruikt worden.

Tabel 3.1 Industriële drogers en hun feedstock [5]

Nature of Feed	Liquids			Cakes		Solids				
	Solution	Slurry	Pastes	Centrifuge	Filter	Powder	Granule	Crystal	Pellet	Fiber
<i>Convection Dryers</i>										
Belt conveyer dryer							x	x	x	x
Flash dryer				x	x	x	x			x
Fluid bed dryer	x	x		x	x	x	x		x	
Rotary dryer				x	x	x	x		x	x
Spray dryer	x	x	x							
Tray dryer				x	x	x	x	x	x	x
<i>Conduction Dryers</i>										
Drum dryer	x	x	x							
Steam jacket rotary dryer				x	x	x	x		x	x
Steam tube rotary dryer				x	x	x	x		x	x
Tray dryer				x	x	x	x	x	x	x

Droogtijd

Bij de drogers verschillen de twee bovengenoemde processen, die optreden tijdens drogen. Deze verschillen bepalen uiteindelijk de tijd die nodig is om een product te drogen. De uiteindelijke droog tijd heeft weer invloed op de uiteindelijke grote van het droog proces. Hieronder zijn voor de verschillende industriële drogers de droogtijden weergegeven die normaal gesproken nodig zijn. Afhankelijk van het product wat gedroogd word, kan deze tijd nog verschillen.

Tabel 3.2 gemiddelde droogtijd van verschillende drogers [5].

Droger	0-10 (s)	10-30 (s)	5-10 (min)	10-60 (min)	1-6 (h)
<u>Convectie</u>					
Belt conveyor dryer				x	
Flash dryer	x				
Fluid bed dryer				x	
Rotary dryer				x	
Spray dryer		x			
Tray dryer				x	x
<u>Conductie</u>					
Drum dryer		x			
Steam jacket rotary dryer				x	
Steam tube rotary dryer				x	
Tray dryer				x	x

3.3.2 Temperatuur en druk

De meeste drogers werken bij lage druk, dus rond atmosferische druk. Als er geen lekkage van de omgeving naar het drogingmedium mag plaatsvinden dan wordt er gewerkt met een lichte overdruk. Indien het drogingmedium niet naar de omgeving mag lekken wordt er gewerkt met onderdruk. Vacuüm drogers bestaan ook, deze zijn alleen vaak zeer energie intensief en duur.

Vacuüm drogen wordt alleen aanbevolen, als het product niet aan hoge temperaturen mag worden blootgelegd en de kwaliteit van het eindproduct zeer hoog moet zijn. Een van de droger principes die gebruikt maakt van vacuüm condities zijn vriesdrogers. Door de druk dusdanig laag te maken bevriest het water, bij toevoeging van warmte zal het water direct verdampen. Deze manier van drogen kost relatief veel energie. Het vriesdrogen van koffie kost 3x zoveel energie als het drogen van koffie met een spray droger.

Over het algemeen geldt dat hoe hoger de temperatuur, hoe efficiënter de droger. Indien er gebruikt wordt van laag enthalpische restwarmte, zoals met zonnecollectoren zijn hoge temperaturen (>100°C) vaak niet mogelijk. Dit betekent dat de droger een groter oppervlakte nodig heeft, om dezelfde warmteoverdracht te realiseren.

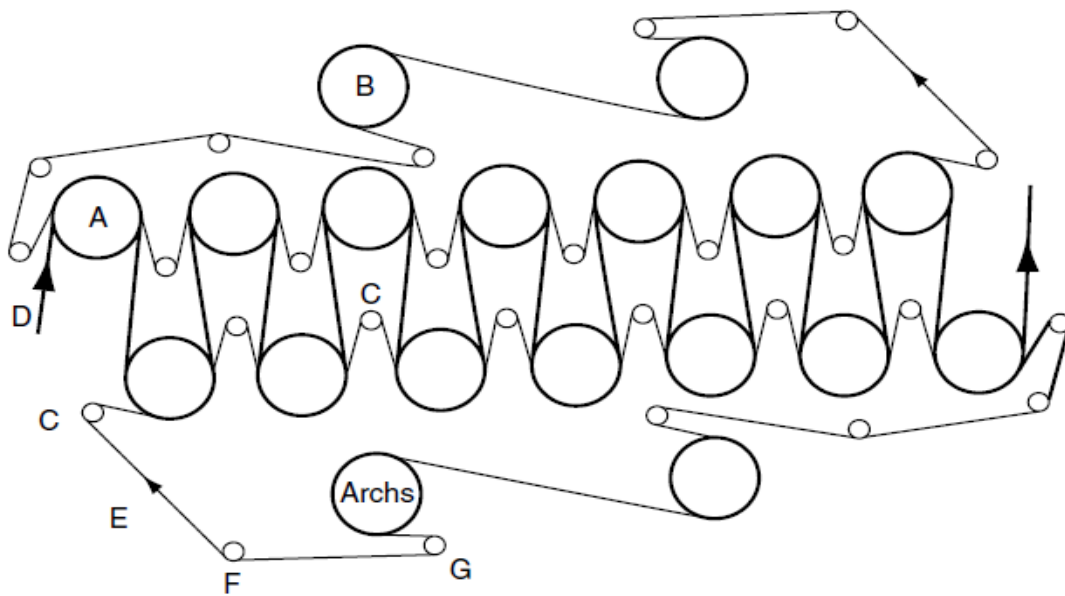
De druk bij drogen ligt tussen de 0,5 en 10 bar, uitgezonderd van vacuüm drogen waar de druk nog een stuk lager ligt. De temperaturen waarmee gedroogd wordt ligt tussen de 50-350 °C. Nog een reden waarom er bij atmosferische drukken wordt gewerkt is het feit, dat hoe hoger de druk van het product is, hoe slechter het vocht verdampt. Bij een hogere druk hebben de watermoleculen meer energie nodig om los te komen van het product,

3.3.3 Drogen met stoom.

Enkele van de eerder beschreven drogers gebruiken stoom als warmte dragend medium. Door te kijken naar waar stoom gebruikt wordt om te drogen, kan er doelgericht naar de juiste klanten gezocht worden. Hierbij dient er informatie verzameld te worden over de druk en temperatuur van de gebruikte stoom, om te zien of dit geproduceerd kan worden met ultradiepe geothermie.

Papier industrie

Papier wordt gemaakt van hout of van gerecycled papier. Hiertoe wordt er van het hout en het gerecyclede papier eerst pulp gemaakt. Deze pulp bestaat voor 99% uit water. Om uiteindelijk papier te krijgen, dient het vochtgehalte in het papier teruggebracht te worden tot 9%. Met vacuümtrekken en mechanische persen kan het vochtgehalte teruggebracht worden tot ongeveer 50%. De stap van 50% naar 9% gebeurt met thermische drogers. 90% van de gebruikte drogers in de papierindustrie zijn cilinder drogers, zie figuur 3.8.



Figuur 3.8 Drogen van papier. A= cilinder, B= viltroger C= vilt rollers, D= papier, E= vilt, F= vilt geleiders, G= vilt spanners.

Het papier wordt met behulp van vilt, over de cilinders geleid. In de cilinders wordt stoom gespoten, deze stoom condenseert, waarbij het warmte overdraagt aan de cilinderwand. Door geleiding trekt de warmte in het papier, waarmee het vocht in het papier verdampt. De gebruikelijke drukken waarmee in de papierindustrie gewerkt wordt liggen tussen de 3 en 10 bar. Hierbij kan er gekozen worden om met oververhitte stoom te werken, om condensatie in de leidingen te voorkomen.

Voedsel industrie

Vers voedsel bevat vaak een hoog vocht gehalte. Het vocht het product zorgt voor groei van bacteriën en schimmels, welke het voedsel bederven. Om het bederven tegen te gaan wordt voedsel op verschillende manieren geconserveerd. Dit kan gedaan worden door de aanwezige bacteriën en schimmels te doden, bijvoorbeeld het pasteuriseren van melk. Een andere manier is het verwijderen van het vocht in het product door te drogen, of door het in te zouten.

Voedsel producten drogen met stoom wordt al toegepast. De producten kunnen direct of indirect gedroogd worden met stoom. Indirect door middel van conductiedrogers en direct door middel van convectie drogers. Bij conductie drogers wordt er vaak gebruik gemaakt van verzadigd stoom. De condensatie warmte wordt dan gebruikt om het product op te warmen en het vocht er in te verdampen. Bij convectie drogers wordt er vaak gebruikt gemaakt van oververhit stoom. Dit heeft dan de voorkeur boven hete lucht, omdat de zuurstof in de hete lucht kan reageren met het voedsel.

Oververhit stoom dood bacillen, schimmels en bacteriën, daarom is het zeer geschikt om voedselwaren te drogen met oververhit stoom. De stoom heeft dan naast de functie van het drogen, ook een functie in de vorm van pasteuriseren, desinfecteren en/of steriliseren. Nog een voordeel van het drogen met oververhit stoom is dat de kleur van het voedsel en de vitamines behouden blijven. Bij sommige voedselwaren is de reactie met zuurstof juist wenselijk, deze producten zijn dan niet geschikt om te drogen met stoom.

Samengevat heeft het drogen van voedsel met oververhit stoom de volgende voordelen. Het is 50% efficiënter dan conventionele systemen. Er worden geen uitlaatgassen geproduceerd. Het voedsel oxideert niet. Naast het drogen worden aanwezige micro-organismen gedood waardoor het extra geconserveerd wordt. De kwaliteit van het voedsel blijft beter behouden.

De stoom waarmee gewerkt wordt ligt vaak op atmosferische drukken (1 tot 4 bar) en de temperaturen waarmee het voedsel gedroogd wordt zijn voor convectiedrogers tot 150 °C. Bij conductiedrogers wordt er gewerkt met temperaturen tot 300 °C. Deze temperaturen zijn niet haalbaar met ultradiepe geothermie.

Andere industrieën

Een industrie die ook gebruik maakt van drogen met stoom is de zoutwinningindustrie. Bij Akzo Nobel te Hengelo wordt oververhit stoom gebruikt om het opgepompte pekewater in te dampen. Na het indampen blijft het zout over. Hierbij wordt gewerkt met oververhit stoom van 4 bar en 175 °C. Deze stoom wordt geleverd door de afvalverbrandingcentrale Twence, ook gelegen in Hengelo. Een leiding van een paar kilometer transporteert hierbij het stoom van Twence naar Akzo, zie figuur 3.9.



Figuur 3.9 De stoomleiding die stoom transporteert van Twence naar Akzo Nobel.

Naast de hierboven beschreven industrieën zijn er nog meer processen, waar stoom gebruikt wordt of gebruikt kan worden om producten te drogen. Bij waterzuiveringen kan het overgebleven slib worden ingedampt, bij kolencentrales kan het aanwezige vocht in kolen verdampt worden. Bij al deze processen zou geothermisch geproduceerd stoom gebruikt kunnen worden

3.4 Proces parameters

Om het model te kunnen gebruiken om geschikte concepten te ontwerpen, zijn de hierboven genoemde processen samengevat in tabel 3.3. In deze tabel worden de belangrijkste eigenschappen van de stoom genoemd. Naast algemene processen, is er ook nog gekeken naar 2 specifieke gevallen. De stoom die gebruikt wordt bij papierfabriek Norske Skog Parenco te Renkum en die gebruikt wordt bij Akzo Nobel te Hengelo.

Tabel 3.3 Overzicht van processen met bijbehorende druk en temperatuur.

Proces	Druk (Bar)	Temperatuur (°C)	Type Stoom
Drogen van Voedsel	1-4	100 – 150	Oververhit
Drogen van Veen	1 - 5	100 – 180	Oververhit/verzadigd
Drogen van zaaghout[5]	0.1 - 0.4	50 – 90	Oververhit
Drogen van kolen	1 - 4	130 – 150	Oververhit
Drogen van pekelwater	4 - 6	150 – 190	Oververhit
Papier drogen	4 - 10	150 – 180	Oververhit/verzadigd
Slib drogen	4 - 10	150 – 250	Oververhit
Parenco (papiermaken)	3.8	160	Oververhit
Akzo Nobel (indampen zout)	4	180	Oververhit

4. Theorie

Dit hoofdstuk behandelt de theorie achter de apparatuur die nodig is om stoom te produceren met behulp van geothermie. Het hoofdstuk is vooral geschikt voor mensen met weinig tot geen thermodynamische kennis. Er is geprobeerd om alles zo simpel mogelijk te houden, om het voor zoveel mogelijk mensen leesbaar te houden. Enige wiskundige voorkennis is wel vereist. De werktuigen die in dit hoofdstuk behandeld worden zijn: warmtewisselaars, boilers, compressoren en pompen. De vermogens en dimensies van deze werktuigen dienen bepaald te worden, om schattingen te kunnen maken voor de kosten en om te zien of de concepten daadwerkelijk mogelijk zijn.

4.1 Warmte wisselaars

Om stoom te produceren is warmte nodig. Het water moet eerst aan de kook worden gebracht voordat het kan verdampen. De temperatuur waarbij water begint te koken is afhankelijk van de druk. Op extreem lage drukken na, is het niet mogelijk om water te koken bij kamer temperatuur. Daarom dient het water eerst voorverwarmd te worden. Dit gebeurt door middel van een warmte wisselaar.

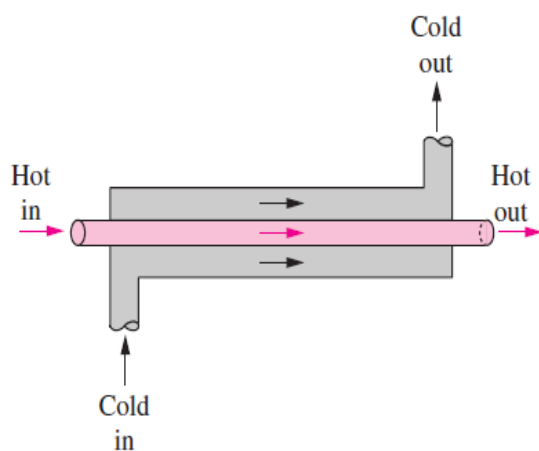
Een warmtewisselaar is een werktuig dat warmte overdracht tussen twee vloeistoffen toelaat zonder dat deze gemengd hoeven te worden. Er zijn verschillende soorten warmte wisselaars. In dit deel worden de meest voorkomende warmte wisselaars behandeld. Daarnaast wordt er ook gekeken naar de thermodynamica achter de warmte wisselaar. Als laatste wordt er gekeken naar welk type warmte wisselaar het meest geschikt is voor het maken van stoom.

4.1.1 Type warmtewisselaars

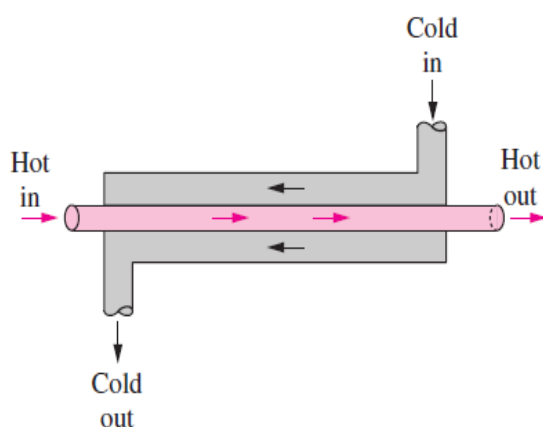
Dubbele pijp warmtewisselaar

De simpelste warmte wisselaar is een dubbele pijp warmte wisselaar. Deze warmte wisselaar bestaat uit 2 buizen van verschillende diameters, die in elkaar zijn geplaatst. Door de binnenste buis stroomt 'heet' water en door de andere stroomt 'koud' water. Bij dit type warmte wisselaar zijn er 2 soorten stromingen mogelijk.

De vloeistoffen kunnen parallel stromen, waarbij de warmte en koude vloeistof aan dezelfde kant de wisselaar binnenkomen. De andere mogelijkheid is de counterstroom. Bij de counterstroom wisselaar stromen de vloeistoffen in tegengestelde richting van elkaar. Een voorbeeld van een parallel en counterstroom systeem is te zien in figuur 4.1.

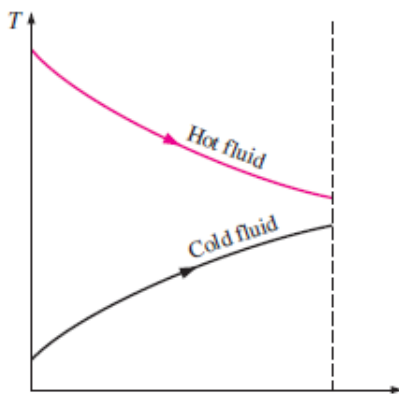


Figuur 4.3a Parallelle stroom [6]

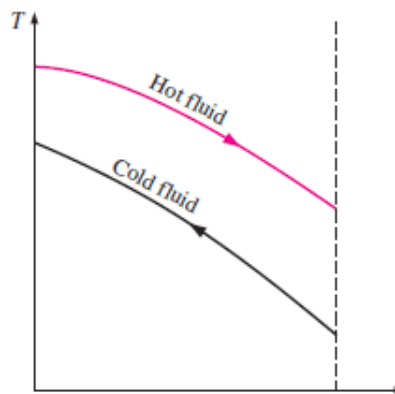


Figuur 4.1b Counter stroom [6]

Het verschil tussen beide stromingen is het temperatuursbereik. Warmte overdracht kan alleen plaatsvinden van warm naar koud. Dit betekent dat de temperatuur van de warme stroming over het hele bereik warmer moet zijn dan de koude stroming. Bij een parallelle stroming krijgen beide stromingen na verloop van tijd dezelfde temperatuur hebben. Bij een counterstroming is dit niet het geval, zie figuur 4.2 voor een grafische weergave. Bij een counterstroom is het dus mogelijk om met de koude vloeistof een hogere temperatuur te bereiken dan met de parallelle stroming.



Figuur 4.4a Parallelle stroom [6]



Figuur 4.2b Counterstroom [6]

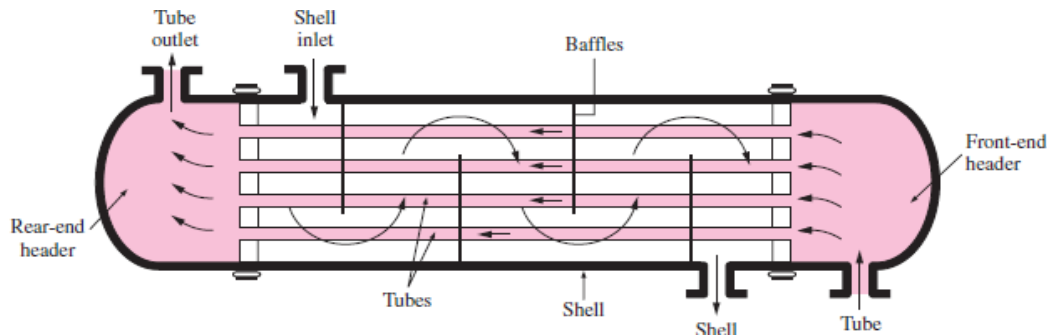
Compacte warmtewisselaar

Een voor het algemene publiek bekende warmtewisselaar is de compacte warmtewisselaar. Deze worden zo gebouwd dat in een zo klein mogelijk volume een zo groot mogelijke warmte overdracht plaats vindt. De wisselaar werkt vaak met twee gassen of met een gas en een vloeistof. Een bekend voorbeeld van deze warmtewisselaar is de radiator die in je woonkamer staat of in je auto te vinden is. Een compacte warmtewisselaar is echter niet geschikt voor overdracht tussen 2 vloeistoffen.

Shell and tube warmtewisselaar

Een van de meest voorkomende industriële warmtewisselaar is de 'shell en tube' warmtewisselaar, zie figuur 4.3. Een Shell en tube warmtewisselaar is opgebouwd uit een groot aantal buizen met daarom heen de schulp. Warmte overdracht vindt plaats doordat een vloeistof door de buizen stroomt en de andere vloeistof om in de schulp om de buizen heen stroomt. Het is mogelijk om de buizen aan elkaar te koppelen, zodat de vloeistof meerdere malen door de schulp heen stroomt. Hierdoor is niet alleen in een kleine ruimte een grote warmte overdracht mogelijk, maar kan de snelheid in de buizen ook nog geregeld worden.

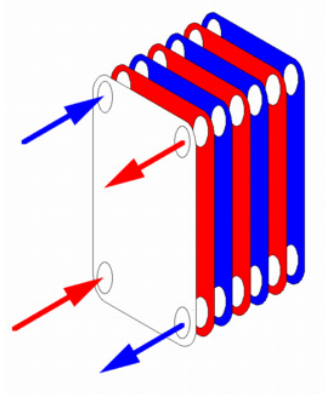
Om de warmte overdracht te verbeteren, kan er gekozen worden om schotten te plaatsen in de schulp. Hierdoor zullen de vloeistoffen haaks op elkaar gaan stromen, met een verbeterd temperatuursbereik als gevolg. De schotten dienen ook als steunpunten voor de buizen. De warmte wisselaar wordt geclassificeerd aan de hand van het aantal passages door de buizen en door de schulp. Doordat de warmte wisselaars relatief groot zijn, zijn ze niet geschikt in mobiele systemen.



Figuur 4.3 Een Shell en tube warmtewisselaar[6].

Platenwarmtewisselaar

Een warmtewisselaar die ook zeer interessant is, is de platenwarmtewisselaar. Deze bestaat uit een stapeling van dunne geribbelde platen waartussen de warme en koude vloeistof stroomt. De platen worden bij elkaar gehouden met een frame waartussen vaak elastische materialen verwerkt zijn. Het principe van een platen warmte wisselaar wordt weergegeven in figuur 4.4. Door de hoge turbulente stroming in de wisselaar is er een optimale warmteoverdracht. De platenwarmtewisselaar kan ook gebruikt worden om te verdampen en condenseren.



Figuur 4.4 Platenwarmtewisselaar rood = warme stroom, blauw = koude stroom.

Normaal gesproken wordt een platenwarmtewisselaar gescheiden door elastische pakkingen. Deze hebben echter als nadeel dat er niet met hoge drukken en temperaturen gewerkt. Als variant op de elastische pakkingen is het ook mogelijk om de platen aan elkaar te lassen. Het grote voordeel van gelaste pakkingen is dat er met hogere temperaturen en drukken gewerkt kan worden, ook kan er gewerkt worden met agressieve stoffen. De gelaste variant heeft alleen als nadeel dat de wisselaar niet geopend kan worden voor revisie. Bij eventuele schade dient de warmtewisselaar geheel of gedeeltelijk vervangen te worden.

4.1.2 Warmte balans

Om het hele verhaal simpel te houden wordt er alleen gekeken naar dubbele pijp warmte wisselaar. De vloeistoffen in deze wisselaar stromen in tegengestelde richting (counterstroom). De eerste hoofdwet van de thermodynamica stelt dat energie niet zomaar kan ontstaan of verdwijnen. De 2^e wet van de thermodynamica stelt dat warmtetransport alleen kan plaatsvinden van warm naar koud. Er vindt dus alleen warmtetransport plaats als er sprake is van een temperatuur verschil. De hoeveelheid warmte die wordt overgedragen door de vloeistoffen wordt bepaald met:

$$Q = \dot{m} * c_p * (T_b - T_e) \quad [\text{J/s}] \quad [4.1]$$

$$\dot{m} = \text{massa stroom } (\frac{kg}{s})$$

$$T_b = \text{Begin Temperatuur (K)}$$

$$T_e = \text{Eind Temperatuur (K)}$$

$$cp = \text{warmte capaciteit } (\frac{J}{kgK})$$

Doordat er geen energie spontaan kan ontstaan of verdwijnen, kan er een balans worden opgesteld tussen de warme en koude stroom.

$$\dot{m}_1 * cp * (T_{h1} - T_{h2}) = \dot{m}_2 * cp * (T_{c2} - T_{c1}) \quad [4.2]$$

$$\dot{m}_1 = \text{massa stroom warme stroom} \quad (\text{kg/s})$$

$$\dot{m}_2 = \text{massa stroom koude stroom} \quad (\text{kg/s})$$

$$T_{h1} = \text{inlaat temperatuur warme stroom} \quad (\text{K})$$

$$T_{h2} = \text{uitlaat temperatuur warme stroom} \quad (\text{K})$$

$$T_{c1} = \text{inlaat temperatuur koude stroom} \quad (\text{K})$$

$$T_{c2} = \text{uitlaat temperatuur koude stroom} \quad (\text{K})$$

Oppervlakte

Met behulp van [4.1] en [4.2] kan de hoeveelheid warmte en de temperatuur val bepaald worden. Deze waarden zijn zeer belangrijk voor een leverancier van warmtewisselaars. Met de temperaturen, massastromen en de hoeveelheid overgedragen warmte kan deze namelijk de grootte en prijs van de warmtewisselaar bepalen.

Het is ook mogelijk om zelf een schatting te kunnen maken van de grootte en prijs van een warmte wisselaar. De grootte van een dubbele buis warmte wisselaar wordt bepaald door de hoeveelheid oppervlak, die nodig is om de warmte daadwerkelijk over te brengen. Het oppervlakte van een warmtewisselaar kan bepaald worden met [4.3].

$$A = \frac{Q}{U * \Delta T_{lm}} \quad [4.3]$$

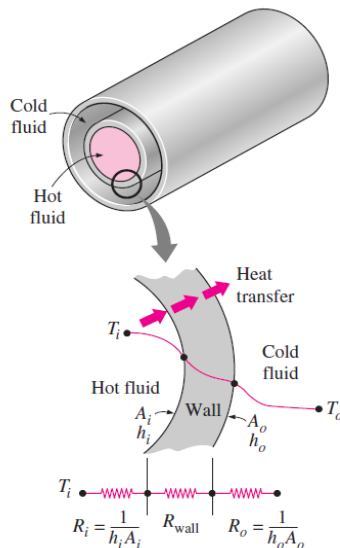
$$U = \text{Algehele warmteoverdracht coefficient } (\frac{W}{m^2K})$$

$$Ft = \text{temperatuurs correctie factor } (-)$$

$$T_{lm} = \text{logaritmische gemiddelde temperatuur (K)}$$

Algehele warmteoverdracht coëfficiënt

Bij de dubbele buis warmtewisselaar stromen twee vloeistoffen in tegengestelde richting van elkaar, welke gescheiden worden door een wand. Deze wand verhindert directe warmte overdracht tussen de vloeistoffen. Hoe het warmte transport wel plaatsvindt, wordt hieronder beschreven, figuur 4.5 dient hierbij ter verduidelijking.



Figuur 4.5 Warmte weerstanden bij een dubbele buis warmtewisselaar.

Convectie

Als eerste vindt er warmte overdracht van de warme stromende vloeistof naar de wand plaats, door middel van convectie. De mate waarin de convectieve warmte overdracht plaatsvindt, wordt beschreven met de convectieve warmte overdracht coëfficiënt, h ($\text{W/m}^2\text{K}$). Deze waarde is afhankelijk van de soort vloeistof, de geometrie en de snelheid waarmee de vloeistof stroomt. De waardes voor stoom en water, bij turbulente buisstroming, zijn hieronder weergegeven.

Water: $h = 5000 - 8000 \text{ W/m}^2\text{K}$

Stoom: $h = 8000 - 12000 \text{ W/m}^2\text{K}$

De convectieve warmte overdracht coëfficiënt kan ook nauwkeuriger worden bepaald met:

$$h = 0.023 * \frac{k}{D} * \left(\frac{4\dot{m}}{\pi D \mu}\right)^{0.8} * \left(\frac{\mu * C_p}{k}\right)^n \quad [4.4]$$

k = warmtegeleidingcoëfficiënt (zie tabel 4.1)

D = Diameter van de binnen buis voor stroming in de binnen buis, en het verschil diameter van de binnenbuis en de buitenbuis bij stroming in de buitenbuis.

μ = viscositeit van de vloeistof (zie tabel 4.3, of een boek met vloeistof eigenschappen)

n = coëfficiënt $n = 0.4$ voor verwarmen en $n = 0.3$ voor afkoelen

Conductie

In de wand zelf vindt er warmte transport plaats door middel van geleiding, ook wel conductieve warmte overdracht genoemd. De conductieve warmte overdracht is onder andere afhankelijk van het type materiaal, en wordt beschreven met een waarde voor de thermische conductiviteit. Over het algemeen zijn metalen goede geleiders van warmte, daarentegen zijn hout, plastic/rubber en lucht slechte geleiders, zie tabel 4.1. Daarom worden metalen gebruikt om warmte te geleiden, en plastic en lucht om te isoleren. De conductieve warmte overdracht is ook afhankelijk van de dikte van het materiaal. Hoe dikker het materiaal, hoe slechter de overdracht.

Tabel 4.1 Thermische conductiviteit voor verschillende materialen.

Materiaal	Thermal Conductivity (W/m*K) bij 20°C
Koper	390
Aluminium	237
Ijzer	79
Staal	50
RVS	20
Glas	0.8-0.9
Hout	0,1-0,5
Beton	0,2-20
Polyetheen (PE)	0.23-0.29
Water (l)	0.60
Lucht	0.024
Water (g)	0.016

Als laatste vind er weer convectieve warmte overdracht plaats, dit keer tussen de wand en de koude vloeistof. De hierboven beschreven waarden blijven hierbij van toepassing. Ten slotte kan de algehele warmte overdrachtscoëfficiënt beschreven worden met [4.5].

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_o} + \frac{\ln\left(\frac{D_o}{D_i}\right)}{2\pi k} + R} \quad [4.5]$$

h_i = warmte overdrachts coefficient vloeistof binnenbuis [W/m²K]

h_o = warmte overdrachts coefficient vloeistof buitenbuis [W/m²K]

d_o = buiten diameter binnenbuis [m]

d_i = binnen diameter binnenbuis [m]

k = conductiviteit buis [$\frac{W}{mK}$]

R = weerstandsfactor [$\frac{mK}{W}$]

Weerstandsfactor

Aan formule [4.5] valt op dat er een waarde voor de mate van bevuilding is toegevoegd. Een warmte wisselaar wordt namelijk in verloop van tijd bevuild door de vloeistoffen die door de wisselaar stromen. Deze bevuilding heeft een negatieve invloed op de algehele warmte overdracht coëfficiënt. De mate van vervuilding is materiaal afhankelijk en enkele waarden zijn te vinden in tabel 4.2.

Tabel 4.2 Bevuilingsfactor verschillende vloeistoffen

Vloeistof / gas	Coefficient W/m²K	Weerstandsfactor m²K/W
Rivier water	3000 – 12000	0.0003 - 0.0001
Zee water	1000 – 3000	0.001 - 0.0003
Process water	3000 – 6000	0.0003 - 0.00017
Stoom	4000 – 10000	0.00025 – 0.0001
Zout oplossingen	3000 – 5000	0.0003 – 0.0002
Koelvloeistoffen	5000	0.0002

Logaritmische gemiddelde temperatuur.

De laatste waarde die nodig is om de oppervlakte van de buis te bepalen is de logaritmische gemiddelde temperatuur:

$$\Delta T_{lm} = \frac{(T_{h1}-T_{c2})-(T_{h2}-T_{c1})}{\ln\left(\frac{T_{h1}-T_{c2}}{T_{h2}-T_{c1}}\right)} \quad [4.6]$$

Tabel 4.3 Eigenschappen van water en stoom bij verschillende temperaturen en drukken.

Vloeistof / gas	Dichtheid (kg/m ³)	Viscositeit (μ) [10 ⁻⁶ Pa*s]	Cp (kJ/kg)
Water (20 °C) (1 Bar)	998	1001	4.18
Water (80 °C) (1 Bar)	972	354	4.19
Water (140 °C) (10 Bar)	926	196	4.28
Water (200 °C) (20 Bar)	865	135	4.49
Water (260 °C) (100 Bar)	790	103	4.90
Stoom (100 °C) (1 Bar)	0.59	12.3	2.07
Stoom (150 °C) (4 Bar)	2.12	14.01	2.27
Stoom (200 °C) (10 Bar)	4.85	15.9	2.43
Stoom (250 °C) (20 Bar)	8.97	17.9	2.56

4.1.3 Selectie van de warmte wisselaar

In de secties hierboven zijn een aantal warmte wisselaars besproken en is gekeken hoe bepaalde waarden berekend kunnen worden. Bij de berekeningen voor een warmtewisselaar, is alleen gekeken naar een dubbele buis warmtewisselaar. De formules voor andere warmtewisselaars verschillen echter bijna niet. Dus nu alle benodigde waarden bepaald zijn, kan er begonnen worden met het selecteren van de meest geschikte warmte wisselaar.

Bij dit project zal dat gaan tussen de platenwarmtewisselaar en de tube and shell warmtewisselaar. Beide zijn zeer geschikt om in een relatief klein volume een groot overdracht oppervlakte te creëren. De keus tussen beide warmtewisselaars zal dan gemaakt dienen te worden, door te selecteren op andere eigenschappen, zoals prijs, onderhoud en drukbestendigheid.

Om een goede vergelijking te maken tussen de twee wisselaars, wordt er gebruik gemaakt van een voorbeeld:

Voorbeeld 4.1)

Gevraagd: Bij een kleine papier fabriek is er behoefte aan 36 ton/h heet water met een druk van 10 bar en een temperatuur van 140 °C . Het hete water wordt gebruikt om papierpulp te maken. Om het water te wordt gekeken of het mogelijk is om een geothermische bron te gebruiken. Deze moet het water opwarmen van 10°C naar 140°C Op een diepte van 5 kilometer bevindt zich een waterhoudende laag, die in staat is om 360 ton/h water te produceren. Het water komt uit de bron met een druk van 100 bar en een temperatuur van 160 °C. Het water bevat echter wel wat olie en zwavel resten.

Bereken:

- a:** de dimensies voor een platenwarmtewisselaar en een shell&tube warmtewisselaar.
- b:** Maak een schatting voor de prijs van beide wisselaars.
- c:** Weerleg de voor en nadelen van beide wisselaars en kies aan de hand hiervan de meest geschikte warmtewisselaar

Oplossing:

a) Als eerste wordt alle benodigde data verzameld en geplaatst in een tabel:

Tabel 4.4 Eigenschappen voorbeeld 4.1

Eigenschap	Proces Water	Thermische Bron
Massa stroom (kg/s)	10	100
Begin Temperatuur (K)	283	433
Eind Temperatuur (K)	413	Onbekend
Druk (Bar)	10	100
Cp (J/kg)	4200	4000 ivm olie en zwavel
Weerstandsfactor	0.0001	0.0003
Warmte overdracht coëfficiënt	5000	5000

Met deze gegevens kan het benodigde thermische vermogen bepaald worden m.b.v. [4.1].

$$Q = \dot{m} * cp * (T_b - T_e) = 10 * 4200 * (413 - 283) = 5.6 \text{ MW}$$

Daarna kan er een warmtebalans [4.2] worden opgesteld om de eind temperatuur van de geothermische bron te bepalen. Hierbij wordt er gekeken in beide wisselaars naar een counterstroom.

$$\begin{aligned} \dot{m}_1 * cp * (T_{h1} - T_{h2}) &= \dot{m}_2 * cp * (T_{c2} - T_{c1}) \\ 100 * 4000 * (433 - T_{h2}) &= 5.6 \text{ MW} \\ T_{h2} &= 419 \text{ K} \end{aligned}$$

Vervolgens moet de logaritmische gemiddelde temperatuur en de algehele warmte overdracht coëfficiënt bepaald worden. De logaritmische gemiddelde temperatuur [4.6] is:

$$\Delta T_{lm} = \frac{(T_{h1} - T_{c2}) - (T_{h2} - T_{c1})}{\ln\left(\frac{T_{h1} - T_{c2}}{T_{h2} - T_{c1}}\right)} = \frac{(433 - 413) - (419 - 283)}{\ln\left(\frac{433 - 413}{419 - 283}\right)} = 60.4 \text{ K}$$

De algehele warmte overdracht coëfficiënt van een platenwisselaar kan berekend worden met [4.7]. Voor de shell&tube warmte wisselaar kan [4.5] gebruikt worden. Er wordt kozen voor een RVS buis met een binnendiameter van 48mm en een dikte van 3mm. De RVS platen, voor de platenwarmtewisselaar, hebben ook een dikte van 3 mm om de hoge drukken op te kunnen vangen.

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_o} + \frac{t}{k} + R} \quad [4.7]$$

$t = \text{dikte van plaat (m)}$

De algehele warmte overdracht coëfficiënt van beide warmtewisselaars zijn:

$$\text{Plaat: } U = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_o} + \frac{t}{k} + R} = \frac{1}{\frac{1}{5000} + \frac{1}{5000} + \frac{0.003}{20} + 0.0003} = 1176 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$\text{Buis: } U = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_o} + \frac{\ln\left(\frac{D_o}{D_i}\right)}{2\pi k} + R} = 1 / \left(\frac{1}{5000} + \frac{1}{5000} + \frac{\ln\left(\frac{0.054}{0.048}\right)}{2\pi k} + 0.0003 \right) = 610 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Als laatste kan nu het benodigde oppervlakte berekend worden voor beide warmtewisselaars:

$$\text{Plaat: } A = Q/U \cdot \Delta T_{lm} = 5.6 \cdot 10^6 / 60.4 / 1176 = 78 \text{ m}^2$$

$$\text{Buis: } A = Q/U \cdot \Delta T_{lm} = 5.6 \cdot 10^6 / 60.4 / 610 = 152 \text{ m}^2$$

b) Schatting van de prijs.

De prijs van een RVS plaat is geschat op €10,- per kg*. Bij de "shell&tube" warmtewisselaar wordt gewerkt met buizen van 50mm, de prijs voor deze buizen ligt op €50,-/m*. Met deze gegevens kan de prijs voor het benodigde materiaal geschat worden:

$$\text{Plaatwarmtewisselaar: } t \cdot A \cdot p \cdot €10,- = 0.003 \cdot 78 \cdot 7800 \cdot 10 = €18250,-$$

$$\text{Shell\&Tube: } A/(\pi D) \cdot €50,- = 152/(3.14 \cdot 0.054) \cdot €50,- = €44800,-$$

Dit is slechts een schatting van de materiaal kosten. Om tot een schatting voor de totale prijs te komen wordt de materiaal prijs vermenigvuldigd met een factor 2.

c) Keuze meest geschikte warmtewisselaar.

Kijkend naar de kosten, grootte en gewicht heeft de platenwarmtewisselaar duidelijk de voorkeur boven de shell&tube warmtewisselaar. Het probleem met de platenwisselaar is het feit dat deze gelast dient te worden, om de grote drukken aan te kunnen. Hierdoor is onderhoud aan de wisselaar bijna niet mogelijk. Beschadiging of verstopping van een wisselaar zal dus bijna altijd vervanging betekenen.

Verstopping en vervuiling hebben bij een platenwarmtewisselaar ook een groter effect dan bij een shell&tube warmtewisselaar. Dit betekent dat de prestaties na verloop van tijd sterker verminderen en er dus een grotere en duurdere warmtewisselaar nodig is. Onderhoud aan de shell&tube warmtewisselaar is relatief eenvoudig.

De uiteindelijke keuze voor warmtewisselaar zal dus afhangen van de levensduur die de fabrikant kan garanderen. Als deze bij de platenwarmtewisselaar dusdanig korter is, zal het economisch aantrekkelijker zijn om een shell&tube warmtewisselaar aan te schaffen.

4.2 Boilers

Om stoom te kunnen maken moet het water verdampt worden. Dit kan op twee manieren, met een reboiler en met een verdamper. Bij een reboiler wordt slechts een deel van de vloeistof verdampt. De damp en vloeistof wordt daarna gescheiden in een destillatie kolom. In een verdamper wordt al het vloeistof direct verdampt.

Reboilers

Er zijn een groot aantal soorten reboilers, het heeft alleen geen zin om deze allemaal te benoemen, aangezien de meesten op het principe van een Shell&Tube warmtewisselaar berusten. Dit hoofdstuk behandelt vooral de theorie die nodig is om het benodigde thermische vermogen en het bijbehorende oppervlakte te berekenen. En die theorie is voor alle reboilers zo goed als gelijk.

Thermisch vermogen Boiler

Het thermische vermogen hangt af van de hoeveelheid te verdampen water en de energie die nodig is om 1 kilo te verdampen bij een gegeven druk. De verdampingstemperatuur en de bij behorende verdampingswarmte hangen af van de druk, zie tabel 4.5. Met deze waarden kan het thermische vermogen berekend worden met [4.8].

$$Q = \dot{m}_2 * \Delta H_e \quad (\text{kW}) \quad [4.8]$$

$$\dot{m} = \text{massa stroom} \left(\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right)$$

$$\Delta H_e = \text{verdampings warmte} \left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right)$$

Tabel 4.5 Kookpunten bij verschillende drukken en de bijbehorende enthalpie waardes.

Druk (Bar)	Temperatuur (°C)	Verdampingswarmte (kJ/kg)	Enthalpy (kJ/kg)	water	Enthalpy (kJ/kg)	stoom
1	100	2258	419		2675	
2	120	2202	503		2706	
5	150	2108	676		2748	
10	180	2014	763		2777	

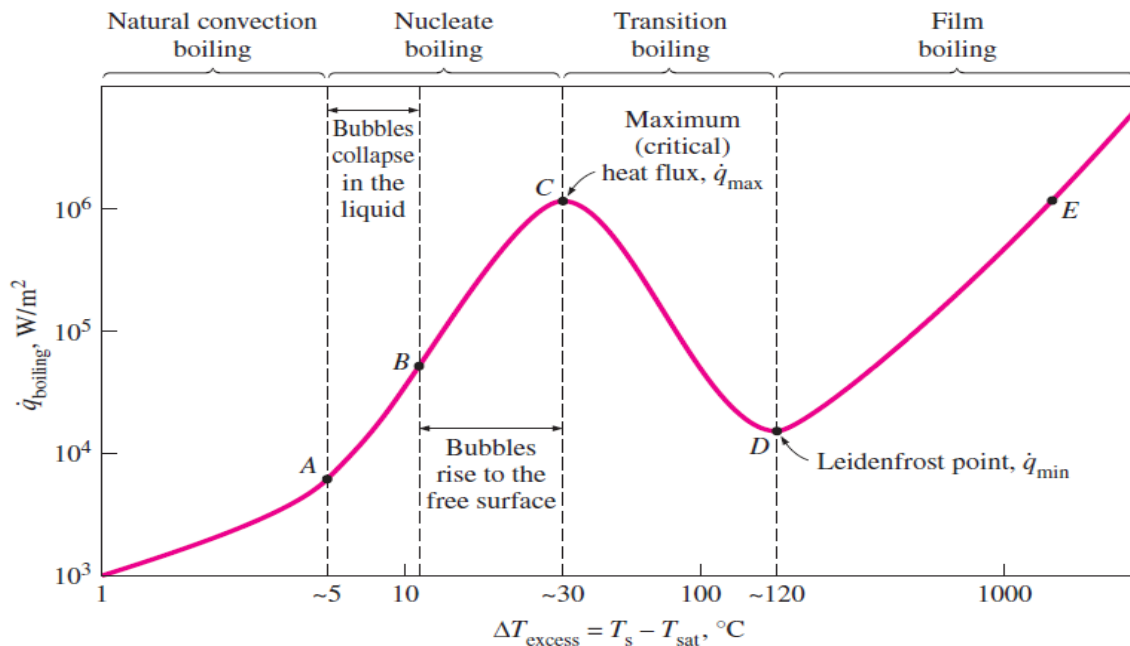
Om de eind temperatuur van de geothermische bron te bepalen is weer een energie balans nodig:

$$\dot{m}_1 * c_p * (T_{hi} - T_{ho}) = - \dot{m}_2 * \Delta H_e \quad [4.9]$$

Verdampingsmechanismen

Met de energie balans kan bepaald worden hoeveel stoom er theoretisch geproduceerd kan worden met de geothermische bron. Het uitwisselen van warmte en daarmee het produceren van stoom stopt zodra de temperatuur van de bron gelijk is aan het kookpunt van het water. Het oppervlakte van de

Het is in praktijk echter niet mogelijk om het volledige temperatuursbereik te gebruiken om stoom te gebruiken. Indien het temperatuursverschil zeer klein wordt (<2 °C), zal de heatflux sterk zakken, zie figuur 4.6. Hierdoor zal een zeer groot oppervlak nodig zijn om het laatste stukje temperatuursverschil te kunnen gebruiken.



Figuur 4.6 Boiling curve voor water bij 1 bar[9].

Een constant temperatuursverschil kan redelijk eenvoudig gerealiseerd worden door het water te verdampen met stoom op een hogere druk. Om bijvoorbeeld stoom op 1 bar en 100 °C te produceren, kan er voor gekozen worden om het water uit de geothermische bron te flashen bij 3 bar en 134 °C. Flashen is het zeer snel laten expanderen van een vloeistof op hoge druk en hoge temperatuur. Hierbij daalt de temperatuur en druk, waarbij een deel van de vloeistof verdampt. De hoeveelheid vloeistof die verdampt kan bepaald worden met [4.10]

$$\dot{m}_s = \dot{m}_w * c_p * (T_{\text{bron}} - T_e) / \Delta H_e \quad (\text{kg/s}) \quad [4.10]$$

$\dot{m}_s$ = massa stroom stoom (kg/s)
 $\dot{m}_w$ = massa stroom water uit de bron (kg/s)
 c_p = Soortelijke warmte (J/kgK)
 T_e = kook punt bij gekozen druk (150°C bij 5 bar) (K)

4.3 Comprimeren van gassen.

4.3.1 Introductie

Als de temperatuur en massastroom van de geothermische bron, het niet toelaat om de gewenste stoom te maken, dan zijn er extra middelen nodig. Een van de mogelijkheden is het gebruik van een compressor. Er zijn veel verschillende soorten compressoren. Het is alleen niet nodig om deze allemaal te beschrijven, aangezien dat niet het doel van dit onderzoek is. Een korte introductie, in de thermodynamica achter een compressor, zal al voldoende zijn. Ten eerste om het gewenste vermogen te berekenen en daarmee ook de investering en exploitatie kosten.

In feite zijn er 3 compressie stappen mogelijk. Deze 3 zijn: adiabatische compressie, isothermische compressie en een vorm die daar tussenin zit. Bij adiabatische compressie, is er geen overdracht van warmte in het gas. Berekeningen verder in dit hoofdstuk zullen aantonen dat de temperatuur bij adiabatische compressie exponentieel stijgt naar het verschil in druk. De temperatuur kan hierbij dusdanig oplopen dat er thermische stressen kunnen ontstaan, die schadelijk zijn voor de compressor.

Om de thermische stressen tegen te gaan zijn koelers nodig. Bij een super gekoelde compressor verandert de temperatuur niet. Dit is het volgende type van compressie, namelijk isothermische compressie. Doordat de temperatuur van het gecomprimeerde medium niet stijgt, kan het zijn dat het gas condenseert in een vloeistof. Dit omdat de temperatuur bij de gewenste einddruk onder het kookpunt kan komen te liggen.

De stoom zal dus eerst op de gewenste eindtemperatuur gebracht dienen te worden, voordat de druk verhoogd kan worden. Bij relatief lage geothermische temperaturen betekent dit naverwarmen met fossiele brandstoffen.

De laatste vorm van compressie is adiabatisch comprimeren in meerdere stappen, met tussen koelers. Door het gas in meerdere stappen te comprimeren en tussentijds te koelen, zal de uiteindelijke eindtemperatuur lager zijn dan 1 stap compressie. In feite is een isothermische compressie een compressor met oneindig aantal stappen en koelers. Daardoor is dit in de praktijk ook niet haalbaar. Ook volledig adiabatische compressie is niet haalbaar, omdat er altijd wel warmteverliezen optreden.

4.3.2 Adiabatische compressie

Eerste hoofdwet van de thermodynamica

Zoals boven al vermeld is, treedt er bij adiabatische compressie geen warmte verlies op. Om het vermogen, en dus de grootte van de compressor te bepalen, zijn de eerste en tweede hoofdwet van de thermodynamica nodig. De eerste wet van thermodynamica stelt dat energie niet gecreëerd of vernietigd, het kan echter wel veranderen van vorm. Het is aanwezig in de vorm van warmte en arbeid. De eerste hoofdwet is als volgt gedefinieerd:

$$dU = dQ - dW_t \quad [4.11]$$

Als er een verandering optreedt in de energie van een systeem kan dit worden beschreven met:

$$dE = dU + dPE + dKE \quad [4.12]$$

dU = Verandering in de inwendige energie van het systeem (J/kg)
 dPE = Verandering in de potentiële energie van het systeem (J/kg)
 dKE = Verandering in de kinetische energie van het systeem (J/kg)

Als er gekeken wordt naar de specifieke energie, dan kan [4.2] herschreven worden tot:

$$e = u + V^2/2 + zg \quad [4.13]$$

V = snelheid (m/s)
 g = gravitatie constante (m/s²)
 z = hoogte (m)

De arbeid term dW_t kan uitgeschreven worden in een term voor de mechanische arbeid en een term voor de volumetrische arbeid.

$$dW_t = dW + d(pv) \quad [4.14]$$

p = de druk van het systeem (N/m²)
 v = soortelijk volume van het systeem (m³/kg)

Nu kunnen [4.13] en [4.14] ingevuld worden in [4.11].

$$u_1 + P_1 v_1 + V_1^2/2 + g^* z_1 + Q = u_2 + P_2 v_2 + V_2^2/2 + g^* z_2 + W$$

[4.15]

Formule [4.15] herschreven worden door de term enthalpie te introduceren. Enthalpie is een grootheid die een verband legt tussen de interne energie en arbeid verricht door een druk en/of volume verandering.

Enthalpie is gedefinieerd als:

$$h = u + Pv \quad (\text{J/kg}) \quad [4.16]$$

Dit invullen in [4.5] levert:

$$h_1 + V_1^2/2 + g^* z_1 + Qh = h_2 + V_2^2/2 + g^* z_2 + W \quad [4.17]$$

Dit is de algemene formule voor de energetische toestand in een steady flow proces.

Er is al verondersteld dat er geen warmte overdracht is tijdens een adiabatisch proces. Als er ook nog eens wordt verondersteld dat de kinetische en potentiële energie niet veranderen, dan is te zien dat de arbeid verricht op een gas gelijk is aan de verandering in de enthalpie.

$$h_2 - h_1 = -W$$

Tweede hoofdwet van de thermodynamica

Nu de algemene formule bekend is, wordt er gekeken naar de 2^e hoofdwet van de thermodynamica. Deze wet beschrijft dat er geen spontane warmte overdracht kan plaatsvinden, van koud naar warm. De differentiaal vorm van de 2^e hoofdwet is geformuleerd als:

$$dS = \frac{dQ}{T} \quad (\text{J/kgK}) \quad [4.18]$$

Vervolgens wordt er verondersteld dat de arbeid, verricht op het gas, veroorzaakt wordt door een druk die op een bepaald oppervlakte werkt. De totaal verrichte hoeveelheid arbeid wordt dan geformuleerd door:

$$dW_t = -PdV \quad [4.19]$$

Wederom wordt verondersteld dat zowel de kinetische als de potentiële energie niet veranderen in het systeem, dus $dE = dU$, dan wordt [4.11]:

$$dU = dQ + dW \quad [4.20]$$

Samenvoegen van [4.18]; [4.19] en [4.20] levert:

$$dU = TdS - PdV \quad [4.21]$$

Bij een adiabatisch proces is er geen warmte overdracht, $dQ = 0$. Uit [4.18] kan dan worden opgemaakt dat er dan ook geen verandering is in entropie. Daardoor dan [4.20] herschreven worden tot:

$$dU = -PdV \quad [4.22]$$

De differentiaal voor de verandering van enthalpie is gedefinieerd als:

$$dH = dU + PdV - VdP \quad [4.23]$$

Als [4.22] wordt ingevuld in [4.23] dan blijft over:

$$dH = -VdP \quad [4.24]$$

Voor een isentropisch adiabatisch proces geldt dat:

$$P \cdot V^k = \text{constant} = C \quad [4.25]$$

Hierbij is k de warmte capaciteit ratio, C_p/C_v , voor water is $k=1.406$. Als [4.25] wordt opgelost voor P dan geldt dat:

$$P = C \cdot V^{-k} \quad [4.26]$$

Vervolgens differentiëren naar het volume:

$$dP = -C \cdot k \cdot V^{-k-1} dV \quad [4.27]$$

Invullen in [4.24]:

$$dH = -C \cdot k \cdot V^{-k} dV \quad [4.28]$$

Deze formule kan geïntegreerd worden:

$$h_2 - h_1 = C \cdot \frac{k(V_2^{1-k} - V_1^{1-k})}{k-1} = W_{\text{compressor}} \quad [4.29]$$

Stop [4.26] in [4.29]:

$$h_2 - h_1 = \frac{k(P_2 \cdot V_2 - P_1 \cdot V_1)}{k-1} \quad [4.30]$$

Met deze formule kan nog weinig worden gedaan, zolang er weinig bekend is over de eigenschappen van het gas. Deze worden echter beschreven in de algemene gaswet [4.31]. Deze beschrijft het gedrag van ideale gasen onder de invloeden van temperatuur, volume, druk en de massa van het gas. De algemene gaswet is:

$$P \cdot V = RT \quad [4.31]$$

Hierbij is R de algemene gasconstante. De volgende stap is [4.31] invullen in [4.30]:

$$h_2 - h_1 = \frac{kR(T_2 - T_1)}{k-1} \quad [4.32]$$

Verder is:

$$\frac{kR}{k-1} = C_p \quad [4.33]$$

Deze is ook wel bekend als de warmte capaciteit onder constante druk. De temperatuur van het gas, bij een adiabatische verandering, kan berekend worden met:

$$T_2 = T_1 \cdot \left(\frac{P_b}{P_a}\right)^{\frac{k-1}{k}} = T_1 (R_p)^{\frac{k-1}{k}} \quad [4.34]$$

Hierbij is R_p de drukratio, waarmee het stoom in de compressor gecomprimeerd wordt. Met [4.23] en [4.34] kan [4.30] nu omgeschreven worden tot:

$$h_2 - h_1 = C_p \cdot T_1 \cdot (R_p^{\frac{k-1}{k}} - 1) \quad [4.35]$$

Om tot het vermogen van de compressor te komen dient [4.35] nog vermenigvuldigd te worden met de massa stroom. Dit is echter niet een realistische weergave van het werkelijke vermogen. Het rendement van de compressor is namelijk nog niet meegenomen. Als het rendement ook wordt meegenomen, dan wordt de uiteindelijke formule die het vermogen van de compressor beschrijft:

$$\dot{m}(h_2 - h_1) = \dot{m} * C_p * T_1 * \frac{\left(Rp^{\frac{k-1}{k}} - 1\right)}{\eta} = P_{compressor}(W) \quad [4.36]$$

4.3.3 Isothermische compressie.

Bij isothermische compressie blijft de temperatuur van het te comprimeren gas constant. Om dit te realiseren dient systeem optimaal gekoeld te worden. Om het theoretische benodigde vermogen te bepalen, wat nodig is om het gas te comprimeren, wordt er weer gekeken naar de differentiaal vorm van de 1^{ste} hoofdwet van de thermodynamica.

$$dU = dQ - dW \quad [4.11]$$

Hierbij is dU de verandering van energie in het systeem, dQ de hoeveelheid toegevoegde warmte aan het gas en dW de hoeveelheid arbeid dat het gas heeft geleverd aan zijn omgeving. Als we de arbeid term verder uitschrijven valt er te zien dat deze afhankelijk is van de druk en het volume.

$$dW = -PdV \quad [4.19]$$

De algemene gaswet is wederom nodig om de eigenschappen van het gas te kunnen beschrijven. De algemene gaswet kan worden ingevuld in [4.19] om een beschrijving van het systeem te geven waaraan gerekend kan worden. Hieruit volgt dat:

$$dW = -\frac{RT}{V} dV \quad [4.38]$$

Deze term kan worden geïntegreerd om de hoeveelheid arbeid te berekenen die nodig was om een hoeveelheid massa op temperatuur T te comprimeren van volume Va naar volume Vb. Het minteken staat voor het feit dat er arbeid op het systeem (compressie) wordt verricht en niet dat het systeem zelf arbeid verricht op zijn omgeving (expansie). Uit de integratie volgt dat:

$$W = RT * \ln\left(\frac{V_a}{V_b}\right) \quad (\text{J/kg}) \quad [4.39]$$

Uit de algemene gaswet valt te zien dat er een lineair verband is tussen druk en volume. Met dit verband valt [4.39] om te schrijven tot:

$$W = RT * \ln\left(\frac{P_b}{P_a}\right) \quad (\text{J/kg}) \quad [4.40]$$

Om het vermogen van de compressor te berekenen, dient [4.26] vermenigvuldigd te worden met de massa stroom. Dit is gedaan in [4.41]. In [4.41] is ook het rendement van de compressor meegenomen, aangezien het systeem nooit honderd procent rendeert.

$$P = \dot{W} = \frac{\dot{m}RT}{\eta} * \ln\left(\frac{P_b}{P_a}\right) \quad [4.41]$$

Hierbij is P het vermogen (J/s) van de compressor en $\dot{m} = \text{massa stroom} \left(\frac{\text{kg}}{\text{s}}\right)$

4.3.4 Adiabatische compressie met tussenkoelers

Bij adiabatische compressie met tussenkoelers wordt het gas in meerdere stappen naar de gewenste druk gebracht. Tussen de stappen bevinden zich koelers om de temperatuur te verlagen en hiermee het benodigde vermogen te verminderen. De ratio waarmee de druk per stap stijgt is afhankelijk van de begindruk, de einddruk en het aantal stappen. Deze ratio wordt berekend met:

$$Rp = \left(\frac{Pe}{Pb} \right)^{\frac{1}{n}} \quad [4.42]$$

Pb= begindruk

Pe= einddruk

n= aantal compressie stappen

Het vermogen dat per stap nodig is kan berekend worden door [4.42] te gebruiken in [4.36]:

$$P_{compressor} = \dot{m} * Cp * \frac{(Te - Tb)}{\eta} \quad [4.43]$$

Tb= begin temperatuur bij elke stap

Te= eind temperatuur bij elke stap welke berekend wordt door:

$$Te = Tb * (Rp)^{\frac{k-1}{k}} \quad [4.44]$$

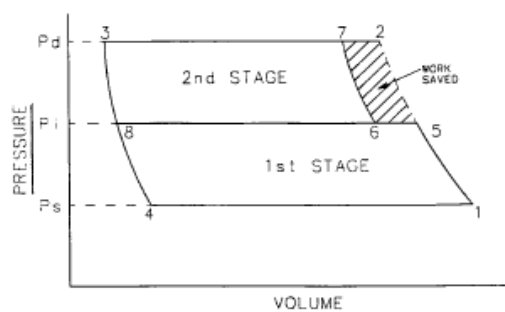
Zonder koeling zou de eind temperatuur van elke stap de begin temperatuur zijn van de daarop volgende stap. Dit zou tot gevolg hebben dat de uiteindelijke temperatuur precies hetzelfde is, en daarmee dus ook het toegevoegde vermogen, als bij adiabatische compressie in 1 stap. Daarom wordt het gas onder constante druk na elke stap afgekoeld, tot enkele graden boven zijn kookpunt, dit om condensatie te voorkomen. De hoeveelheid afgevoerde warmte kan berekend worden met:

$$Q = \dot{m} * Cp * (Te_{x-1} - Tb_x) \quad [4.45]$$

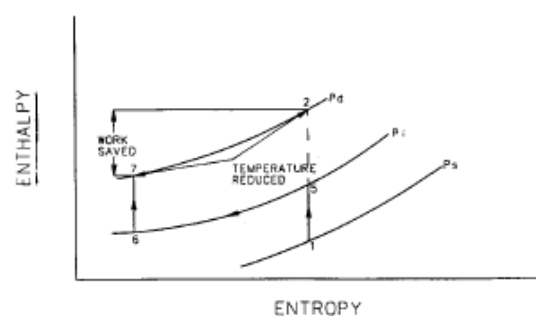
Tb_x=gewenste begin temperatuur van de desbetreffende stap

Te_{x-1}= eind temperatuur van de vorige stap

Het is vervolgens te bewijzen dat het totaal toegevoegde vermogen inderdaad lager is. Dit is ook mogelijk met een Pv-diagram en HS-diagram van het gas te doen. In de twee grafieken die hieronder valt goed te zien wat er gebeurt tijdens compressie met tussen koelers.



Figuur 4.1a Pv-diagram ⁽²⁾



Figuur 4.5b HS-diagram ⁽²⁾

In het PV-diagram (figuur 4.1a) stelt het vierkant 1-2-3-4 een adiabatische compressie voor zonder tussen koelers. De hoeveelheid arbeid die toegevoegd is, is gelijk aan de oppervlakte van het vierkant. Bij een tussenkoeler wordt de temperatuur verlaagd onder constante druk. Dit valt te zien in HS-diagram (figuur 4.1b), de temperatuur wordt hier verlaagd van punt 5 naar punt 6. In het Pv-diagram is vervolgens te zien dat het oppervlakte, en dus de hoeveelheid arbeid, verlaagd is met vierkant 5-6-7-8. Dit toont dus aan dat met tussenkoelers niet alleen de eindtemperatuur verlaagd wordt maar ook het benodigde vermogen om te comprimeren.

4.3.5 Korte samenvatting

In dit hoofdstuk is het comprimeren van gassen behandeld. Deze stap is nodig om stoom op de gewenste temperatuur en druk te krijgen indien de geothermische bron dit niet toelaat. Tijdens dit hoofdstuk zijn 2 hoofdvormen en een tussenvorm van compressie behandeld. De 2 hoofdvormen zijn adiabatistische compressie en isothermische compressie. Bij adiabatistische compressie is er geen overdracht van warmte, hierdoor wordt een grote temperatuurstijging gerealiseerd. Bij isothermische compressie wordt de compressor dusdanig goed gekoeld dat de temperatuur constant blijft. Beide vormen zijn echter in de realiteit niet 100% haalbaar, door rendement verliezen.

Het vermogen van een adiabatistische compressor kan berekend worden met:

$$P_{compressor} = \dot{m} * Cp * T1 * \frac{\left(Rp^{\frac{k-1}{k}} - 1\right)}{\eta}$$

Het vermogen van een isothermische compressor kan berekend worden met:

$$P_{compressor} = \frac{\dot{m}RT}{\eta} * \ln\left(\frac{Pb}{Pa}\right)$$

Een tussen vorm is adiabatistische compressie in meerdere stappen, met tussenkoelers. Door bij constante druk de temperatuur van het gas te verlagen door koeling, wordt de eindtemperatuur beter beheersbaar. Tevens bespaard op het benodigde elektrische vermogen. Het vermogen wordt met dezelfde formule bepaald als adiabatistische compressie, alleen wordt er tussentijds warmte afgevoerd.

Deze afvoer van warmte kan beschreven worden met:

$$Q = \dot{m} * Cp * (Te_{x-1} - Tb_x)$$

4.4 Pomp vermogen

Het laatste werktuig wat behandeld wordt is de pomp. Deze wordt gebruikt om water uit en in de bron te pompen en om proces water door de boiler en warmtewisselaars te pompen. De pomp is in feite hetzelfde als de compressor, alleen werkt deze met vloeistoffen en niet met gassen. Een vloeistof gedraagt zich anders dan een gas. Een vloeistof, in tegenstelling tot een gas, is niet tot nauwelijks samenpersbaar. Hierdoor kan er geen gebruik worden gemaakt van de algemene gaswet. Het vermogen van de pomp kan bepaald worden met behulp van de algemene formule voor de energetische toestand in een steady flow proces:

$$h1 + \frac{V1^2}{2} + g * z_1 + Qh = h2 + \frac{V2^2}{2} + g * z_2 + W \quad [4.17]$$

De kinetische en potentiële energie componenten van deze formule zijn in vergelijking met de druk componenten verwaarloosbaar. Hiermee wordt [4.17]:

$$-W = h2 - h1 \quad [4.45]$$

Het vermogen van de pomp wordt dus voornamelijk bepaald door het verschil in enthalpie. Enthalpie is hierboven al geformuleerd met:

$$dH = dU + VdP + PdV \quad [4.16]$$

Omschrijven met behulp van [4.11] levert:

$$dH = dQ - PdV + VdP + PdV \quad [4.46]$$

Nu vallen de volume termen al tegen elkaar weg. Deze waren echter toch al niet van toepassing, aangezien het volume van de vloeistof als niet samenpersbaar kan worden beschouwd. De productie van warmte komt door wrijving van de vloeistof in de buis. Deze wrijving levert ook een drukval, met als gevolg dat [4.46] om te schrijven valt tot [4.47].

$$dH=W=V\Delta P_{\text{tot}}+VdP \quad [4.47]$$

- V = soortelijk volume m^3/kg
- P_{tot} =drukval door wrijving

Het soortelijk volume kan berekend worden door de massa te delen door de bijbehorende dichtheid. De dP term is het verschil tussen de begin druk en de eind druk. Er is dus geen speciale integratie actie nodig. Met deze informatie wordt de geleverde arbeid, door een drukverandering op een vloeistof, berekend met:

$$W = \frac{m}{\rho} (\Delta P_{\text{tot}} + P_e - P_b) \quad [4.48]$$

Het vermogen van de pomp is gelijk aan de tijdsafgeleide van de arbeid. Dit is heel simpel te berekenen door de massastroom te nemen in plaats van de massa. Net als de compressor heeft ook de pomp een bepaald rendement. Dit alles samen levert het werkelijke vermogen van de pomp op:

$$W = \frac{\dot{m}}{\rho} * \eta * (\Delta P_{\text{tot}} + P_e - P_b) \quad [4.49]$$

5 Technische concepten

In de vorige hoofdstukken is behandeld wat aardwarmte is, waar het gebruikt wordt en wat er nodig is om er stoom mee te maken. Dit hoofdstuk behandelt de technische concepten, die gemaakt zijn aan de hand van de verkregen informatie uit de vorige hoofdstukken. Het hoofdstuk is geschikt voor alle lezers. Het wordt wel aangeraden om eerst hoofdstukken 2 en 4 te lezen. Er wordt hier aan de hand van scenario's bekeken wat er zoal mogelijk is met geothermische energie. Deze mogelijkheden worden dan vertaald in een concept, waarbij in detail wordt beschreven welke werktuigen er nodig zijn.

Het water uit de geothermische bron kan direct ge flashed worden in stoom, maar het kan ook indirect via warmtewisselaars en boilers gebruikt worden om stoom op te wekken. De stoom wat geproduceerd wordt met flashen kan verontreinigingen bevatten, die schadelijk kunnen zijn voor veel processen. De tweede optie is daarom geschikter. Via warmtewisselaars en boilers kan namelijk een hoge kwaliteit stoom geproduceerd worden, zonder verontreinigingen.

In hoofdstuk 4 zijn daarom de theoretische aspecten van boilers en warmtewisselaars behandeld. In dit hoofdstuk is ook de optie voor het gebruik van een compressor besproken om de stoom als het ware op te waarderen. Het gebruik van compressoren is energetisch en economisch gezien niet geschikt. De compressor heeft in veel gevallen een vermogen nodig van enkele megawatts om de compressie stap te kunnen maken. De extra gemaakte elektriciteitskosten voor de compressor, zal een groot deel van de bespaarde energiekosten teniet doen.

Een mogelijk alternatief voor het opwaarderen van stoom wordt besproken in 5.1, namelijk het ombouwen van stoomprocessen naar warm water processen. Daarna wordt er gekeken naar welke stappen er nodig zijn om wel stoom te maken. Vervolgens worden beide processen gecombineerd, dus het maken van stoom en warm water, dit wordt behandeld in 5.2. Als laatste wordt er in 5.3 nog een stap aan toegevoegd, namelijk het produceren van elektriciteit. In sommige gevallen zijn de temperatuur en het debiet van de bron hoog genoeg, om naast stoom ook nog elektriciteit te produceren.

5.1 Produceren van stoom of warmwater

Produceren van *warmwater*

Veel fabrieken gebruiken al decennia stoom voor veel van hun processen. Stoom wordt ook vaak gebruikt, omdat het aanwezig is als een restproduct, bijvoorbeeld bij een elektriciteit centrale. Veel processen werden dan ook ontworpen, om te functioneren op stoom, terwijl deze processen ook met heet water goed functioneren.

De reden om te vermelden dat stoom niet altijd nodig is, dat met geothermie niet altijd de gewenste stoom geproduceerd kan worden. Dit betekent dat er of dieper geboord moet worden, of dat er gasgestookte stoomketels moeten blijven draaien. Een andere oplossing is om een deel of alle stoom processen om te bouwen naar warm water processen. Er kan in tegenstelling tot stoom, namelijk wel zeer veel warm water geproduceerd worden, zie tabel 5.1.

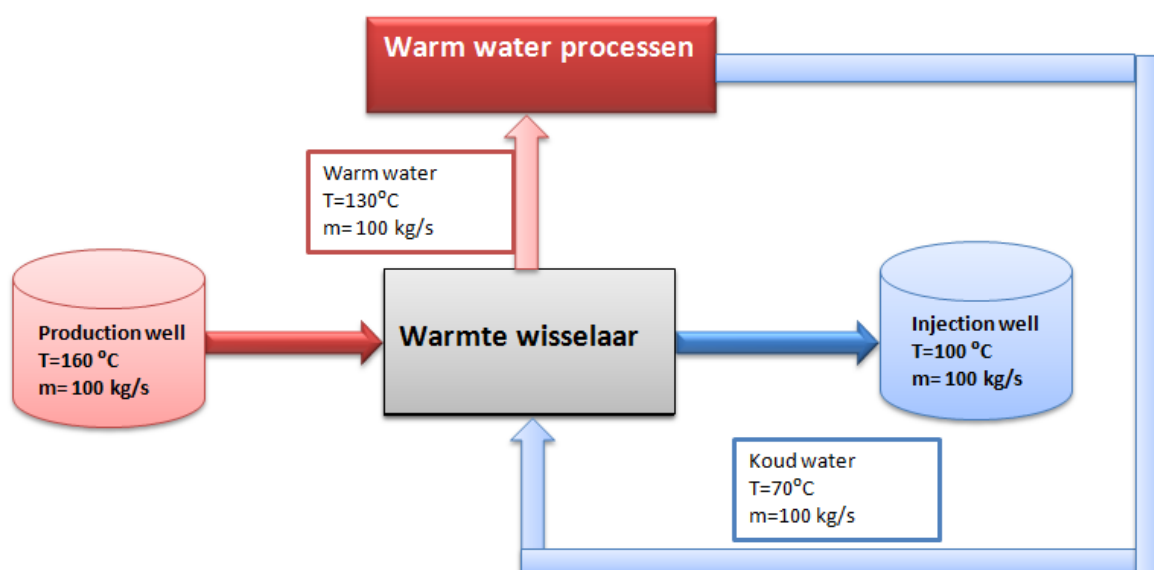
Een voorbeeld hiervan zijn de opslagtanks van Vopak in de haven van Rotterdam. Deze worden met verzadigd stoom van 140 °C verwarmd, om de temperatuur in de tanks op 30 °C te houden. De geplande geothermische bron heeft slechts een temperatuur van 120 °C. Dit is niet genoeg om de gewenste stoom te produceren. Als het proces wordt omgebouwd tot een warm water proces kan de geothermische bron echter wel gebruikt worden, om jaarlijks 5 miljoen euro aan gaskosten te besparen.

Tabel 5.1 Vergelijking tussen produceren van stoom en warm water bij $T_{\text{geo}}=160^{\circ}\text{C}$ en $Q_{\text{geo}}=100$ kg/s.

Gewenste temperatuur	Maximaal te produceren hoeveelheid stoom (ton/h)	Maximaal te produceren hoeveelheid water bij $T_i=20^{\circ}\text{C}$ (ton/h)
100 °C	42	578
120 °C	27	487
140 °C	13	402

Om warm water te maken is slechts een pomp nodig en een warmtewisselaar. Een simpel processchema is weergegeven in figuur 5.1, in bijlage D1 is een uitgebreider schema te vinden. Deze bijlage maakt gebruik van een voorbeeld. Hierbij wordt gewerkt met een geothermische bron, die een debiet heeft van 100 kg/s en een temperatuur van 160 °C. Deze bron moet evenveel proceswater opwarmen van 60 °C naar 120 °C. Om verdamping tegen te gaan en het water rond te pompen, wordt het proceswater eerst op een druk van 3 bar gebracht met een pomp.

Een nadeel van het ombouwen, is het ombouwen zelf. Bestaande stoomleidingen moeten vervangen worden voor warmwaterleidingen. Deze kunnen al gauw enkele honderden euro's per meter kosten. Een goede inventarisatie, van hoeveel warm water er nodig is en waar dit nodig is, is noodzakelijk om een nauwkeurige schatting van de investeringskosten te kunnen geven.



Figuur 5.1 Produceren van warm water

Produceren van Stoom

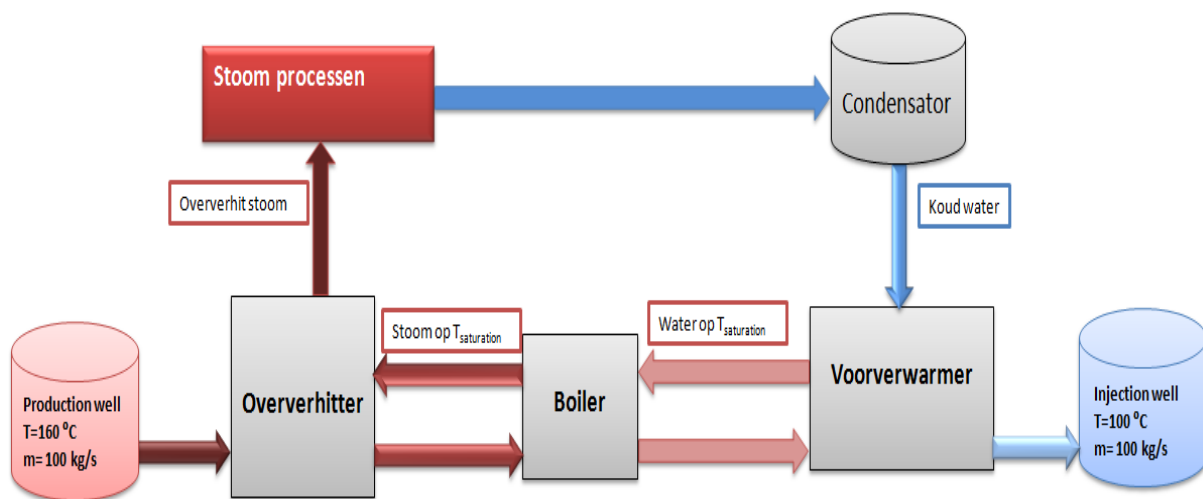
Indien de temperatuur en het debiet van de geothermische bron hoog genoeg zijn, om de gewenste hoeveelheid stoom te leveren, kan het processchema van figuur 5.2 gebruikt worden. Dit proces bestaat uit een pomp, een voorverwarmer een boiler en een oververhitter. De boiler en voorverwarmer

gebruiken alleen water uit de geothermische bron. Soms is de temperatuur van deze bron niet voldoende om het stoom te oververhitten, daarom kan de oververhitter ook gasgestookt zijn.

In bijlage D1 is een uitgebreid schema te vinden, hierbij wordt opnieuw gewerkt met een voorbeeld. In deze case moet, met een geothermische bron van 180 °C en debiet van 100kg/s, 5kg/s oververhit stoom gemaakt worden, met een temperatuur van 160 °C en een druk van 2 bar. De begintemperatuur is 60 °C en de begindruk is 1 bar.

De geothermische bron kan op verschillende manieren gebruikt worden. Indien de temperatuur dit toelaat, zal het als eerste altijd de stoom oververhitten. Of het daarna eerst naar de voorverwarmer of naar de boiler gaat, hangt af van de gewenste hoeveelheid stoom. In bijlage B1 wordt hier dieper op ingegaan. Deze bijlage is ook een handleiding voor het Excel model dat gebruikt werd tijdens dit onderzoek.

In dit model kan de maximaal te produceren hoeveelheden stoom en warm water berekend worden. Tevens kan er met het model een berekening gemaakt worden naar de omvang en eigenschappen van de benodigde apparatuur. Hiermee kan een schatting gemaakt worden van de benodigde investeringen.

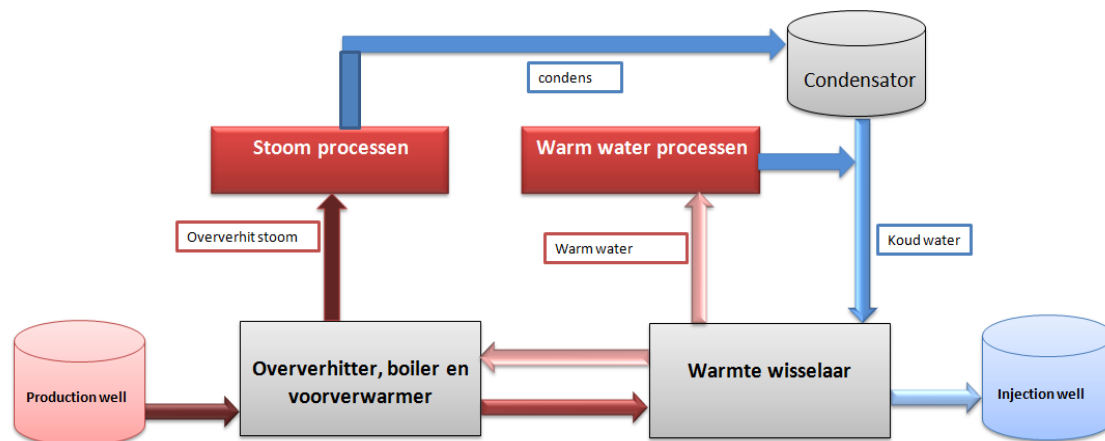


Figuur 5.2 Producteren van stoom

5.2 Producteren van stoom en warm water

De volgende situatie die zich kan voor doen is, dat slechts een deel van de benodigde stoom geproduceerd kan worden. Er kan dan gekozen worden om extra stoom te produceren met een stoomketel, maar het is ook de moeite waard om te kijken of een deel van de processen omgebouwd kan worden. Het water uit de geothermische bron, wat gebruikt is om stoom te maken, is vaak nog heet genoeg om een grote hoeveelheid warm water te maken.

Deze situatie deed zich ook voor bij Norske Skog Parenco. Bij een diepte van 5000 meter, kon de geothermische bron slechts een deel van benodigde stoom produceren. Daarom is er gekeken naar waar de lage druk stoom zoal gebruikt werd. Het bleek mogelijk te zijn om een deel van de stoom processen te vervangen voor warm water processen. Zo kan meer geothermische warmte gebruikt worden, waardoor er meer gas bespaard wordt.



Figuur 5.3 Produceren van stoom en warm water.

Figuur 5.3 geeft een simpel processchema weer voor het geval er stoom en warm water geproduceerd moet worden. In bijlage D3 is een uitgebreid processchema getekend, wederom gebruikmakend van een voorbeeld. Als voorbeeld is de 5000 meter case van Parengo gebruikt.

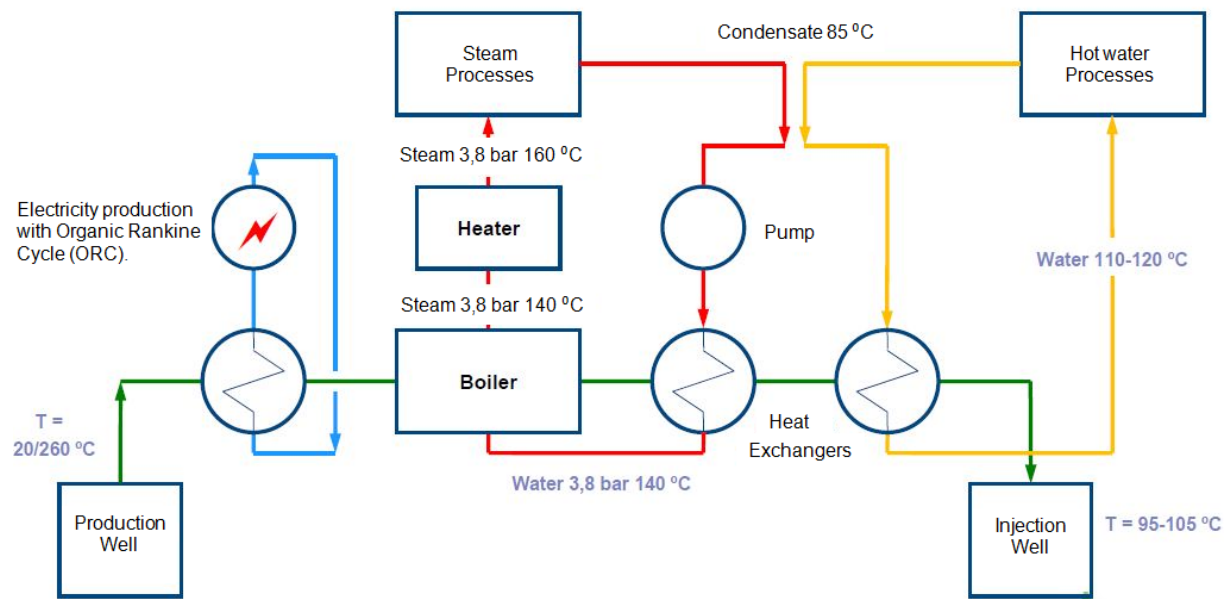
Case:

Bij een gemiddelde gradiënt van 30 °C/km zal de temperatuur op 5000 meter diepte 160 °C zijn. Door de bodem open te wrikken, ook wel fraccen genoemd, kan er een debiet van 120 kg/s gehaald worden. Hiermee kan 3 kg/s verzadigd stoom geproduceerd worden op een druk van 3.8 bar. De stoom wordt oververhit met een nabrander. De restwarmte van de geothermische bron wordt gebruikt om 100kg/s heet water te maken, met een temperatuur van 120 °C en een druk van 3 bar. De begintemperatuur en druk zijn in beide gevallen 80°C en 1 bar.

5.3 Produceren van stoom, warmwater en elektriciteit

De laatste mogelijkheid die besproken wordt is het produceren van stroom, stoom en warmwater. Dit is mogelijk bij hoge temperaturen en/of geringe stoom vraag. De geleverde stoom kan dan gebruikt worden voor productie processen, maar ook om bijvoorbeeld de pomp van de geothermische bron aan te drijven. Hoewel het rendement van een ORC niet erg hoog is, kan er vaak toch enkele megawatts aan elektriciteit geproduceerd worden. Nog een voordeel van het deel produceren van stroom is, dat de subsidie hoger zal uitvallen. Dit en andere financiële zaken worden echter besproken in hoofdstuk 6.

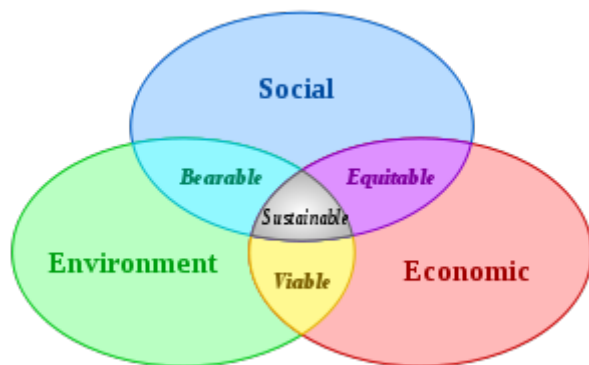
Er kan gekozen worden om het produceren van elektriciteit parallel te nemen aan het produceren van stoom, zoals in figuur 5.4 te zien is. Hierbij zal een deel van het debiet gebruikt worden om elektriciteit te produceren en de rest om stoom te produceren. Het is ook mogelijk om het produceren van elektriciteit in serie te nemen met stoom maken. Dan wordt niet een deel van het debiet, maar een deel van het temperatuurbereik genomen. Veel verschillen tussen beide methodes zijn er echter niet.



Figuur 5.4 Producteren van elektriciteit, stoom en warm water.

6. Sustainability

Naast dat een geothermische stoom centrale technisch haalbaar moet zijn, moet het ook economisch, milieutechnisch en op het sociale gebied haalbaar zijn. Deze 3 termen zijn verweven in de term duurzaamheid, zie figuur 6.1. Het project kan namelijk wel economisch duurzaam zijn, maar toch negatieve gevolgen hebben voor mens en milieu. Tijdens dit project zal de nadruk vooral liggen op de economische aspecten, omdat deze voor geothermische energie het belangrijkste zijn.



Figuur 6.6 De drie voorwaarden voor duurzaamheid.

Dit hoofdstuk behandelt de bovengenoemde 3 vormen. Als eerste zal er een economische analyse gemaakt worden, daarna wordt er gekeken naar de gevolgen voor het milieu en als laatste het sociale aspect. Het hoofdstuk is bedoeld voor alle lezers. Een specifieke voorkennis is niet noodzakelijk, hoewel enige kennis over economische termen wel handig is.

6.1 Economisch duurzaam

6.1.1 De 'Brandstof'

In hoofdstuk 2 is al besproken dat energie, in de vorm van warmte, verscholen in de aarde, zich door conductie en convectiestromen een weg baant naar het aardoppervlak. Tel daarbij het radioactieve verval van metalen in de bodem bij op en het vermogen aan het aardoppervlak ligt boven de 70TW. Dit is meer dan 2 keer de huidige energie consumptie. Dit geldt niet alleen voor directe toepassingen, bijvoorbeeld het maken van stoom, maar ook voor elektriciteitsproductie. Schattingen lopen uiteen dat het potentiële elektrische vermogen 0.3-2.0 TW is. Ter vergelijking: het huidige vermogen van alle elektriciteitscentrales samen is

Zodra een geothermische bron gebruikt wordt, zal de omliggende temperatuur van de aarde zeer langzaam afkoelen.. Geothermische energie wordt daarom als een hernieuwbare energie bron gezien. Zodra er gestopt wordt met warmte onttrekken zal de temperatuur in de put weer stijgen.

Voor huishoudelijke doeleinden is vaak een warmtepomp in combinatie met WKO voldoende om aan de warmte en koude vraag te voorzien, de put hoeft daarbij niet diep te zijn. Voor industriële toepassingen, zoals het opwekken van stoom, is in Nederland ultradiepe geothermie nodig. Daarbij wordt daadwerkelijk de aarde als brandstof gebruikt, bij WKO hoeft dit niet het geval te zijn.

Een ultradiepe geothermische bron van 5000 meter diep, met een temperatuur van 200 °C en een debiet van 100 kg/s, heeft een enorm potentieel thermisch vermogen. Het daadwerkelijke gebruikte vermogen, is afhankelijk van de temperatuur waarmee het water weer geïnjecteerd wordt. Dit kan gedemonstreerd worden met het volgende voorbeeld:

Als de bron slechts gebruikt wordt om zoveel mogelijk stoom te maken van 3 bar. Dan wordt het geothermische water slechts afgekoeld tot 135°C. Het nuttige thermische vermogen kan dan berekend worden met [6.1].

$$Q = \dot{m}_2 * \Delta H_e \quad [6.1]$$

$\dot{m}_2$ = maximaal te produceren hoeveelheid stoom (kg/s)

ΔH_e = verdampings enthalpie = 2163(kJ/kg)

Om de maximaal te produceren hoeveelheid stoom te berekenen, moet eerst een warmtebalans opgesteld worden, dit is gedaan in [6.2]

$$\dot{m}_1 * C_p * (T_b - T_e) * \eta = \dot{m}_2 * \Delta H_e \quad [6.2]$$

$\dot{m}_1$ = debiet geothermische bron = 100 (kg/s)

C_p = warmte capaciteit = 4 (kJ/kgK)

T_b = Geothermische productie temperatuur = 473 (K)

T_e = Geothermische injectie temperatuur = 3 Kelvin boven kookpunt = 410 (K)

η = rendement van de boiler, in dit geval 90%

De maximaal te produceren hoeveelheid stoom wordt nu:

$$\dot{m}_2 = 100 * 4 * (473 - 410) * 90\% / 2163 = 10.5 \text{ kg/s}$$

Het nuttig gebruikte thermische vermogen wordt nu:

$$Q = 10.5 * 2163 = 22.7 \text{ MW}$$

Zodra de geothermische bron ook gebruikt wordt om het water voor te verwarmen, vanaf 50 °C, dan wordt het thermisch gebruikte vermogen:

$$Q = 11.7 * (\text{Enthalpie verzadigt stoom} - \text{Enthalpie water op } 50^\circ\text{C}) = 10.5 * (2738 - 210) = 26.5 \text{ MW}$$

Als het water uit de zelfde geothermische bron de potentie heeft om afgekoeld te worden 50 °C, in een warmtewisselaar met een rendement van 90%. Dan is het toepasbare vermogen van de bron:

$$Q = 100 * 4 * (200 - 50) * 90\% = 54 \text{ MW}$$

Slechts 49% van de geothermische 'brandstof' wordt op deze manier gebruikt. Dit heeft weer invloed op de gasbesparing en de terugverdientijd, dit wordt echter verderop pas behandeld. Wel valt hieraan te zien dat het vermogen van ultradiepe geothermische bronnen enorm is. Een vermogen van 54MW is het equivalent van 510 benzine auto's die 110 km/h rijden op de snelweg bij een verbruik van 1 op 10.

6.1.2 Kosten

Geothermische energie is in principe overal op aarde beschikbaar en er zit geen brandstofprijs aan vast. Hoe het komt dat het nog weinig wordt toegepast heeft te maken met de investeringskosten. Deze zijn dusdanig hoog dat het financieel lange tijd niet aantrekkelijk was. Door de stijgende prijs van fossiele brandstoffen, lijkt daar nu verandering in te komen. Daarnaast is er door ontwikkelingen in de techniek ook steeds meer mogelijk qua ultra diepe geothermie.

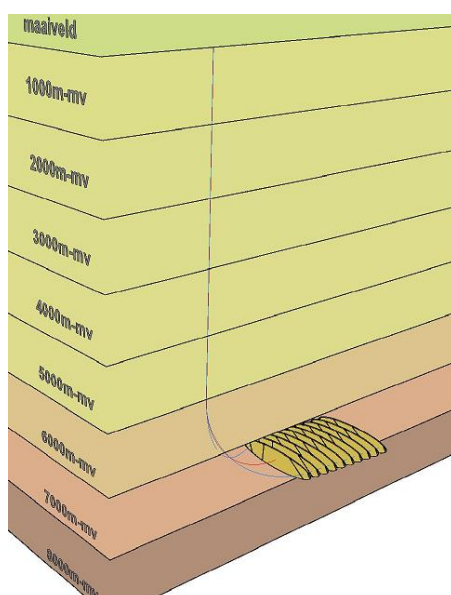
Investeringsen

Het boren van de bronnen is verreweg de duurste operatie van het hele project. De prijs voor het boren van een ultradiepe bron ligt rond de €3500,- per meter. Voor minder diepe bronnen ligt deze meter prijs lager, aangezien er minder materieel en dergelijke nodig is. Aan figuur 6.2 valt wel te zien waarom, de meter prijs zo hoog is. Een zeer grote installatie is er namelijk voor nodig, waar ook veel manuren in komt te zitten. De snelheid waarmee geboord wordt ligt rond de 2 meter per uur. Naast de boorprijs moet het bouwrijp maken van de grond en het plaatsen van materiaal en materieel ook nog meegenomen worden. In de Parengo case werden deze kosten geraamd op bijna 3 miljoen euro.



Figuur 6.1 Voorbeeld van een boorlocatie

De prijs van een ultradiepe bron hangt daarnaast ook niet alleen af van de diepte, maar ook van de lengte. Er wordt namelijk ook een gedeelte horizontaal geboord, waartussen de frac's geplaatst worden, zie figuur 6.2. Zo kan bij een bron van 7 kilometer diep de lengte wel 10-12 kilometer zijn. Aangezien er een productie en een injectie bron gemaakt moeten worden, kan dus de totale lengte wel 20 tot 24 kilometer zijn. Uitgaande van een meterprijs €3500 kost de totale bron 70 tot 85 miljoen euro.



Figuur 6.2 Schematische weergave van een geothermische bron met fracs.

De prijs van de warmtewisselaars, pompen en leidingwerk is afhankelijk van de temperatuur van de bodem, het debiet en de gewenste hoeveelheid stoom. Deze punten bepalen namelijk de grote van de apparatuur. In het algemeen geldt, dat in vergelijking met de prijs voor de bron, de andere kosten een stuk lager zijn. Het leiding werk kost ongeveer €300,-€500,- per meter. Als er gebruik gemaakt wordt van bestaand leidingwerk kan hier flink op bespaard worden.

Naast dat er jaarlijks gepland onderhoud is, zal het ook kunnen voorkomen dat er onverwachte reparaties nodig zijn. Ongeplande reparaties en onderhoud zijn vaak een stuk duurder, dus het is daarom de zaak om geschikt materiaal te kiezen.

De lage druk stoom wordt tegenwoordig op 2 manieren geproduceerd. Het kan direct geproduceerd worden, of het kan aanwezig zijn als restproduct in een stoomturbine. Fabrieken hebben vaak een grote elektriciteitsvraag, en produceren de stroom daarom vaak zelf. Hiertoe wordt stoom op hoge druk en temperatuur in een stoomturbine geleid. Het restproduct is lage druk stoom. Deze kan nog een keer door een stoomturbine gaan, of worden gebruikt in andere processen. Als een fabriek overstapt naar geothermie, zal de elektriciteit ingekocht moeten worden.

6.1.3 Opbrengsten

Het doel van het plaatsen van een ultradiepe geothermische stoom installatie is dat er bespaard wordt op de kosten voor fossiele brandstoffen. De prijs die de industrie momenteel betaald voor 1 kuub gas is €0,248. Dit lijkt niet veel, maar een gemiddelde fabriek verbruikt al gauw een tiental miljoen kuub. Om 1 kilogram stoom te produceren van 4 bar en 160 °C is 2,8MJ nodig. De verbrandingswaarde van 1 kuub Gronings aardgas is 32,8 MJ. Het maken van 1 kg stoom kost dus ongeveer 0,09 kuub gas en dus €0.02. Als een geothermische installatie 10 kg/s stoom moet produceren scheelt dit dus op jaarbasis meer dan zes miljoen euro.

Er wordt niet alleen op gas bespaard, maar er zijn ook nog op meer punten extra inkomsten te genereren. Het gebruik van duurzame energie wordt in veel landen gesubsidieerd. Er bestaan hiervoor allerlei regelingen. In Nederland heet deze regeling de SDE+ regeling. SDE staat voor Stimuleringsregeling duurzame energie.

De hoeveelheid subsidie is afhankelijk van het soort duurzame energie en waar het voor gebruikt wordt. Als de geothermische bron alleen gebruikt wordt voor het produceren van stoom, dan ontvangt men in 2012 bijna €5,- per GJ nuttig gebruikte warmte. Als er naast stoom ook elektriciteit geproduceerd wordt, wordt het subsidie bedrag ongeveer €10,- per GJ. De looptijd van de subsidie is 15 jaar voor geothermische projecten. Het bedrag wat men aan subsidie ontvangt verschilt per jaar.

Naast dat er direct bespaard wordt op de uitgaven van fossiele brandstoffen, levert het gebruik van ultradiepe geothermie ook nog een indirecte besparing op. Doordat er geen of minder fossiele brandstoffen gebruikt worden, zal er minder CO₂ geproduceerd worden. Tegenwoordig zijn er kosten verbonden aan het uitstoten van CO₂. Minder uitstoot betekend dus minder uitgaven voor CO₂ rechten, meer informatie is hierover te vinden in 6.2.1.

6.2 Milieutechnisch duurzaam

Onder de milieu technische zaken wordt vaak alleen gedacht aan het broeikaseffect. Daardoor wordt vaak verondersteld dat hernieuwbare energie altijd goed is voor het milieu. Nou is in het voorbeeld van kernenergie al genoemd dat dit niet altijd het geval is. Dit geldt niet alleen voor kernenergie, maar ook voor andere hernieuwbare energieën. Bij zonne-energie en windenergie wordt op een directe manier geen CO₂ uitgestoten. Het produceren van zonnepanelen en windmolens kost echter wel veel energie, wat dus indirect wel tot een CO₂ uitstoot leidt. Voor de zonnepanelen in combinatie met de batterijen zijn vaak materialen nodig die ergens gemijnd moeten worden, dit mijnen zorgt weer voor oppervlakte vervuiling.

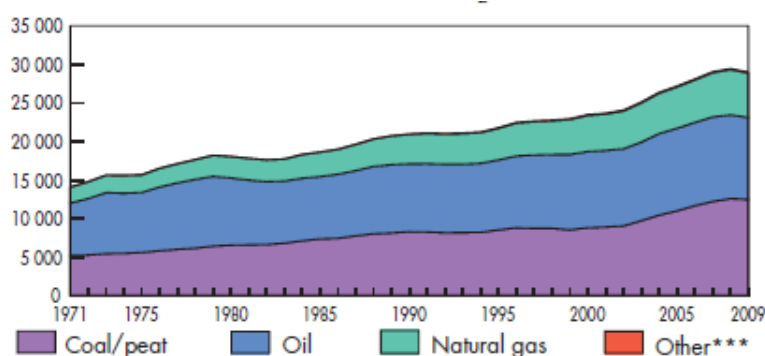
Het is dus belangrijk om alle aspecten van vervuiling mee te nemen. Voor dit onderzoek zijn er 4 vormen van vervuiling, met bijbehorende milieueffecten, gedefinieerd. Deze zijn luchtvervuiling, bodemvervuiling, grondvervuiling en indirecte vervuiling.

6.2.1 Luchtvervuiling

CO2 uitstoot en reductie

Per kubieke meter verbrand aardgas komt er ongeveer 1,8 kg aan CO2 vrij. Dit gas is schadelijk voor het milieu, omdat het bijdraagt aan de opwarming van de aarde. Om de uitstoot van CO2 te beperken, hebben overheden daarom de CO2-tax ingevoerd.

De CO2-belasting is ingevoerd door de leden van de Verenigde Naties. Het idee van deze belasting is dat er een maximum komt aan uitgestoten hoeveelheid CO2. Een bedrijf mag niet meer uitstoten, tenzij het CO2-rechten bij koopt. Hierdoor krijgt het uitstoten van CO2 een waarde op de balans van de onderneming. Door minder uit te stoten, kunnen de overtollige CO2 rechten verhandeld worden. Dit heeft gezorgd voor een handel in deze rechten, waardoor de prijs de laatste jaren gestegen is. Tegenwoordig kost het uitstoten van koolstofdioxide 20 tot 30 euro per ton. Een bedrijf dat 1 miljoen kubieke meter gas verbrand, heeft dus voor ongeveer 40 duizend euro aan CO2 emissie rechten nodig.

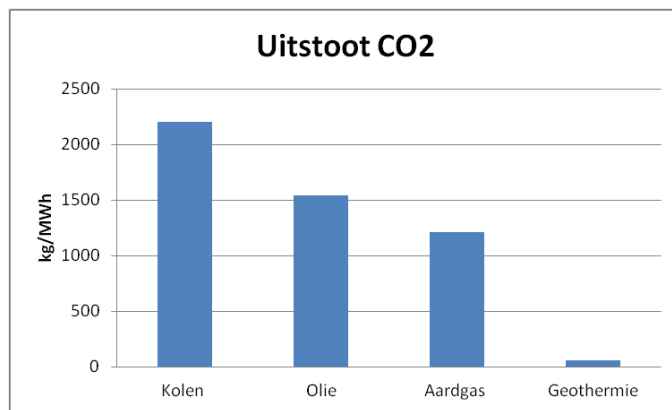


Figuur 7 Uitstoot van CO2 bij verschillende fossiele brandstoffen.

Uitstoot andere gassen

Het gebruik van geothermische energie zal ook in geringe mate zorgen voor een uitstoot van schadelijke stoffen. Er zit namelijk naast koolstofdioxide ook een gering mengsel van andere gassen opgelost in het opgepompte water en het opgepompte water zal hoeveelheid opgeloste zouten bevatten. De gassen zijn waterstofsulfide, methaangas en ammonia. Naast dat al deze gassen bijdragen aan het broeikaseffect, kan waterstofsulfide ook nog zorgen voor zure regen.

Deze stoffen komen echter ook vrij bij het verbranden van fossiele brandstoffen. In figuur 6.3 is de uitstoot van fossiele brandstoffen per megawatt uur geproduceerde elektriciteit vergeleken met die van geothermie. Hieruit blijkt dat de uitstoot van CO2 bij geothermie slechts een fractie is. Doordat geothermie een duurzame energiebron is met een lage koolstofdioxide uitstoot, is het vrijgesteld van CO2 emissie rechten.



Figuur 6.8 Uitstoot van CO₂± geothermie versus fossiele brandstoffen.

Materiaal keuze door milieu invloeden

Vanwege de lage concentraties is het wellicht raadzaam om het geothermische water te ontgassen met stoom. Dit kan namelijk de levensduur van de installatie ten goede komen, terwijl het effect op het milieu slechts gering is. De opgeloste zouten worden hier echter niet mee verwijderd. Het materiaal van de pompen, warmtewisselaars en boilers dient daarom zo gekozen te worden dat de opgeloste stoffen er geen eroderende werking op hebben.

Er kan bijvoorbeeld gekozen worden om aluminium of koper als materiaal voor de boilers en warmtewisselaars te kiezen. Deze materialen geleiden warmte zeer goed, waardoor het benodigde oppervlakte voor warmteoverdracht kleiner wordt. Zodra koper of aluminium met het bronwater in aanraking komt zal het reageren met de zuren en zouten die er in opgelost zijn. Dit kan het materieel dusdanig beschadigen dat de levensduur sterk verkort zal zijn. Het is daarom raadzaam om materialen als RVS of Titanium te gebruiken. Hierbij heeft RVS prijstechnisch gezien de voorkeur.

6.2.2 Bodemvervuiling

Aardbevingen

Het oppompen van olie en gas uit de bodem in het noorden van het land heeft al voor verscheidene kleine aardbevingen geleid. Dit risico is van toepassing op geothermie. Hiervoor zijn er verscheidene voorbeelden te noemen. In Nieuw Zeeland en Duitsland zijn in de buurt van geothermische verhoogde seismische effecten waargenomen. Een project in Basel is zelfs stil gelegd, nadat tijdens de eerste 6 dagen van gebruik een groot aantal bevingen werden waargenomen. Deze hadden een kracht van 3.4 of hoger op de schaal van Richter. Het is dus noodzakelijk om voldoende geologisch kennis van het gebied te hebben, om een inschatting te kunnen maken van het aardbevingsgevaar.

Grondwater

Het gebruik van ultradiepe geothermie zal geen directe gevolgen hebben op de grondwaterstand. Deze bevindt zich namelijk tot op een paar honderd meter diep. Wel kan het oppompen van het water zorgen voor vervuiling van dit water als het contact met elkaar komt.

6.2.3 Omgevingsvervuiling

Geluidshinder

De pomp die het water omhoog moet pompen, zal zelf ook in de grond gestopt zijn. Deze zal dus geen geluidsoverlast opleveren. Het produceren van stoom met ultra diepe geothermie zal vaak een vervanging zijn van bestaand materieel. Hierbij zal dus ook niet meer of minder geluidsoverlast

optreden. Kortom zodra de installatie operationeel is, zal er geen sprake zijn van geluidshinder. De enige vorm van geluidshinder die wel kan ontstaan is tijdens de bouw van de gehele installatie. Vooral het boren van put, het aan en afvoer van materiaal zal voor overlast zorgen. In een dichtbevolkt land als Nederland dient hier rekening mee gehouden te worden. Het boren van de 2 bronnen kan een jaar tot 2 jaar in beslag nemen, dus het bouwen van een geluidswal kan daarbij een oplossing zijn.

Oppervlakte verbruik

Het grootste gedeelte van de geothermische installatie zal zich ondergronds bevinden. Het bovengrondse oppervlakte verbruik is dus minimaal. Als er gekeken wordt naar elektriciteitsproductie heeft een conventionele kolencentrale bijna het tienvoudige aan bovengronds oppervlakte nodig.

6.2.4 Indirecte vervuiling

Net als bij het produceren en bouwen van zonnepanelen en windmolens zal er sprake zijn van indirecte vervuiling. Het boren van de bronnen, het bouwen van de installatie, het vervoer van materiaal en materieel, het kost allemaal energie. Vaak wordt deze energie geleverd door fossiele brandstoffen, dus dit levert vervuiling op. Daarnaast werken de pompen en andere aandrijvingen op elektriciteit. Deze elektriciteit levert bij de producent extra vervuiling op. Er vindt dus een gedeeltelijke verschuiving van de vervuiling plaats.

Als voorbeeld kan hierbij de case voor Norske Skog Parenco genomen worden. De lage druk stoom is daarbij een restproduct van een gasturbine. Deze zal verwijderd worden, indien de geothermische installatie er komt. De benodigde elektriciteit gaat daarbij ingekocht worden. Hierbij treedt er dus een CO₂ uitstoot reductie op bij Parenco, maar zal bij de krachtcentrale meer koolstofdioxide geproduceerd worden. Vanwege het lage rendement van de gasturbine bij Parenco zal er in totaal minder CO₂ geproduceerd worden, dus het netto effect op het milieu is in dit geval positief.

6.3 Sociaal duurzaam

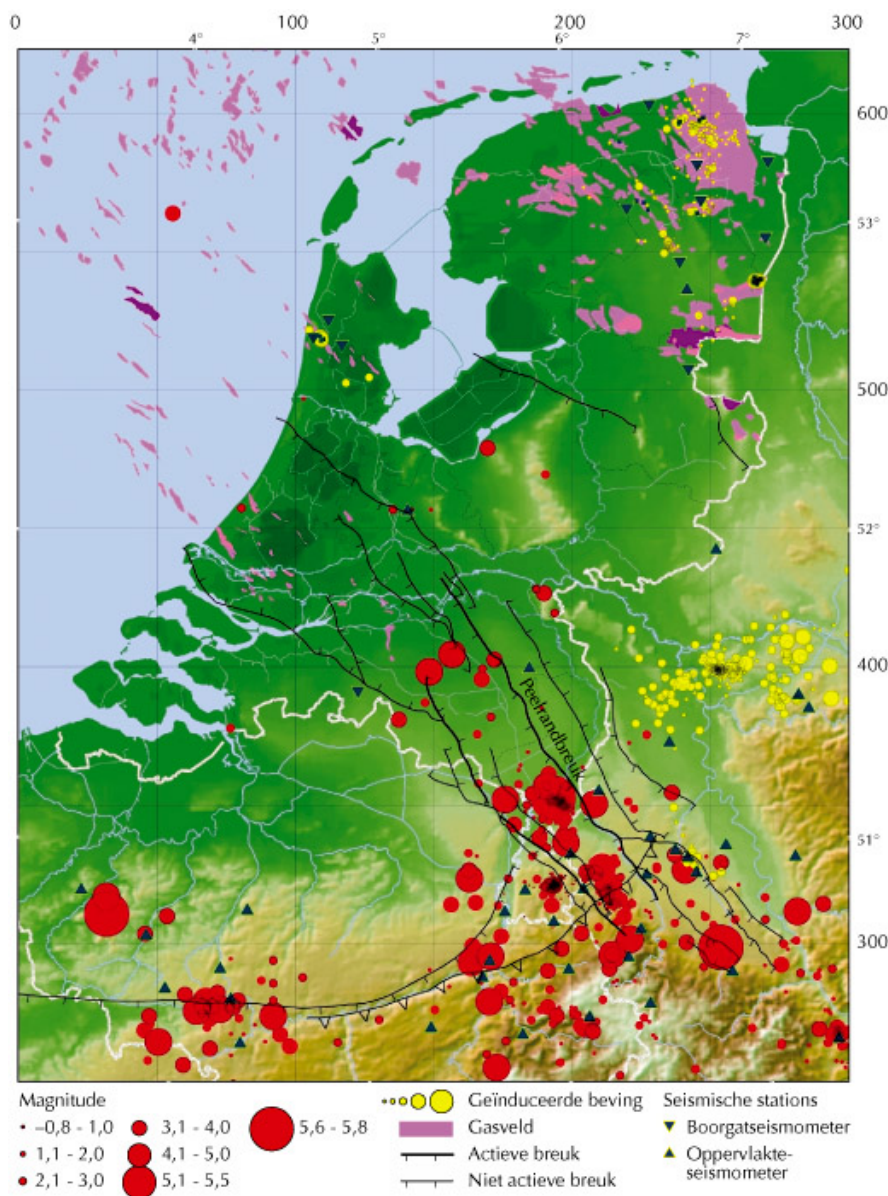
6.3.1 Werkgelegenheid

De laatste criteria waaraan ultradiepe geothermische energie moet voldoen om duurzaam te zijn is, dat het sociaal ook duurzaam moet zijn. Aangezien het in dit geval gaat om een industriële toepassing, heeft het sociale aspect vooral met de arbeidsvoorziening te maken. Het bouwen van de installatie heeft veel manuren nodig en zal dus veel werkgelegenheid creëren. Daarnaast ontstaat er extra werkgelegenheid voor bedrijven, die zich bezighouden met onderhoud van dergelijke installaties.

Het besparen op energie kosten betekend een hogere winstmarge voor bedrijven. Dit zou voor bedrijven kunnen betekenen om extra gaan investeren, waardoor er meer arbeidsplaatsen binnen de onderneming beschikbaar komen. Zodra ultradiepe geothermie een succes wordt, zou er zelfs een nieuwe bedrijfstak kunnen ontstaan. Deze zou bestaan uit bedrijven die zich bezig houden met onderhoud, en het maken van de benodigde warmtewisselaars en pompen, en bedrijven die de bronnen boren. Naast dat nieuwe bedrijven meer werkgelegenheid betekend, heeft het vaak ook een prijs- en kwaliteitsverbetering van het product tot gevolg, door de specialisatie en concurrentie.

6.3.2 Gevaren en dilemma's

Hierboven was al besproken dat het risico voor schade aan het milieu gering is bij ultradiepe geothermie. Wel was geconstateerd dat de bronnen en de fracs mogelijk aardbevingen kunnen veroorzaken. In een dichtbevolkt land als Nederland zou dit schade betekenen aan vele huizen, hierdoor zouden inwoners van de betreffende plaats wellicht moeten verhuizen. In figuur 6.4 valt te zien dat het oppompen van gas en olie in Groningen, en kolen in het Ruhrgebied al voor veel kleine aardbevingen gezorgd heeft.



Figuur 6.9 Aardbevingen in en rondom Nederland.

Een ander punt is de vraag in hoeverre het water uit de bron als gratis gezien mag worden. Indien ultradiepe geothermie in Nederland een succes wordt, zullen er meer en meer bronnen geboord worden. Het kan dan voorkomen dat bedrijven hierdoor met elkaar in conflict komen. Een bedrijf kan namelijk lastig ultradiepe geothermie gebruiken, als een naastliggende onderneming het ook al gebruikt, en daarbij een groot deel van de beschikbare warmte gebruikt. Hierdoor kan het water uit de bron wel een financiële waarde krijgen, waardoor het weer minder aantrekkelijk wordt, en de kans op succes afneemt.

7. Conclusies en aanbevelingen

Conclusies

Tijdens dit onderzoek is onderzocht of het mogelijk is om industrieel toepasbaar stoom te produceren met ultra diepe geothermie. Om deze vraag te beantwoorden gekeken naar wat er geothermisch mogelijk is en wat de eigenschappen zijn van lage druk stoom gebruikt in industriële toepassingen. Aan de hand van thermodynamische berekeningen is de verkregen data vertaald in concepten, welke getoetst zijn op de verschillende aspecten van duurzaamheid. Aan de hand van dit onderzoek kunnen daarom de volgende conclusies getrokken worden:

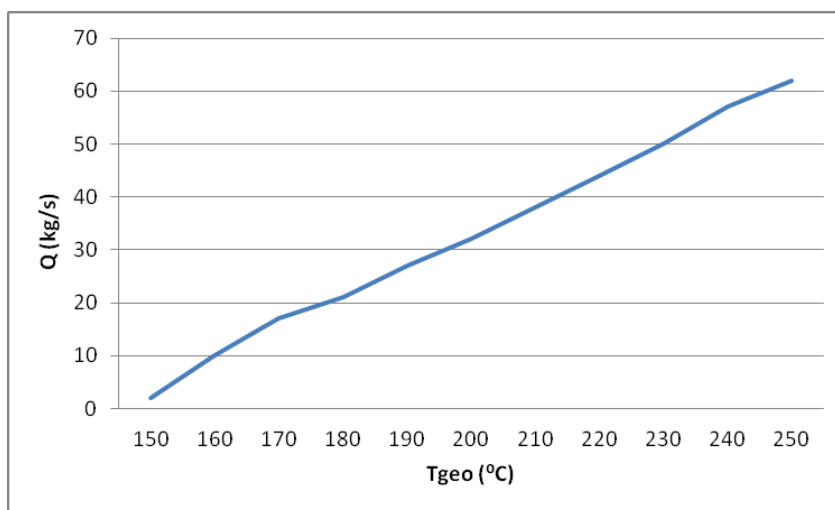
- Een van de meest belangrijke toepassingen waar stoom gebruikt wordt is het drogen van producten. Onderzoek heeft aangetoond dat drogen wel 25% van de totale energie consumptie van een land kan bevatten. Gemiddeld ligt de druk en temperatuur van de stoom bij het drogen rond de 4-10 bar en 150-200°C.
- De temperatuur gradiënt in Nederland ligt, op enkele uitzonderingen, rond de 30°C/km. Om met geothermie voldoende stoom te kunnen maken, dient dus in veel gevallen geboord te worden tot dieptes van 6000-7000 meter. Dit komt omdat de verdampingstemperatuur van water bij 4-10 bar tussen de 143°C en 180°C ligt.
- Bij dieptes tot 5000 meter is het bij een gemiddeld gradiënt (160°C), vaak niet mogelijk om voldoende stoom te maken voor het gewenste proces. Om het project dan toch aantrekkelijk te maken, kan er gekeken worden of er processen omgebouwd kunnen worden tot warm water processen. Dit kan bijvoorbeeld het verwarmen van gebouwen zijn. Door de integratie van warm water processen, zal een groter geothermisch vermogen gebruikt worden, wat de gas kosten sterk zal drukken.
- Bij dieptes vanaf 6000 meter is het vaak wel mogelijk om voldoende stoom te maken voor processen tot 5 bar. Toch is het ook in dit geval altijd interessant om ook te kijken naar warm water integratie. Vanaf 7000 meter kunnen ook processen tot 10 bar van voldoende stoom voorzien worden. Hierbij dient vermeld te worden dat het debiet van de bodem wel rond 100-140 kg/s, dit kan gerealiseerd worden door de bodem te fraccen. Bij fraccen ontstaan er scheuren in de bodem die de permeabiliteit verhogen, waarbij het debiet vergroot wordt.
- Geologisch onderzoek heeft aangetoond dat er vanaf 3000 meter ook een verhoogde gradiënt (40°C/km) kan optreden. In dit geval is het bij een diepte van 5000 meter (180°C) soms al mogelijk om voldoende stoom te maken voor drukken tot 5 bar. Bij 6000 meter kan er stoom geproduceerd worden tot 10 bar en bij 7000 meter kan er vaak voldoende stoom van 20-30 bar gemaakt worden.
- Het is soms ook mogelijk om bij temperaturen vanaf 200°C een ORC te plaatsen om naast stoom ook elektriciteit te produceren. Dit hangt onder andere van de temperatuur en het debiet van het gewenste stoom af.
- Uit de case studies is gebleken dat met het toepassen van geothermische energie, de energie uitgaven met 30 tot zelfs 75 procent kunnen dalen. De hoge investeringskosten voor ultradiepe geothermie zorgen er echter voor dat het bijna alleen financieel haalbaar is voor industrieën met een fossiel brandstof verbruik (>€10.000.000,-/jaar).
- Het gebruik van ultradiepe geothermie heeft zowel positieve als negatieve gevolgen voor mens en milieu. De positieve aspecten zijn overduidelijk de CO2 reductie en wellicht de extra arbeidsplaatsen die ontstaan. Negatieve gevolgen kan het optreden van aardbevingen zijn.

Aanbevelingen/aandachtspunten

Tijdens het onderzoek is dus naar voren gekomen dat het wel mogelijk moet zijn om met ultradiepe geothermie geschikte stoom te maken voor industriële toepassingen. Er blijven echter een aantal punten hangen waar nog gedetailleerd onderzoek naar gedaan moet worden, in sommige gevallen wordt dit al gedaan. Deze punten hebben betrekking op de bron en op het materieel.

De twee belangrijkste punten zijn daarbij de temperatuur en het debiet van de bron. Er wordt momenteel gewerkt aan het verbeteren van het put model. Dit is essentieel, want zolang deze niet nauwkeurig is, kunnen er geen uitspraken gedaan worden over het debiet. Het put model beschrijft voornamelijk de drukval, die zich vooral over de frac's zal voordoen. Deze drukval bepaald het uiteindelijke vermogen van de pomp die nodig is om het gewenste debiet te halen. Dit vermogen mag namelijk niet te laag zijn, want dan kan er een mengsel van water en stoom omhoog komen, of het debiet kan lager zijn dan gewenst. Als het vermogen te hoog wordt gekozen zal er onnodig veel elektriciteit verbruikt worden, waardoor het hele project minder winstgevend en duurzaam wordt.

Een ander punt waar rekening dient gehouden is de temperatuur van het water uit de geothermische bron. Het is vaak aan te raden om dieper te boren dan noodzakelijk. Door dieper te boren zal de temperatuur van de bodem toenemen en kan er meer stoom gemaakt worden, zie figuur 7.1. Er kan ook gekozen worden om vast te houden aan de eerder berekende hoeveelheid stoom. Bij een stijgende geothermische temperatuur en constante gewenste productie van stoom, zal het benodigde oppervlakte van de boiler en voorverwarmer afnemen. Ook kan dan sneller gekozen worden om de productie op te schroeven. Als laatste kan de hogere temperatuur dienen als een veiligheidsmarge, indien het rendement van het materieel lager is dan verwacht.



Figuur 7.1 Maximaal te produceren hoeveelheid stoom (Q) bij een druk van 4 bar.

Bronnenlijst:

- [1] Compressor handbook, Paul C. Hanlon, McGRAW-HILL isbn: 0-07-026005-2
- [2] Compressors: Selection and Sizing, Royce N. Brown, Gulf Professional Publishing, isbn:0-88415-164-6
- [3] Energy Conversion, D. Yogi Goswami, CRC Press, isbn:978-1-4200-4431-7
- [4] Handbook of energy engineering, Albert Thumann, The Fairmont Press, isbn: 0-88173-347-4
- [5] Handbook of industrial drying, Arum S. Mujandar, CRC Press, isbn: 1574446681
- [6] Heat and Mass Transfer, Y. Cengel, McGraw-Hill, isbn: 0077366646
- [7] International Steam Tables, W. Wagner, Springer, isbn: 978-3-540-21419-9
- [8] Chemisch Potentiaal, http://nl.wikipedia.org/wiki/Chemisch_potentiaal, bezocht op 15-11-11
- [9] Chemical Engineering, Coulsen&Richardson, BH, ISBN 0 7506 4444 3

Temperature (°C)		Maximum amount of steam that can be produced (ton/h)																
Pressure (Bar)	Temperature (°C)	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	210	220	230	240	250	260	270
0.3	69	10	13	16	19	22	25	27	30	32	35	37	40	42	45	48	51	54
0.5	81	7	10	13	16	19	21	24	26	29	32	35	37	40	42	45	48	51
0.7	90	5	7	10	13	16	19	22	24	27	30	32	35	38	41	44	46	49
1	100	2	5	8	11	14	17	20	22	25	27	30	33	36	39	41	44	47
1.5	111		2	5	8	11	14	17	19	22	25	27	30	33	36	39	42	45
2	120			2	5	8	11	14	17	20	22	25	28	31	34	37	40	42
3	134				1	4	7	10	13	16	19	22	25	27	30	33	36	39
4	144					1	5	8	10	13	16	19	22	25	28	31	34	37
5	152						2	5	7	11	14	17	20	22	26	29	32	35
6	159							2	6	9	12	15	17	21	24	27	30	33
7	165							1	4	7	10	13	16	19	22	25	28	32
8	170								2	5	8	12	15	17	21	24	27	30
9	175								1	4	7	10	13	16	20	22	25	29
10	180									2	5	9	12	15	18	21	25	27
15	198											3	6	10	13	16	20	22
20	212												2	5	8	12	15	19
30	234													-1	2	5	8	12
40	250																3	7
50	264																	2

Temperature (°C)		Maximum thermal power output (MW)																
Pressure (Bar)	Temperature (°C)	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	210	220	230	240	250	260	270
0.3	69	7	8	10	12	14	16	18	19	21	22	24	26	27	29	31	33	35
0.5	81	5	7	8	10	12	13	15	17	18	20	22	24	26	27	29	31	33
0.7	90	3	5	6	8	10	12	14	15	17	19	21	22	24	26	28	29	31
1	100	1	3	5	7	9	10	12	14	15	17	19	21	23	24	26	27	29
1.5	111		1	3	5	7	9	10	12	13	15	17	19	20	22	24	26	28
2	120			1	3	5	7	8	10	12	14	15	17	19	21	22	24	26
3	134				1	2	4	6	8	10	11	13	15	16	18	20	22	23
4	144					1	3	5	6	8	9	11	13	15	17	18	20	22
5	152						1	3	4	6	8	10	11	13	15	17	19	20
6	159							1	3	5	7	8	10	12	14	15	17	19
7	165							1	2	4	6	8	9	11	13	14	16	18
8	170								1	3	5	7	8	10	12	14	15	17
9	175								1	2	4	6	7	9	11	13	14	16
10	180									1	3	5	7	9	10	12	14	15
15	198											2	3	6	7	9	11	12
20	212												1	3	4	6	8	10
30	234														1	3	4	6
40	250																1	3
50	264																	1

Temperature (°C)		Equivalent gasconsumption (Nm ³ /h)																
Pressure (Bar)	Temperature (°C)	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	210	220	230	240	250	260	270
0.3	69	757	969	1181	1393	1605	1816	2028	2187	2346	2558	2770	2981	3140	3352	3564	3776	3988
0.5	81	538	747	956	1165	1374	1531	1740	1897	2106	2315	2524	2733	2942	3099	3308	3517	3726
0.7	90	378	533	740	947	1154	1361	1568	1724	1931	2138	2345	2552	2759	2966	3173	3328	3535
1	100	169	374	578	783	988	1193	1398	1551	1756	1961	2165	2370	2575	2780	2933	3138	3343
1.5	111		167	368	570	772	974	1176	1328	1529	1731	1933	2135	2337	2539	2741	2943	3145
2	120			165	364	564	764	963	1163	1363	1563	1762	1962	2162	2361	2561	2761	2960
3	134				64	260	505	702	898	1094	1290	1486	1683	1879	2075	2271	2468	2664
4	144					63	305	547	692	885	1079	1272	1466	1659	1901	2095	2288	2482
5	152						110	301	492	731	923	1114	1305	1496	1735	1926	2117	2309
6	159							156	393	582	771	960	1149	1386	1575	1764	1953	2190
7	165							61	248	436	670	857	1045	1232	1466	1653	1841	2075
8	170								153	339	525	757	942	1128	1360	1546	1732	1964
9	175								60	244	428	658	843	1027	1257	1441	1625	1855
10	180									151	333	562	745	973	1156	1338	1567	1750
15	198											190	366	631	808	984	1205	1381
20	212												99	313	484	698	913	1127
30	234														94	297	460	663
40	250																167	361
50	264																	86

Temperature (°C)		Equivalent gasconsumption (M€/year)																
Pressure (Bar)	Temperature (°C)	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	210	220	230	240	250	260	270
0.3	69	1.5	2.0	2.4	2.8	3.3	3.7	4.1	4.5	4.8	5.2	5.6	6.1	6.4	6.8	7.3	7.7	8.1
0.5	81	1.1	1.5	2.0	2.4	2.8	3.1	3.6	3.9	4.3	4.7	5.1	5.6	6.0	6.3	6.7	7.2	7.6
0.7	90	0.8	1.1	1.5	1.9	2.4	2.8	3.2	3.5	3.9	4.4	4.8	5.2	5.6	6.1	6.5	6.8	7.2
1	100	0.3	0.8	1.2	1.6	2.0	2.4	2.9	3.2	3.6	4.0	4.4	4.8	5.3	5.7	6.0	6.4	6.8
1.5	111		0.3	0.8	1.2	1.6	2.0	2.4	2.7	3.1	3.5	3.9	4.4	4.8	5.2	5.6	6.0	6.4
2	120			0.3	0.7	1.2	1.6	2.0	2.4	2.8	3.2	3.6	4.0	4.4	4.8	5.2	5.6	6.0
3	134				0.1	0.5	1.0	1.4	1.8	2.2	2.6	3.0	3.4	3.8	4.2	4.6	5.0	5.4
4	144					0.1	0.6	1.1	1.4	1.8	2.2	2.6	3.0	3.4	3.9	4.3	4.7	5.1
5	152						0.2	0.6	1.0	1.5	1.9	2.3	2.7	3.1	3.5	3.9	4.3	4.7
6	159							0.3	0.8	1.2	1.6	2.0	2.3	2.8	3.2	3.6	4.0	4.5
7	165							0.1	0.5	0.9	1.4	1.7	2.1	2.5	3.0	3.4	3.8	4.2
8	170								0.3	0.7	1.1	1.5	1.9	2.3	2.8	3.2	3.5	4.0
9	175								0.1	0.5	0.9	1.3	1.7	2.1	2.6	2.9	3.3	3.8
10	180									0.3	0.7	1.1	1.5	2.0	2.4	2.7	3.2	3.6
15	198											0.4	0.7	1.3	1.6	2.0	2.5	2.8
20	212												0.2	0.6	1.0	1.4	1.9	2.3
30	234														0.2	0.6	0.9	1.4
40	250																0.3	0.7
50	264																	0.2

Temperature (°C)		Maximum amount of steam that can be produced (ton/h)																
Pressure (Bar)	Temperature (°C)	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	210	220	230	240	250	260	270
0.3	69	12	16	19	23	26	30	33	36	38	42	45	48	51	54	58	61	65
0.5	81	9	12	16	19	23	25	29	31	35	38	42	45	48	51	54	58	61
0.7	90	6	9	12	16	19	23	26	29	32	36	39	42	46	49	53	55	59
1	100	3	6	10	13	17	20	24	26	30	33	36	40	43	47	49	53	56
1.5	111		3	6	10	13	17	20	23	26	30	33	36	40	43	47	50	54
2	120			3	6	10	13	17	20	24	27	30	34	37	41	44	48	51
3	134			-1	1	5	9	12	16	19	23	26	30	33	36	40	43	47
4	144					1	6	10	12	16	19	23	26	30	34	37	41	44
5	152						2	6	9	13	17	20	24	27	31	35	38	42
6	159							3	7	11	14	18	21	25	29	32	36	40
7	165							1	5	8	12	16	19	23	27	30	34	38
8	170								3	6	10	14	18	21	25	29	32	36
9	175								1	5	8	12	16	19	24	27	30	35
10	180									3	6	11	14	18	22	25	30	33
15	198										-1	4	7	12	16	19	24	27
20	212											-1	2	6	10	14	18	23
30	234													-1	2	6	10	14
40	250																4	8
50	264																	2

Temperature (°C)		Maximum thermal power output (MW)																
Pressure (Bar)	Temperature (°C)	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	210	220	230	240	250	260	270
0.3	69	8	10	12	15	17	19	21	23	25	27	29	31	33	35	37	40	42
0.5	81	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	27	29	31	33	35	37	39
0.7	90	4	6	8	10	12	14	17	18	20	23	25	27	29	31	33	35	37
1	100	2	4	6	8	10	13	15	16	18	21	23	25	27	29	31	33	35
1.5	111		2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	25	27	29	31	33
2	120			2	4	6	8	10	12	14	16	19	21	23	25	27	29	31
3	134				1	3	5	7	9	12	14	16	18	20	22	24	26	28
4	144					1	3	6	7	9	11	13	15	17	20	22	24	26
5	152						1	3	5	8	10	12	14	16	18	20	22	24
6	159							2	4	6	8	10	12	15	17	19	21	23
7	165							1	3	5	7	9	11	13	15	17	19	22
8	170								2	4	6	8	10	12	14	16	18	21
9	175								1	3	5	7	9	11	13	15	17	20
10	180									2	4	6	8	10	12	14	17	18
15	198										2	4	7	9	10	13	15	
20	212											1	3	5	7	10	12	
30	234													1	3	5	7	
40	250																2	4
50	264																	1

Temperature (°C)		Equivalent gasconsumption (Nm3/h)																
Pressure (Bar)	Temperature (°C)	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	210	220	230	240	250	260	270
0.3	69	916	1170	1424	1679	1933	2187	2441	2632	2823	3077	3331	3585	3776	4030	4284	4538	4792
0.5	81	653	904	1155	1406	1657	1845	2096	2284	2535	2786	3036	3287	3538	3726	3977	4228	4479
0.7	90	461	647	895	1144	1392	1641	1889	2076	2324	2573	2821	3070	3318	3566	3815	4001	4250
1	100	210	456	701	947	1193	1438	1684	1868	2114	2360	2606	2851	3097	3343	3527	3773	4018
1.5	111		207	449	692	934	1176	1418	1600	1842	2085	2327	2569	2812	3054	3296	3538	3781
2	120			205	444	684	924	1163	1403	1642	1882	2122	2361	2601	2841	3080	3320	3559
3	134				83	319	613	849	1084	1320	1555	1791	2026	2262	2497	2733	2968	3203
4	144					82	372	663	837	1069	1301	1533	1766	1998	2288	2520	2753	2985
5	152						139	368	597	884	1114	1343	1573	1802	2089	2318	2548	2777
6	159							194	478	705	932	1159	1386	1669	1896	2123	2350	2634
7	165							80	304	529	810	1035	1260	1485	1766	1991	2215	2497
8	170								190	413	636	915	1137	1360	1639	1862	2084	2363
9	175								78	299	520	796	1017	1238	1515	1736	1957	2233
10	180									187	407	681	900	1174	1393	1612	1887	2106
15	198											234	446	764	975	1187	1452	1664
20	212												124	381	587	844	1101	1358
30	234														118	362	558	802
40	250																206	439
50	264																	108

Temperature (°C)		Equivalent gasconsumption (M€/year)																
Pressure (Bar)	Temperature (°C)	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	210	220	230	240	250	260	270
0.3	69	1.9	2.4	2.9	3.4	3.9	4.5	5.0	5.4	5.8	6.3	6.8	7.3	7.7	8.2	8.7	9.3	9.8
0.5	81	1.3	1.8	2.4	2.9	3.4	3.8	4.3	4.7	5.2	5.7	6.2	6.7	7.2	7.6	8.1	8.6	9.1
0.7	90	0.9	1.3	1.8	2.3	2.8	3.3	3.9	4.2	4.7	5.2	5.8	6.3	6.8	7.3	7.8	8.2	8.7
1	100	0.4	0.9	1.4	1.9	2.4	2.9	3.4	3.8	4.3	4.8	5.3	5.8	6.3	6.8	7.2	7.7	8.2
1.5	111		0.4	0.9	1.4	1.9	2.4	2.9	3.3	3.8	4.3	4.7	5.2	5.7	6.2	6.7	7.2	7.7
2	120			0.4	0.9	1.4	1.9	2.4	2.9	3.4	3.8	4.3	4.8	5.3	5.8	6.3	6.8	7.3
3	134				0.2	0.7	1.3	1.7	2.2	2.7	3.2	3.7	4.1	4.6	5.1	5.6	6.1	6.5
4	144					0.2	0.8	1.4	1.7	2.2	2.7	3.1	3.6	4.1	4.7	5.1	5.6	6.1
5	152						0.3	0.8	1.2	1.8	2.3	2.7	3.2	3.7	4.3	4.7	5.2	5.7
6	159							0.4	1.0	1.4	1.9	2.4	2.8	3.4	3.9	4.3	4.8	5.4
7	165							0.2	0.6	1.1	1.7	2.1	2.6	3.0	3.6	4.1	4.5	5.1
8	170								0.4	0.8	1.3	1.9	2.3	2.8	3.3	3.8	4.3	4.8
9	175								0.2	0.6	1.1	1.6	2.1	2.5	3.1	3.5	4.0	4.6
10	180									0.4	0.8	1.4	1.8	2.4	2.8	3.3	3.8	4.3
15	198											0.5	0.9	1.6	2.0	2.4	3.0	3.4
20	212												0.3	0.8	1.2	1.7	2.2	2.8
30	234														0.2	0.7	1.1	1.6
40	250																0.4	0.9
50	264																	0.2

Temperature (°C)		Maximum amount of steam that can be produced (ton/h)																
Pressure (Bar)	Temperature (°C)	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	210	220	230	240	250	260	270
0.3	69	15	19	23	27	31	35	39	42	45	49	53	57	60	64	68	72	76
0.5	81	11	15	19	23	27	30	34	37	41	45	49	53	57	60	64	68	72
0.7	90	8	11	15	19	23	27	31	34	38	42	46	50	54	58	62	65	69
1	100	4	8	12	16	20	24	28	31	35	39	43	47	51	55	58	62	66
1.5	111		4	8	12	16	20	24	27	31	35	39	43	47	51	55	59	63
2	120			4	8	12	16	20	24	28	32	36	40	44	48	52	56	60
3	134				2	6	11	15	19	23	27	31	35	39	43	47	51	55
4	144					2	7	12	15	19	23	27	31	35	40	44	48	52
5	152						3	7	11	16	20	24	28	32	37	41	45	49
6	159							4	9	13	17	21	25	30	34	38	42	47
7	165							2	6	10	15	19	23	27	32	36	40	45
8	170								4	8	12	17	21	25	30	34	38	43
9	175								2	6	10	15	19	23	28	32	36	41
10	180									4	8	13	17	22	26	30	35	39
15	198											5	9	15	19	23	28	32
20	212												3	8	12	17	22	27
30	234													-1	3	8	12	17
40	250																5	10
50	264																	3

Temperature (°C)		Maximum thermal power output (MW)																
Pressure (Bar)	Temperature (°C)	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	210	220	230	240	250	260	270
0.3	69	9	12	15	17	20	22	25	27	29	31	34	37	39	41	44	46	49
0.5	81	7	9	12	14	17	19	21	23	26	28	31	34	36	38	41	43	46
0.7	90	5	7	9	12	14	17	19	21	24	26	29	31	34	36	39	41	43
1	100	2	5	7	10	12	15	17	19	22	24	27	29	32	34	36	39	41
1.5	111		2	5	7	10	12	15	16	19	21	24	26	29	31	34	36	39
2	120			2	5	7	9	12	14	17	19	22	24	27	29	31	34	36
3	134				1	3	6	9	11	14	16	18	21	23	26	28	30	33
4	144					1	4	7	9	11	13	16	18	20	23	26	28	31
5	152						1	4	6	9	11	14	16	18	21	24	26	28
6	159							2	5	7	10	12	14	17	19	22	24	27
7	165							1	3	5	8	11	13	15	18	20	23	26
8	170								2	4	7	9	12	14	17	19	21	24
9	175								1	3	5	8	10	13	16	18	20	23
10	180									2	4	7	9	12	14	17	19	22
15	198											2	5	8	10	12	15	17
20	212												1	4	6	9	11	14
30	234														1	4	6	8
40	250																2	5
50	264																	1

Temperature (°C)		Equivalent gasconsumption (Nm ³ /h)																
Pressure (Bar)	Temperature (°C)	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	210	220	230	240	250	260	270
0.3	69	1075	1372	1668	1965	2261	2558	2854	3077	3299	3596	3892	4189	4411	4708	5004	5301	5597
0.5	81	768	1061	1354	1646	1939	2158	2451	2671	2963	3256	3549	3841	4134	4353	4646	4939	5231
0.7	90	544	761	1051	1341	1631	1920	2210	2428	2718	3007	3297	3587	3877	4167	4457	4674	4964
1	100	251	538	824	1111	1398	1684	1971	2186	2473	2759	3046	3333	3619	3906	4121	4408	4694
1.5	111		247	530	813	1095	1378	1661	1873	2155	2438	2721	3003	3286	3569	3851	4134	4417
2	120			245	524	804	1083	1363	1642	1922	2202	2481	2761	3040	3320	3599	3879	4159
3	134				103	378	721	996	1271	1545	1820	2095	2369	2644	2919	3194	3468	3743
4	144					102	440	779	982	1253	1524	1795	2066	2337	2675	2946	3217	3488
5	152						167	435	703	1037	1305	1573	1840	2108	2443	2710	2978	3246
6	159							232	563	828	1092	1357	1622	1953	2218	2483	2748	3079
7	165							98	361	623	951	1213	1475	1738	2066	2328	2590	2918
8	170								227	487	747	1072	1332	1592	1917	2177	2437	2762
9	175								97	354	612	935	1192	1450	1772	2030	2288	2610
10	180									224	480	799	1055	1375	1631	1887	2206	2462
15	198											278	525	896	1143	1390	1699	1946
20	212												150	450	690	990	1290	1590
30	234														142	427	655	940
40	250																245	517
50	264																	130

Temperature (°C)		Equivalent gasconsumption (M€/year)																
Pressure (Bar)	Temperature (°C)	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	210	220	230	240	250	260	270
0.3	69	2.2	2.8	3.4	4.0	4.6	5.2	5.8	6.3	6.7	7.3	7.9	8.5	9.0	9.6	10.2	10.8	11.4
0.5	81	1.6	2.2	2.8	3.4	4.0	4.4	5.0	5.4	6.0	6.6	7.2	7.8	8.4	8.9	9.5	10.1	10.7
0.7	90	1.1	1.6	2.1	2.7	3.3	3.9	4.5	5.0	5.5	6.1	6.7	7.3	7.9	8.5	9.1	9.5	10.1
1	100	0.5	1.1	1.7	2.3	2.9	3.4	4.0	4.5	5.0	5.6	6.2	6.8	7.4	8.0	8.4	9.0	9.6
1.5	111		0.5	1.1	1.7	2.2	2.8	3.4	3.8	4.4	5.0	5.6	6.1	6.7	7.3	7.9	8.4	9.0
2	120			0.5	1.1	1.6	2.2	2.8	3.4	3.9	4.5	5.1	5.6	6.2	6.8	7.3	7.9	8.5
3	134				0.2	0.8	1.5	2.0	2.6	3.2	3.7	4.3	4.8	5.4	6.0	6.5	7.1	7.6
4	144					0.2	0.9	1.6	2.0	2.6	3.1	3.7	4.2	4.8	5.5	6.0	6.6	7.1
5	152						0.3	0.9	1.4	2.1	2.7	3.2	3.8	4.3	5.0	5.5	6.1	6.6
6	159							0.5	1.1	1.7	2.2	2.8	3.3	4.0	4.5	5.1	5.6	6.3
7	165							0.2	0.7	1.3	1.9	2.5	3.0	3.5	4.2	4.7	5.3	6.0
8	170								0.5	1.0	1.5	2.2	2.7	3.2	3.9	4.4	5.0	5.6
9	175								0.2	0.7	1.2	1.9	2.4	3.0	3.6	4.1	4.7	5.3
10	180									0.5	1.0	1.6	2.2	2.8	3.3	3.8	4.5	5.0
15	198											0.6	1.1	1.8	2.3	2.8	3.5	4.0
20	212												0.3	0.9	1.4	2.0	2.6	3.2
30	234														0.3	0.9	1.3	1.9
40	250																0.5	1.1
50	264																	0.3

Temperature (°C)		Maximum amount of steam that can be produced (ton/h)																
Pressure (Bar)	Temperature (°C)	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	210	220	230	240	250	260	270
0.3	69	17	21	26	30	35	40	44	48	51	56	60	65	68	73	77	82	86
0.5	81	12	17	21	26	30	34	38	42	46	51	56	60	65	68	73	77	82
0.7	90	9	12	17	21	26	30	35	38	43	48	52	57	61	66	70	74	78
1	100	4	9	13	18	22	27	32	35	40	44	49	53	58	62	66	70	75
1.5	111		4	9	13	18	22	27	30	35	40	44	49	53	58	62	67	72
2	120			4	9	13	18	22	27	32	36	41	45	50	54	59	64	68
3	134				2	6	12	17	21	26	30	35	40	44	49	53	58	62
4	144					2	8	13	17	21	26	30	35	40	45	50	54	59
5	152						3	8	12	18	22	27	32	36	42	46	51	56
6	159							4	10	14	19	24	28	34	38	43	48	53
7	165							2	6	11	17	21	26	30	36	41	45	51
8	170								4	9	13	19	24	28	34	38	43	49
9	175								2	6	11	17	21	26	32	36	41	46
10	180									4	9	14	19	25	29	34	40	44
15	198											5	10	17	21	26	32	36
20	212												3	9	13	19	25	30
30	234													-1	3	9	13	19
40	250																5	11
50	264																	3

Temperature (°C)		Maximum thermal power output (MW)																
Pressure (Bar)	Temperature (°C)	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	210	220	230	240	250	260	270
0.3	69	11	14	17	20	23	26	29	31	33	36	39	42	44	47	50	53	56
0.5	81	8	11	14	17	19	22	25	27	30	33	36	38	41	44	47	49	52
0.7	90	5	8	11	13	16	19	22	24	27	30	33	36	39	42	45	47	50
1	100	3	5	8	11	14	17	20	22	25	28	31	33	36	39	41	44	47
1.5	111		3	5	8	11	14	17	19	22	24	27	30	33	36	39	41	44
2	120			2	5	8	11	14	16	19	22	25	28	30	33	36	39	42
3	134				1	4	7	10	13	15	18	21	24	26	29	32	35	37
4	144					1	4	8	10	13	15	18	21	23	27	30	32	35
5	152						2	4	7	10	13	16	18	21	24	27	30	32
6	159							2	6	8	11	14	16	20	22	25	28	31
7	165							1	4	6	10	12	15	17	21	23	26	29
8	170								2	5	8	11	13	16	19	22	24	28
9	175								1	4	6	9	12	15	18	20	23	26
10	180									2	5	8	11	14	16	19	22	25
15	198											3	5	9	11	14	17	20
20	212												2	5	7	10	13	16
30	234														1	4	7	9
40	250																2	5
50	264																	1

Temperature (°C)		Equivalent gasconsumption (Nm ³ /h)																
Pressure (Bar)	Temperature (°C)	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	210	220	230	240	250	260	270
0.3	69	1234	1573	1912	2251	2590	2928	3267	3522	3776	4115	4454	4792	5047	5386	5724	6063	6402
0.5	81	883	1218	1552	1887	2221	2472	2806	3057	3392	3726	4061	4395	4730	4981	5315	5649	5984
0.7	90	626	875	1206	1537	1869	2200	2531	2780	3111	3442	3774	4105	4436	4767	5099	5347	5678
1	100	292	619	947	1275	1602	1930	2258	2503	2831	3158	3486	3814	4141	4469	4715	5042	5370
1.5	111		288	611	934	1257	1580	1903	2145	2468	2791	3114	3437	3761	4084	4407	4730	5053
2	120			285	604	924	1243	1563	1882	2202	2521	2841	3160	3480	3799	4119	4438	4758
3	134				123	437	829	1143	1457	1771	2085	2399	2713	3027	3341	3655	3969	4283
4	144					121	508	895	1127	1437	1746	2056	2366	2675	3062	3372	3681	3991
5	152						196	502	808	1190	1496	1802	2108	2414	2796	3102	3408	3714
6	159							270	648	951	1253	1556	1859	2237	2540	2842	3145	3523
7	165								117	417	717	1091	1391	1691	1991	2365	2665	2965
8	170									265	562	859	1230	1527	1824	2196	2493	2790
9	175									115	410	704	1073	1367	1662	2030	2325	2620
10	180										260	553	918	1210	1576	1868	2161	2526
15	198												322	605	1028	1311	1593	1946
20	212													176	519	793	1136	1478
30	234															167	492	753
40	250																	284
50	264																	152

Temperature (°C)		Equivalent gasconsumption (M€/year)																
Pressure (Bar)	Temperature (°C)	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	210	220	230	240	250	260	270
0.3	69	2.5	3.2	3.9	4.6	5.3	6.0	6.7	7.2	7.7	8.4	9.1	9.8	10.3	11.0	11.7	12.4	13.1
0.5	81	1.8	2.5	3.2	3.8	4.5	5.0	5.7	6.2	6.9	7.6	8.3	9.0	9.6	10.2	10.8	11.5	12.2
0.7	90	1.3	1.8	2.5	3.1	3.8	4.5	5.2	5.7	6.3	7.0	7.7	8.4	9.0	9.7	10.4	10.9	11.6
1	100	0.6	1.3	1.9	2.6	3.3	3.9	4.6	5.1	5.8	6.4	7.1	7.8	8.4	9.1	9.6	10.3	11.0
1.5	111		0.6	1.2	1.9	2.6	3.2	3.9	4.4	5.0	5.7	6.4	7.0	7.7	8.3	9.0	9.6	10.3
2	120			0.6	1.2	1.9	2.5	3.2	3.8	4.5	5.1	5.8	6.4	7.1	7.8	8.4	9.1	9.7
3	134				0.3	0.9	1.7	2.3	3.0	3.6	4.3	4.9	5.5	6.2	6.8	7.5	8.1	8.7
4	144					0.2	1.0	1.8	2.3	2.9	3.6	4.2	4.8	5.5	6.2	6.9	7.5	8.1
5	152						0.4	1.0	1.6	2.4	3.1	3.7	4.3	4.9	5.7	6.3	7.0	7.6
6	159							0.5	1.3	1.9	2.6	3.2	3.8	4.6	5.2	5.8	6.4	7.2
7	165								0.2	0.9	1.5	2.2	2.8	3.4	4.1	4.8	5.4	6.0
8	170									0.5	1.1	1.8	2.5	3.1	3.7	4.5	5.1	5.7
9	175										0.2	0.8	1.4	2.2	2.8	3.4	4.1	4.7
10	180											0.5	1.1	1.9	2.5	3.2	3.8	4.4
15	198													0.7	1.2	2.1	2.7	3.3
20	212														0.4	1.1	1.6	2.3
30	234															0.3	1.0	1.5
40	250																	0.6
50	264																	0.3

Temperature (°C)		Maximum amount of steam that can be produced (ton/h)																
Pressure (Bar)	Temperature (°C)	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	210	220	230	240	250	260	270
0.3	69	19	24	29	34	39	45	50	54	57	63	68	73	77	82	87	92	97
0.5	81	14	19	24	29	34	38	43	47	52	57	63	68	73	77	82	87	92
0.7	90	10	14	19	24	29	34	39	43	48	54	59	64	69	74	79	83	88
1	100	5	10	15	20	25	30	36	39	45	50	55	60	65	70	74	79	84
1.5	111		5	10	15	20	25	30	34	39	45	50	55	60	65	70	75	81
2	120			5	10	15	20	25	30	36	41	46	51	56	61	66	72	77
3	134				2	7	14	19	24	29	34	39	45	50	55	60	65	70
4	144					2	9	15	19	24	29	34	39	45	51	56	61	66
5	152						3	9	14	20	25	30	36	41	47	52	57	63
6	159							5	11	16	21	27	32	38	43	48	54	60
7	165							2	7	12	19	24	29	34	41	46	51	57
8	170								5	10	15	21	27	32	38	43	48	55
9	175								2	7	12	19	24	29	36	41	46	52
10	180									5	10	16	21	28	33	38	45	50
15	198											6	11	19	24	29	36	41
20	212												3	10	15	21	28	34
30	234														3	10	15	21
40	250																6	12
50	264																	3

Temperature (°C)		Maximum thermal power output (MW)																
Pressure (Bar)	Temperature (°C)	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	210	220	230	240	250	260	270
0.3	69	12	16	19	22	26	29	32	35	37	41	44	47	50	53	56	60	63
0.5	81	9	12	15	19	22	24	28	30	33	37	40	43	47	49	52	56	59
0.7	90	6	9	12	15	18	22	25	27	31	34	37	40	44	47	50	53	56
1	100	3	6	9	13	16	19	22	25	28	31	34	38	41	44	46	50	53
1.5	111		3	6	9	12	16	19	21	24	28	31	34	37	40	43	47	50
2	120			3	6	9	12	15	19	22	25	28	31	34	37	41	44	47
3	134				1	4	8	11	14	17	21	24	27	30	33	36	39	42
4	144					1	5	9	11	14	17	20	23	26	30	33	36	39
5	152						2	5	8	12	15	18	21	24	28	31	34	37
6	159							3	6	9	12	15	18	22	25	28	31	35
7	165							1	4	7	11	14	17	20	23	26	29	33
8	170								3	6	8	12	15	18	22	25	28	31
9	175								1	4	7	11	13	16	20	23	26	29
10	180									3	5	9	12	16	18	21	25	28
15	198											3	6	10	13	16	19	22
20	212												2	5	8	11	15	18
30	234														2	5	7	11
40	250																3	6
50	264																	2

Temperature (°C)		Equivalent gasconsumption (Nm3/h)																
Pressure (Bar)	Temperature (°C)	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	210	220	230	240	250	260	270
0.3	69	1393	1774	2155	2537	2918	3299	3680	3966	4252	4634	5015	5396	5682	6063	6445	6826	7207
0.5	81	998	1374	1751	2127	2503	2786	3162	3444	3820	4197	4573	4949	5325	5608	5984	6360	6737
0.7	90	709	989	1361	1734	2107	2479	2852	3132	3504	3877	4250	4622	4995	5368	5740	6020	6393
1	100	333	701	1070	1438	1807	2176	2544	2821	3189	3558	3926	4295	4663	5032	5308	5677	6046
1.5	111		328	692	1055	1418	1782	2145	2418	2781	3145	3508	3872	4235	4598	4962	5325	5689
2	120			324	684	1043	1403	1762	2122	2481	2841	3200	3559	3919	4278	4638	4997	5357
3	134				142	495	937	1290	1643	1997	2350	2703	3056	3410	3763	4116	4469	4822
4	144					140	576	1011	1272	1621	1969	2317	2665	3014	3449	3797	4146	4494
5	152						225	569	913	1343	1687	2031	2376	2720	3150	3494	3838	4182
6	159							307	733	1074	1414	1755	2095	2521	2861	3202	3542	3968
7	165							136	473	810	1232	1569	1906	2244	2665	3002	3340	3761
8	170								302	636	970	1388	1722	2057	2474	2809	3143	3561
9	175								134	465	796	1211	1542	1874	2288	2620	2951	3365
10	180									297	626	1037	1366	1777	2106	2435	2846	3175
15	198											366	684	1161	1478	1796	2193	2511
20	212												201	587	896	1281	1667	2053
30	234														191	558	851	1217
40	250																322	672
50	264																	175

Temperature (°C)		Equivalent gasconsumption (M€/year)																
Pressure (Bar)	Temperature (°C)	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	210	220	230	240	250	260	270
0.3	69	2.8	3.6	4.4	5.2	6.0	6.7	7.5	8.1	8.7	9.5	10.2	11.0	11.6	12.4	13.1	13.9	14.7
0.5	81	2.0	2.8	3.6	4.3	5.1	5.7	6.5	7.0	7.8	8.6	9.3	10.1	10.9	11.4	12.2	13.0	13.7
0.7	90	1.4	2.0	2.8	3.5	4.3	5.1	5.8	6.4	7.1	7.9	8.7	9.4	10.2	11.0	11.7	12.3	13.0
1	100	0.7	1.4	2.2	2.9	3.7	4.4	5.2	5.8	6.5	7.3	8.0	8.8	9.5	10.3	10.8	11.6	12.3
1.5	111		0.7	1.4	2.2	2.9	3.6	4.4	4.9	5.7	6.4	7.2	7.9	8.6	9.4	10.1	10.9	11.6
2	120			0.7	1.4	2.1	2.9	3.6	4.3	5.1	5.8	6.5	7.3	8.0	8.7	9.5	10.2	10.9
3	134				0.3	1.0	1.9	2.6	3.4	4.1	4.8	5.5	6.2	7.0	7.7	8.4	9.1	9.8
4	144					0.3	1.2	2.1	2.6	3.3	4.0	4.7	5.4	6.1	7.0	7.7	8.5	9.2
5	152						0.5	1.2	1.9	2.7	3.4	4.1	4.8	5.5	6.4	7.1	7.8	8.5
6	159							0.6	1.5	2.2	2.9	3.6	4.3	5.1	5.8	6.5	7.2	8.1
7	165							0.3	1.0	1.7	2.5	3.2	3.9	4.6	5.4	6.1	6.8	7.7
8	170								0.6	1.3	2.0	2.8	3.5	4.2	5.0	5.7	6.4	7.3
9	175								0.3	0.9	1.6	2.5	3.1	3.8	4.7	5.3	6.0	6.9
10	180									0.6	1.3	2.1	2.8	3.6	4.3	5.0	5.8	6.5
15	198											0.7	1.4	2.4	3.0	3.7	4.5	5.1
20	212												0.4	1.2	1.8	2.6	3.4	4.2
30	234														0.4	1.1	1.7	2.5
40	250																0.7	1.4
50	264																	0.4

Temperature (°C)		Maximum amount of steam that can be produced (ton/h)																
Pressure (Bar)	Temperature (°C)	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	210	220	230	240	250	260	270
0.3	69	21	27	32	38	44	50	55	60	64	70	75	81	85	91	97	102	108
0.5	81	15	21	27	32	38	42	48	52	58	64	70	75	81	85	91	97	102
0.7	90	11	15	21	27	32	38	44	48	54	60	65	71	77	82	88	92	98
1	100	5	11	17	22	28	34	40	44	50	55	61	67	72	78	82	88	94
1.5	111		5	11	17	22	28	34	38	44	50	55	61	67	72	78	84	90
2	120			5	11	17	22	28	34	40	45	51	57	62	68	74	80	85
3	134				2	8	15	21	27	32	38	44	50	55	61	67	72	78
4	144					2	10	17	21	27	32	38	44	50	57	62	68	74
5	152						4	10	15	22	28	34	40	45	52	58	64	70
6	159							5	12	18	24	30	35	42	48	54	60	67
7	165							2	8	14	21	27	32	38	45	51	57	64
8	170								5	11	17	24	30	35	42	48	54	61
9	175								2	8	14	21	27	32	40	45	51	58
10	180									5	11	18	24	31	37	42	50	55
15	198											7	12	21	27	32	40	45
20	212												4	11	17	24	31	38
30	234														4	11	17	24
40	250																7	14
50	264																	4

Temperature (°C)		Maximum thermal power output (MW)																
Pressure (Bar)	Temperature (°C)	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	210	220	230	240	250	260	270
0.3	69	14	17	21	25	28	32	36	39	41	45	49	52	55	59	63	66	70
0.5	81	10	13	17	21	24	27	31	34	37	41	44	48	52	55	58	62	66
0.7	90	7	10	13	17	21	24	28	30	34	38	41	45	49	52	56	59	62
1	100	3	7	10	14	18	21	25	27	31	35	38	42	45	49	52	55	59
1.5	111		3	7	10	14	17	21	24	27	31	34	38	41	45	48	52	55
2	120			3	7	10	14	17	21	24	28	31	35	38	42	45	49	52
3	134				1	5	9	13	16	19	23	26	30	33	37	40	43	47
4	144					1	6	10	12	16	19	23	26	29	34	37	40	44
5	152						2	6	9	13	16	20	23	26	31	34	37	41
6	159							3	7	10	14	17	20	25	28	31	34	39
7	165							1	5	8	12	15	19	22	26	29	33	37
8	170								3	6	9	14	17	20	24	27	31	35
9	175								1	5	8	12	15	18	22	25	29	33
10	180									3	6	10	13	17	21	24	28	31
15	198											4	7	11	14	17	21	24
20	212												2	6	9	12	16	20
30	234														2	5	8	12
40	250																3	7
50	264																	2

Temperature (°C)		Equivalent gasconsumption (Nm ³ /h)																
Pressure (Bar)	Temperature (°C)	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	210	220	230	240	250	260	270
0.3	69	1552	1975	2399	2823	3246	3670	4093	4411	4729	5153	5576	6000	6318	6741	7165	7588	8012
0.5	81	1113	1531	1949	2367	2786	3099	3517	3831	4249	4667	5085	5503	5921	6235	6653	7071	7489
0.7	90	792	1103	1517	1931	2345	2759	3173	3484	3898	4312	4726	5140	5554	5968	6382	6693	7107
1	100	374	783	1193	1602	2012	2421	2831	3138	3548	3957	4367	4776	5186	5595	5902	6312	6721
1.5	111		368	772	1176	1580	1984	2388	2690	3094	3498	3902	4306	4709	5113	5517	5921	6325
2	120			364	764	1163	1563	1962	2361	2761	3160	3559	3959	4358	4758	5157	5556	5956
3	134				162	554	1045	1437	1830	2222	2615	3007	3400	3792	4185	4577	4970	5362
4	144					160	643	1127	1417	1804	2191	2578	2965	3352	3836	4223	4610	4997
5	152						253	636	1018	1496	1878	2261	2643	3026	3504	3886	4268	4651
6	159							345	818	1197	1575	1953	2332	2805	3183	3561	3940	4412
7	165							155	529	904	1372	1747	2122	2497	2965	3340	3714	4183
8	170								339	710	1082	1546	1917	2289	2753	3124	3496	3960
9	175								152	520	889	1349	1717	2086	2546	2914	3283	3743
10	180									333	699	1156	1521	1978	2343	2709	3166	3531
15	198											410	764	1293	1646	1999	2441	2794
20	212												227	656	998	1427	1855	2284
30	234														216	623	948	1355
40	250																361	750
50	264																	197

Temperature (°C)		Equivalent gasconsumption (M€/year)																
Pressure (Bar)	Temperature (°C)	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	210	220	230	240	250	260	270
0.3	69	3.2	4.0	4.9	5.8	6.6	7.5	8.4	9.0	9.6	10.5	11.4	12.2	12.9	13.8	14.6	15.5	16.3
0.5	81	2.3	3.1	4.0	4.8	5.7	6.3	7.2	7.8	8.7	9.5	10.4	11.2	12.1	12.7	13.6	14.4	15.3
0.7	90	1.6	2.2	3.1	3.9	4.8	5.6	6.5	7.1	8.0	8.8	9.6	10.5	11.3	12.2	13.0	13.7	14.5
1	100	0.8	1.6	2.4	3.3	4.1	4.9	5.8	6.4	7.2	8.1	8.9	9.7	10.6	11.4	12.0	12.9	13.7
1.5	111		0.8	1.6	2.4	3.2	4.0	4.9	5.5	6.3	7.1	8.0	8.8	9.6	10.4	11.3	12.1	12.9
2	120			0.7	1.6	2.4	3.2	4.0	4.8	5.6	6.4	7.3	8.1	8.9	9.7	10.5	11.3	12.1
3	134				0.3	1.1	2.1	2.9	3.7	4.5	5.3	6.1	6.9	7.7	8.5	9.3	10.1	10.9
4	144					0.3	1.3	2.3	2.9	3.7	4.5	5.3	6.0	6.8	7.8	8.6	9.4	10.2
5	152						0.5	1.3	2.1	3.1	3.8	4.6	5.4	6.2	7.1	7.9	8.7	9.5
6	159							0.7	1.7	2.4	3.2	4.0	4.8	5.7	6.5	7.3	8.0	9.0
7	165							0.3	1.1	1.8	2.8	3.6	4.3	5.1	6.0	6.8	7.6	8.5
8	170								0.7	1.4	2.2	3.2	3.9	4.7	5.6	6.4	7.1	8.1
9	175								0.3	1.1	1.8	2.8	3.5	4.3	5.2	5.9	6.7	7.6
10	180									0.7	1.4	2.4	3.1	4.0	4.8	5.5	6.5	7.2
15	198											0.8	1.6	2.6	3.4	4.1	5.0	5.7
20	212												0.5	1.3	2.0	2.9	3.8	4.7
30	234														0.4	1.3	1.9	2.8
40	250																0.7	1.5
50	264																	0.4

Temperature (°C)		Maximum amount of steam that can be produced (ton/h)																
Pressure (Bar)	Temperature (°C)	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	210	220	230	240	250	260	270
0.3	69	23	29	36	42	48	55	61	66	70	77	83	89	94	100	106	113	119
0.5	81	17	23	29	36	42	47	53	58	64	70	77	83	89	94	100	106	113
0.7	90	12	17	23	29	36	42	48	53	59	66	72	78	84	91	97	102	108
1	100	6	12	18	25	31	37	44	48	55	61	67	73	80	86	91	97	103
1.5	111		6	12	18	25	31	37	42	48	55	61	67	73	80	86	92	99
2	120			6	12	18	25	31	37	44	50	56	62	69	75	81	88	94
3	134				3	9	17	23	29	36	42	48	55	61	67	73	80	86
4	144					3	11	18	23	29	36	42	48	55	62	69	75	81
5	152						4	11	17	25	31	37	44	50	58	64	70	77
6	159							6	14	20	26	33	39	47	53	59	66	73
7	165							3	9	15	23	29	36	42	50	56	62	70
8	170								6	12	18	26	33	39	47	53	59	67
9	175								3	9	15	23	29	36	44	50	56	64
10	180									6	12	20	26	34	40	47	55	61
15	198											7	14	23	29	36	44	50
20	212												4	12	18	26	34	42
30	234														4	12	18	26
40	250																7	15
50	264																	4

Temperature (°C)		Maximum thermal power output (MW)																
Pressure (Bar)	Temperature (°C)	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	210	220	230	240	250	260	270
0.3	69	15	19	23	27	31	35	39	42	46	50	54	58	61	65	69	73	77
0.5	81	11	15	19	23	27	30	34	37	41	45	49	53	57	60	64	68	72
0.7	90	8	11	15	19	23	27	31	34	38	42	46	50	53	57	61	64	68
1	100	4	8	12	15	19	23	27	30	34	38	42	46	50	54	57	61	65
1.5	111		4	7	11	15	19	23	26	30	34	38	41	45	49	53	57	61
2	120			4	7	11	15	19	23	27	30	34	38	42	46	50	54	57
3	134				2	5	10	14	18	21	25	29	33	37	40	44	48	52
4	144					2	6	11	14	17	21	25	29	32	37	41	44	48
5	152						2	6	10	14	18	22	25	29	34	37	41	45
6	159							3	8	12	15	19	22	27	31	34	38	42
7	165							2	5	9	13	17	20	24	29	32	36	40
8	170								3	7	10	15	18	22	27	30	34	38
9	175								1	5	9	13	17	20	25	28	32	36
10	180									3	7	11	15	19	23	26	30	34
15	198											4	7	12	16	19	24	27
20	212												2	6	10	14	18	22
30	234														2	6	9	13
40	250																4	7
50	264																	2

Temperature (°C)		Equivalent gasconsumption (Nm ³ /h)																
Pressure (Bar)	Temperature (°C)	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	210	220	230	240	250	260	270
0.3	69	1710	2176	2642	3108	3574	4040	4506	4856	5205	5671	6137	6604	6953	7419	7885	8351	8817
0.5	81	1228	1688	2148	2608	3068	3413	3873	4218	4677	5137	5597	6057	6517	6862	7322	7782	8242
0.7	90	875	1216	1672	2127	2583	3038	3494	3836	4291	4747	5202	5658	6113	6569	7024	7366	7821
1	100	415	865	1316	1766	2217	2667	3118	3455	3906	4356	4807	5257	5708	6158	6496	6947	7397
1.5	111		409	853	1297	1741	2186	2630	2963	3407	3851	4296	4740	5184	5628	6072	6517	6961
2	120			404	844	1283	1722	2162	2601	3040	3480	3919	4358	4798	5237	5676	6115	6555
3	134				182	613	1153	1585	2016	2448	2880	3311	3743	4175	4607	5038	5470	5902
4	144					179	711	1243	1563	1988	2414	2840	3265	3691	4223	4649	5075	5500
5	152						282	703	1123	1649	2070	2490	2911	3332	3857	4278	4699	5119
6	159							383	903	1319	1736	2152	2568	3088	3504	3921	4337	4857
7	165							173	585	998	1513	1925	2337	2749	3265	3677	4089	4604
8	170								376	785	1193	1704	2112	2521	3031	3440	3849	4359
9	175								170	575	981	1487	1892	2297	2804	3209	3614	4120
10	180									370	772	1274	1676	2179	2581	2983	3485	3887
15	198											455	843	1426	1814	2202	2688	3076
20	212												253	724	1101	1573	2044	2515
30	234														240	688	1046	1494
40	250																400	828
50	264																	219

Temperature (°C)		Equivalent gasconsumption (M€/year)																
Pressure (Bar)	Temperature (°C)	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	210	220	230	240	250	260	270
0.3	69	3.5	4.4	5.4	6.3	7.3	8.2	9.2	9.9	10.6	11.6	12.5	13.5	14.2	15.1	16.1	17.0	18.0
0.5	81	2.5	3.4	4.4	5.3	6.3	7.0	7.9	8.6	9.5	10.5	11.4	12.4	13.3	14.0	14.9	15.9	16.8
0.7	90	1.8	2.5	3.4	4.3	5.3	6.2	7.1	7.8	8.8	9.7	10.6	11.5	12.5	13.4	14.3	15.0	16.0
1	100	0.8	1.8	2.7	3.6	4.5	5.4	6.4	7.0	8.0	8.9	9.8	10.7	11.6	12.6	13.3	14.2	15.1
1.5	111		0.8	1.7	2.6	3.6	4.5	5.4	6.0	7.0	7.9	8.8	9.7	10.6	11.5	12.4	13.3	14.2
2	120			0.8	1.7	2.6	3.5	4.4	5.3	6.2	7.1	8.0	8.9	9.8	10.7	11.6	12.5	13.4
3	134				0.4	1.3	2.4	3.2	4.1	5.0	5.9	6.8	7.6	8.5	9.4	10.3	11.2	12.0
4	144					0.4	1.5	2.5	3.2	4.1	4.9	5.8	6.7	7.5	8.6	9.5	10.4	11.2
5	152						0.6	1.4	2.3	3.4	4.2	5.1	5.9	6.8	7.9	8.7	9.6	10.4
6	159							0.8	1.8	2.7	3.5	4.4	5.2	6.3	7.1	8.0	8.8	9.9
7	165							0.4	1.2	2.0	3.1	3.9	4.8	5.6	6.7	7.5	8.3	9.4
8	170								0.8	1.6	2.4	3.5	4.3	5.1	6.2	7.0	7.9	8.9
9	175								0.3	1.2	2.0	3.0	3.9	4.7	5.7	6.5	7.4	8.4
10	180									0.8	1.6	2.6	3.4	4.4	5.3	6.1	7.1	7.9
15	198											0.9	1.7	2.9	3.7	4.5	5.5	6.3
20	212												0.5	1.5	2.2	3.2	4.2	5.1
30	234														0.5	1.4	2.1	3.0
40	250																0.8	1.7
50	264																	0.4

Temperature (°C)		Maximum amount of steam that can be produced (ton/h)																
Pressure (Bar)	Temperature (°C)	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	210	220	230	240	250	260	270
0.3	69	25	32	39	46	53	60	66	72	77	84	90	97	102	109	116	123	130
0.5	81	18	25	32	39	46	51	58	63	70	77	84	90	97	102	109	116	123
0.7	90	13	18	25	32	39	46	53	58	65	72	78	85	92	99	106	111	118
1	100	6	13	20	27	34	41	48	53	60	66	73	80	87	94	99	106	113
1.5	111		6	13	20	27	34	41	46	53	60	66	73	80	87	94	101	108
2	120			6	13	20	27	34	41	48	54	61	68	75	82	89	96	102
3	134				3	10	18	25	32	39	46	53	60	66	73	80	87	94
4	144					3	12	20	25	32	39	46	53	60	68	75	82	89
5	152						5	12	18	27	34	41	48	54	63	70	77	84
6	159							6	15	22	29	36	42	51	58	65	72	80
7	165							3	10	17	25	32	39	46	54	61	68	77
8	170								6	13	20	29	36	42	51	58	65	73
9	175								3	10	17	25	32	39	48	54	61	70
10	180									6	13	22	29	37	44	51	60	66
15	198											8	15	25	32	39	48	54
20	212												5	13	20	29	37	46
30	234														5	13	20	29
40	250																8	17
50	264																	5

Temperature (°C)		Maximum thermal power output (MW)																
Pressure (Bar)	Temperature (°C)	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	210	220	230	240	250	260	270
0.3	69	16	21	25	30	34	39	43	46	50	54	59	63	66	71	75	80	84
0.5	81	12	16	21	25	29	33	37	40	45	49	53	58	62	66	70	74	79
0.7	90	8	12	16	20	25	29	33	37	41	45	50	54	58	63	67	70	75
1	100	4	8	13	17	21	25	30	33	37	42	46	50	55	59	62	66	71
1.5	111		4	8	12	17	21	25	28	33	37	41	45	50	54	58	62	66
2	120			4	8	12	16	21	25	29	33	37	42	46	50	54	58	63
3	134				2	6	11	15	19	23	28	32	36	40	44	48	52	56
4	144					2	7	12	15	19	23	27	31	35	40	44	48	53
5	152						3	7	11	16	20	24	28	32	37	41	45	49
6	159							4	9	13	17	21	25	30	33	37	41	46
7	165							2	6	10	14	18	22	26	31	35	39	44
8	170								4	8	11	16	20	24	29	33	37	42
9	175								2	6	9	14	18	22	27	31	35	39
10	180									4	7	12	16	21	25	28	33	37
15	198											4	8	14	17	21	26	29
20	212												2	7	11	15	20	24
30	234														2	7	10	14
40	250																4	8
50	264																	2

Temperature (°C)		Equivalent gasconsumption (Nm ³ /h)																
Pressure (Bar)	Temperature (°C)	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	210	220	230	240	250	260	270
0.3	69	1869	2378	2886	3394	3903	4411	4920	5301	5682	6190	6699	7207	7588	8097	8605	9114	9622
0.5	81	1343	1845	2347	2848	3350	3726	4228	4604	5106	5608	6109	6611	7113	7489	7991	8493	8994
0.7	90	958	1330	1827	2324	2821	3318	3815	4188	4685	5181	5678	6175	6672	7169	7666	8039	8536
1	100	456	947	1438	1930	2421	2913	3404	3773	4264	4756	5247	5738	6230	6721	7090	7581	8073
1.5	111		449	934	1418	1903	2388	2872	3236	3720	4205	4689	5174	5658	6143	6628	7112	7597
2	120			444	924	1403	1882	2361	2841	3320	3799	4278	4758	5237	5716	6195	6675	7154
3	134				201	672	1261	1732	2203	2674	3145	3616	4086	4557	5028	5499	5970	6441
4	144					198	779	1359	1708	2172	2636	3101	3565	4030	4610	5075	5539	6003
5	152						311	770	1228	1802	2261	2720	3179	3637	4211	4670	5129	5588
6	159							421	988	1442	1896	2350	2805	3372	3826	4280	4734	5302
7	165							192	642	1091	1653	2103	2553	3002	3564	4014	4464	5026
8	170								413	859	1305	1862	2307	2753	3310	3756	4201	4758
9	175								189	631	1073	1625	2067	2509	3062	3504	3946	4498
10	180									407	845	1393	1832	2380	2818	3257	3805	4244
15	198											499	922	1558	1982	2405	2935	3359
20	212												279	793	1204	1718	2233	2747
30	234														265	753	1144	1632
40	250																439	905
50	264																	242

Temperature (°C)		Equivalent gasconsumption (M€/year)																
Pressure (Bar)	Temperature (°C)	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	210	220	230	240	250	260	270
0.3	69	3.8	4.9	5.9	6.9	8.0	9.0	10.0	10.8	11.6	12.6	13.7	14.7	15.5	16.5	17.6	18.6	19.6
0.5	81	2.7	3.8	4.8	5.8	6.8	7.6	8.6	9.4	10.4	11.4	12.5	13.5	14.5	15.3	16.3	17.3	18.3
0.7	90	2.0	2.7	3.7	4.7	5.8	6.8	7.8	8.5	9.6	10.6	11.6	12.6	13.6	14.6	15.6	16.4	17.4
1	100	0.9	1.9	2.9	3.9	4.9	5.9	6.9	7.7	8.7	9.7	10.7	11.7	12.7	13.7	14.5	15.5	16.5
1.5	111		0.9	1.9	2.9	3.9	4.9	5.9	6.6	7.6	8.6	9.6	10.6	11.5	12.5	13.5	14.5	15.5
2	120			0.9	1.9	2.9	3.8	4.8	5.8	6.8	7.8	8.7	9.7	10.7	11.7	12.6	13.6	14.6
3	134				0.4	1.4	2.6	3.5	4.5	5.5	6.4	7.4	8.3	9.3	10.3	11.2	12.2	13.1
4	144					0.4	1.6	2.8	3.5	4.4	5.4	6.3	7.3	8.2	9.4	10.4	11.3	12.2
5	152						0.6	1.6	2.5	3.7	4.6	5.5	6.5	7.4	8.6	9.5	10.5	11.4
6	159							0.9	2.0	2.9	3.9	4.8	5.7	6.9	7.8	8.7	9.7	10.8
7	165							0.4	1.3	2.2	3.4	4.3	5.2	6.1	7.3	8.2	9.1	10.3
8	170								0.8	1.8	2.7	3.8	4.7	5.6	6.8	7.7	8.6	9.7
9	175								0.4	1.3	2.2	3.3	4.2	5.1	6.2	7.1	8.0	9.2
10	180									0.8	1.7	2.8	3.7	4.9	5.7	6.6	7.8	8.7
15	198											1.0	1.9	3.2	4.0	4.9	6.0	6.9
20	212												0.6	1.6	2.5	3.5	4.6	5.6
30	234														0.5	1.5	2.3	3.3
40	250																0.9	1.8
50	264																	0.5

Temperature (°C)		Maximum amount of steam that can be produced (ton/h)																
Pressure (Bar)	Temperature (°C)	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	210	220	230	240	250	260	270
0.3	69	27	35	42	50	57	65	72	78	83	91	98	105	111	118	126	133	141
0.5	81	20	27	35	42	50	55	63	68	76	83	91	98	105	111	118	126	133
0.7	90	14	20	27	35	42	50	57	63	70	78	85	92	100	107	115	120	128
1	100	7	14	22	29	37	44	52	57	65	72	79	87	94	102	107	115	122
1.5	111		7	14	22	29	37	44	50	57	65	72	79	87	94	102	109	117
2	120			7	14	22	29	37	44	52	59	66	74	81	89	96	104	111
3	134				3	11	20	27	35	42	50	57	65	72	79	87	94	102
4	144					3	13	22	27	35	42	50	57	65	74	81	89	96
5	152						5	13	20	29	37	44	52	59	68	76	83	91
6	159							7	16	24	31	39	46	55	63	70	78	87
7	165							3	11	18	27	35	42	50	59	66	74	83
8	170								7	14	22	31	39	46	55	63	70	79
9	175								3	11	18	27	35	42	52	59	66	76
10	180									7	14	24	31	40	48	55	65	72
15	198											9	16	27	35	42	52	59
20	212												5	14	22	31	40	50
30	234														5	14	22	31
40	250																9	18
50	264																	5

Temperature (°C)		Maximum thermal power output (MW)																
Pressure (Bar)	Temperature (°C)	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	210	220	230	240	250	260	270
0.3	69	18	23	27	32	37	42	47	50	54	59	64	68	72	77	82	86	91
0.5	81	13	18	22	27	32	35	40	44	48	53	58	63	67	71	76	81	85
0.7	90	9	13	17	22	27	31	36	40	44	49	54	59	63	68	73	76	81
1	100	4	9	14	18	23	28	32	36	40	45	50	54	59	64	67	72	77
1.5	111		4	9	13	18	23	27	31	35	40	44	49	54	58	63	67	72
2	120			4	9	13	18	22	27	31	36	41	45	50	54	59	63	68
3	134				2	6	12	16	21	25	30	34	39	43	48	52	57	61
4	144					2	7	13	16	21	25	29	34	38	44	48	53	57
5	152						3	7	12	17	21	26	30	35	40	44	49	53
6	159							4	9	14	18	22	27	32	36	41	45	50
7	165							2	6	10	16	20	24	28	34	38	42	48
8	170								4	8	12	18	22	26	31	36	40	45
9	175								2	6	10	15	20	24	29	33	37	43
10	180									4	8	13	17	23	27	31	36	40
15	198											5	9	15	19	23	28	32
20	212												3	8	11	16	21	26
30	234														3	7	11	15
40	250																4	9
50	264																	2

Temperature (°C)		Equivalent gasconsumption (Nm ³ /h)																
Pressure (Bar)	Temperature (°C)	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	210	220	230	240	250	260	270
0.3	69	2028	2579	3130	3680	4231	4782	5333	5746	6159	6709	7260	7811	8224	8775	9325	9876	10427
0.5	81	1458	2002	2545	3089	3632	4040	4583	4991	5535	6078	6622	7165	7709	8116	8660	9203	9747
0.7	90	1040	1444	1983	2521	3059	3598	4136	4540	5078	5616	6155	6693	7231	7770	8308	8712	9250
1	100	497	1029	1561	2094	2626	3158	3691	4090	4623	5155	5687	6220	6752	7284	7684	8216	8748
1.5	111		490	1015	1540	2065	2589	3114	3508	4033	4558	5083	5608	6133	6658	7183	7708	8233
2	120			484	1003	1523	2042	2561	3080	3599	4119	4638	5157	5676	6195	6715	7234	7753
3	134				221	731	1369	1879	2389	2899	3410	3920	4430	4940	5450	5960	6471	6981
4	144					218	847	1475	1853	2356	2859	3362	3865	4368	4997	5500	6003	6506
5	152						339	836	1334	1955	2452	2949	3446	3943	4565	5062	5559	6056
6	159							459	1074	1565	2057	2549	3041	3656	4148	4639	5131	5746
7	165							211	698	1185	1794	2281	2768	3255	3864	4351	4838	5447
8	170								450	933	1416	2019	2502	2985	3589	4071	4554	5158
9	175								207	686	1165	1763	2242	2721	3319	3798	4277	4876
10	180									443	918	1512	1987	2581	3056	3531	4125	4600
15	198											543	1002	1690	2149	2608	3182	3641
20	212												304	861	1307	1864	2421	2978
30	234														289	818	1241	1770
40	250																478	983
50	264																	264

Temperature (°C)		Equivalent gasconsumption (M€/year)																
Pressure (Bar)	Temperature (°C)	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	210	220	230	240	250	260	270
0.3	69	4.1	5.3	6.4	7.5	8.6	9.8	10.9	11.7	12.6	13.7	14.8	15.9	16.8	17.9	19.0	20.1	21.3
0.5	81	3.0	4.1	5.2	6.3	7.4	8.2	9.4	10.2	11.3	12.4	13.5	14.6	15.7	16.6	17.7	18.8	19.9
0.7	90	2.1	2.9	4.0	5.1	6.2	7.3	8.4	9.3	10.4	11.5	12.6	13.7	14.8	15.8	16.9	17.8	18.9
1	100	1.0	2.1	3.2	4.3	5.4	6.4	7.5	8.3	9.4	10.5	11.6	12.7	13.8	14.9	15.7	16.8	17.8
1.5	111		1.0	2.1	3.1	4.2	5.3	6.4	7.2	8.2	9.3	10.4	11.4	12.5	13.6	14.7	15.7	16.8
2	120			1.0	2.0	3.1	4.2	5.2	6.3	7.3	8.4	9.5	10.5	11.6	12.6	13.7	14.8	15.8
3	134				0.5	1.5	2.8	3.8	4.9	5.9	7.0	8.0	9.0	10.1	11.1	12.2	13.2	14.2
4	144					0.4	1.7	3.0	3.8	4.8	5.8	6.9	7.9	8.9	10.2	11.2	12.2	13.3
5	152						0.7	1.7	2.7	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0	9.3	10.3	11.3	12.4
6	159							0.9	2.2	3.2	4.2	5.2	6.2	7.5	8.5	9.5	10.5	11.7
7	165							0.4	1.4	2.4	3.7	4.7	5.6	6.6	7.9	8.9	9.9	11.1
8	170								0.9	1.9	2.9	4.1	5.1	6.1	7.3	8.3	9.3	10.5
9	175								0.4	1.4	2.4	3.6	4.6	5.6	6.8	7.7	8.7	9.9
10	180									0.9	1.9	3.1	4.1	5.3	6.2	7.2	8.4	9.4
15	198											1.1	2.0	3.4	4.4	5.3	6.5	7.4
20	212												0.6	1.8	2.7	3.8	4.9	6.1
30	234														0.6	1.7	2.5	3.6
40	250																1.0	2.0
50	264																	0.5

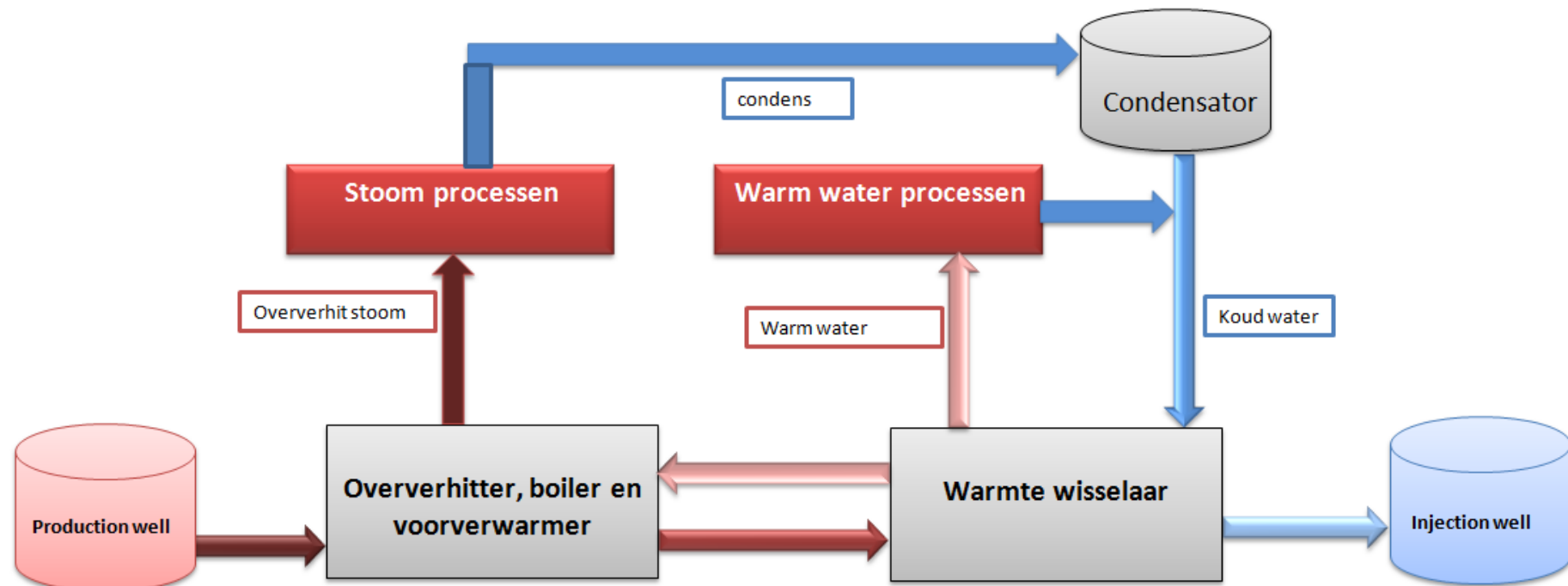
Temperature (°C)		Maximum amount of steam that can be produced (ton/h)																
Pressure (Bar)	Temperature (°C)	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	210	220	230	240	250	260	270
0.3	69	30	38	46	54	62	70	78	84	90	98	106	114	120	128	136	144	152
0.5	81	22	30	38	46	54	60	68	74	82	90	98	106	114	120	128	136	144
0.7	90	16	22	30	38	46	54	62	68	76	84	92	100	108	116	124	130	138
1	100	8	16	24	32	40	48	56	62	70	78	86	94	102	110	116	124	132
1.5	111		8	16	24	32	40	48	54	62	70	78	86	94	102	110	118	126
2	120			8	16	24	32	40	48	56	64	72	80	88	96	104	112	120
3	134				4	12	22	30	38	46	54	62	70	78	86	94	102	110
4	144					4	14	24	30	38	46	54	62	70	80	88	96	104
5	152						6	14	22	32	40	48	56	64	74	82	90	98
6	159							8	18	26	34	42	50	60	68	76	84	94
7	165							4	12	20	30	38	46	54	64	72	80	90
8	170								8	16	24	34	42	50	60	68	76	86
9	175								4	12	20	30	38	46	56	64	72	82
10	180									8	16	26	34	44	52	60	70	78
15	198											10	18	30	38	46	56	64
20	212												6	16	24	34	44	54
30	234														6	16	24	34
40	250																10	20
50	264																	6

Temperature (°C)		Maximum thermal power output (MW)																
Pressure (Bar)	Temperature (°C)	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	210	220	230	240	250	260	270
0.3	69	19	24	30	35	40	45	50	54	58	63	68	74	78	83	88	93	98
0.5	81	14	19	24	29	34	38	43	47	52	57	62	68	73	77	82	87	92
0.7	90	10	14	19	24	29	34	39	43	48	53	58	63	68	73	78	82	87
1	100	5	10	15	20	25	30	35	39	44	49	54	59	64	69	72	77	82
1.5	111		5	10	15	19	24	29	33	38	43	48	53	58	63	68	73	78
2	120			5	9	14	19	24	29	34	39	44	49	54	58	63	68	73
3	134				2	7	13	18	23	27	32	37	42	47	51	56	61	66
4	144					2	8	14	17	22	27	32	36	41	47	52	57	61
5	152						3	8	13	18	23	28	32	37	43	48	52	57
6	159							4	10	15	19	24	29	34	39	44	48	54
7	165							2	7	11	17	22	26	31	36	41	46	51
8	170								4	9	13	19	24	28	34	38	43	49
9	175								2	6	11	17	21	26	31	36	40	46
10	180									4	9	14	19	24	29	33	39	43
15	198											5	9	16	20	25	30	34
20	212												3	8	12	18	23	28
30	234														3	8	12	17
40	250																5	9
50	264																	3

Temperature (°C)		Equivalent gasconsumption (Nm3/h)																
Pressure (Bar)	Temperature (°C)	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	210	220	230	240	250	260	270
0.3	69	2187	2780	3373	3966	4559	5153	5746	6190	6635	7228	7821	8415	8859	9452	10046	10639	11232
0.5	81	1573	2158	2744	3329	3914	4353	4939	5378	5963	6548	7134	7719	8304	8743	9329	9914	10499
0.7	90	1123	1558	2138	2718	3297	3877	4457	4892	5471	6051	6631	7211	7790	8370	8950	9385	9964
1	100	538	1111	1684	2258	2831	3404	3978	4408	4981	5554	6128	6701	7274	7848	8278	8851	9424
1.5	111		530	1095	1661	2226	2791	3357	3781	4346	4911	5477	6042	6607	7173	7738	8303	8869
2	120			524	1083	1642	2202	2761	3320	3879	4438	4997	5556	6115	6675	7234	7793	8352
3	134				240	790	1477	2026	2576	3125	3674	4224	4773	5323	5872	6422	6971	7521
4	144					237	914	1592	1998	2540	3081	3623	4165	4707	5384	5926	6468	7010
5	152						368	903	1439	2108	2643	3179	3714	4249	4918	5454	5989	6525
6	159							497	1159	1688	2218	2748	3277	3940	4469	4999	5529	6191
7	165								230	754	1279	1934	2459	2984	3508	4164	4689	5213
8	170									487	1007	1527	2177	2697	3217	3867	4387	4907
9	175										226	741	1257	1901	2417	2933	3577	4093
10	180											480	991	1631	2142	2782	3293	3805
15	198													587	1081	1823	2317	2811
20	212														330	930	1410	2010
30	234																313	883
40	250																	517
50	264																	286

Temperature (°C)		Equivalent gasconsumption (M€/year)																
Pressure (Bar)	Temperature (°C)	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	210	220	230	240	250	260	270
0.3	69	4.5	5.7	6.9	8.1	9.3	10.5	11.7	12.6	13.5	14.7	16.0	17.2	18.1	19.3	20.5	21.7	22.9
0.5	81	3.2	4.4	5.6	6.8	8.0	8.9	10.1	11.0	12.2	13.4	14.6	15.7	16.9	17.8	19.0	20.2	21.4
0.7	90	2.3	3.2	4.4	5.5	6.7	7.9	9.1	10.0	11.2	12.3	13.5	14.7	15.9	17.1	18.3	19.1	20.3
1	100	1.1	2.3	3.4	4.6	5.8	6.9	8.1	9.0	10.2	11.3	12.5	13.7	14.8	16.0	16.9	18.1	19.2
1.5	111		1.1	2.2	3.4	4.5	5.7	6.8	7.7	8.9	10.0	11.2	12.3	13.5	14.6	15.8	16.9	18.1
2	120			1.1	2.2	3.4	4.5	5.6	6.8	7.9	9.1	10.2	11.3	12.5	13.6	14.8	15.9	17.0
3	134				0.5	1.6	3.0	4.1	5.3	6.4	7.5	8.6	9.7	10.9	12.0	13.1	14.2	15.3
4	144					0.5	1.9	3.2	4.1	5.2	6.3	7.4	8.5	9.6	11.0	12.1	13.2	14.3
5	152						0.8	1.8	2.9	4.3	5.4	6.5	7.6	8.7	10.0	11.1	12.2	13.3
6	159							1.0	2.4	3.4	4.5	5.6	6.7	8.0	9.1	10.2	11.3	12.6
7	165							0.5	1.5	2.6	3.9	5.0	6.1	7.2	8.5	9.6	10.6	12.0
8	170								1.0	2.1	3.1	4.4	5.5	6.6	7.9	8.9	10.0	11.3
9	175								0.5	1.5	2.6	3.9	4.9	6.0	7.3	8.3	9.4	10.7
10	180									1.0	2.0	3.3	4.4	5.7	6.7	7.8	9.1	10.1
15	198											1.2	2.2	3.7	4.7	5.7	7.0	8.0
20	212												0.7	1.9	2.9	4.1	5.3	6.5
30	234														0.6	1.8	2.7	3.9
40	250																1.1	2.2
50	264																	0.6

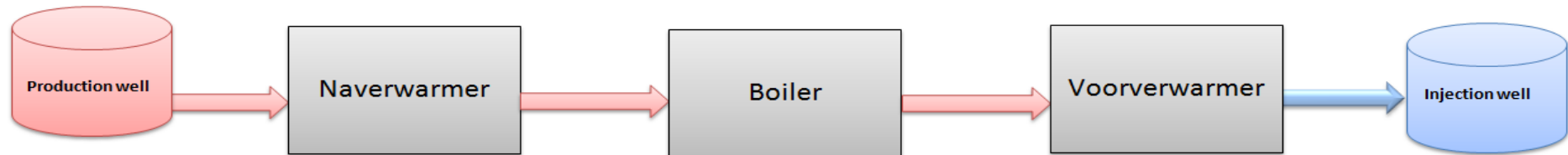
Appendix B: Handleiding IF's Steam Production Model (ISP model)



Het model beschrijft het maken van stoom en warm water volgens het hierboven weergegeven schema. De manier van aansluiten kan echter verschillen, en dit dient dan ook meegenomen te worden in het model. Op de volgende pagina zijn de mogelijke schakelingen weergegeven. De manier van aansluiten is afhankelijk van een aantal factoren, zoals de temperatuur van de bron, gewenste stoom druk en de gewenste stoom temperatuur. Het is belangrijk om de juiste manier van aansluiten te kiezen. Een verkeerde manier van aansluiten kan leiden tot onnodig grote warmtewisselaars, lagere stoom opbrengsten en warmte verliezen.

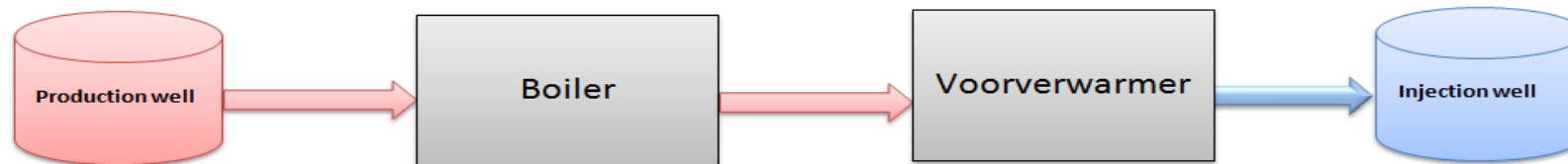
Appendix B1 Aansluitschema's IF's Steam Production Model

Aansluitschema A1



Het grootste voordeel van deze opstelling is, dat deze de hoogst mogelijke opbrengst van **oververhit** stoom opleveren. De geothermische temperatuur na het koken zal enkele graden boven het kookpunt van het stoom liggen. Het gemiddelde temperatuurverschil voor de voorverwarmer zal dus relatief klein zijn, dit betekent dat de warmtewisselaar een relatief groot oppervlakte nodig heeft om het gewenste resultaat te bereiken. Belangrijkste eis voor deze configuratie is, dat de begin temperatuur van het water uit de geothermische bron 5 °C boven de gewenste eind temperatuur van het stoom ligt. Het grootste voordeel is de hoogst mogelijke productie van oververhit stoom. Het grootste nadeel is dat de voorverwarmer een groot oppervlakte nodig zal hebben en dus relatief duur is.

Aansluitschema A2



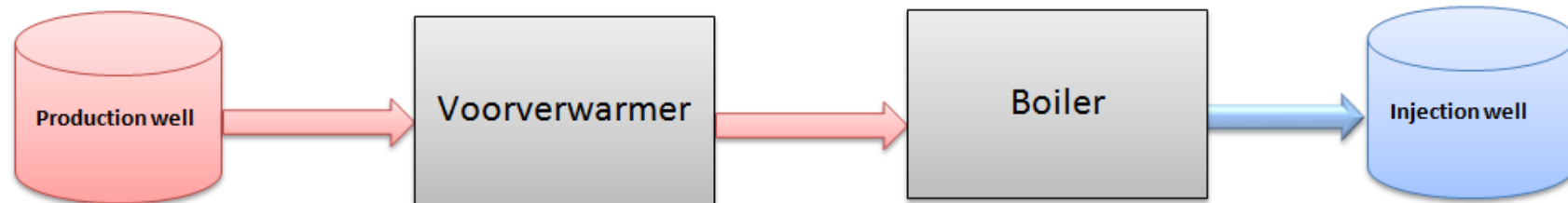
Het kan voorkomen dat de temperatuur van de geothermische bron lager is dan de gewenste eindtemperatuur van het stoom. Als er toch een zo hoog mogelijke opbrengst van stoom nodig is, dan is aansluitschema A2 de meest geschikte. Dit schema produceert alleen verzadigd stoom, om de stoom oververhit te krijgen dient er dus een naverbrander geplaatst te worden. Grootste eis voor dit aansluit schema en natuurlijk alle andere aansluitschema's is dat de geothermische begin temperatuur boven de verdampingstemperatuur ligt. Indien dit niet het geval is, kan er niet de gewenste warmte overdracht plaatsvinden. Bij dit schema geldt ook dat een relatief duur en grote voorverwarmer nodig is, vanwege het geringe temperatuursverschil.

Aansluitschema B1



Het kan voorkomen dat de temperatuur en massastroom van de geothermische bron dusdanig hoog is, dat er meer stoom geproduceerd kan worden dan nodig is. Het relatief grote gemiddelde temperatuurverschil bij de voorverwarmer, heeft als gevolg dat er een kleinere oppervlakte nodig is dan bij de aansluitschema's A1 en A2. Een kleinere oppervlakte betekent een goedkopere warmtewisselaar. Voorwaarde voor dit aansluit schema is dat de geothermische begin temperatuur minimaal 5 °C hoger is dan de eind temperatuur van het stoom.

Aansluitschema B2



Het kan voorkomen dat de temperatuur van de geothermische bron lager is dan de gewenste eindtemperatuur van de stoom. Als er dan minder stoom nodig is dan dat er geproduceerd kan worden, dan is deze configuratie de meest geschikte en goedkope. De redenen hiervoor zijn in de tekst bij aansluit schema B1.

Een aansluitschema gebruiken kan heel simpel, door de juiste geothermische inlaat temperatuur bij het juiste tabblad te kiezen. De uitlaat temperatuur van elk onderdeel is dan de inlaat temperatuur van het volgende onderdeel.

Appendix B2: Begin condities

Inlet Conditions						Beschrijving
Geothermal Conditions	Quantity	Value	Unit	Value	Unit (SI)	
Depth	Z	7000	m	7000	m	Invullen bron diepte
Average Temperature	T1	220	°C	493	K	Niets invullen!
Increased Temperature	T2	281.575	°C	554.575	K	Niets invullen!
Chosen inlet temperature	Ti	160	°C	433	K	Invullen bron temperatuur
Massflow	Mg	100	kg/s	100	kg/s	invullen massa stroom van de bron
Inlet Pressure	Pi	40	Bar	2000	kPa	Niets invullen!
Limits						
Maximum evaporation pressure	Pem	5	Bar			Dit is de maximale verdampings druk, Niets invullen!
Maximum amount of steam	Msm	35	ton/h	9.8	kg/s	Dit is de maximale hoeveelheid stoom die produceerbaar is bij gekozen druk, Niets invullen!
Steam Conditions	Quantity	Value	Unit (SI)	Value	Unit	
Desired Steam Temperature	Ts	150	°C	423	K	Invullen gewenste temperatuur van de stoom
Desired Steam Pressure	Ps	150	Bar	15000	kPa	invullen gewenste druk van de stoom
Inlet water temperature	Ti	50	°C	323	K	invullen inlaat temperatuur
Inlet water pressure	Pi	0.4	Bar	40	kPa	invullen inlaat druk
Chosen evaporation temperature	Te	99.6059	°C	372.6059	K	Niets invullen!
Evaporation pressure	Pe	1	Bar	100	kPa	invullen verdampings druk
Massflow	Ms	35	ton/h	9.722222222	kg/s	invullen gewenste hoeveelheid stoom
Afterheat possible		Yes				invullen gewenste hoeveelheid stoom
Limits						
Maximum water temperature	Twm	93	°C	366	K	Maximale eindtemperatuur warm water
maximum amount of hot water	Msh	183	ton/h	51	kg/s	Maximaal produceerbare hoeveelheid warm water bij gekozen eindtemperatuur
Desired Water Temperature	Tw	85	°C	358	K	invullen gewenste temperatuur van warm water
Desired Water Pressure	Pw	10	Bar	1000	kPa	invullen gewenste druk van warm water
Inlet water temperature	Ti	30	°C	303	K	invullen inlaat temperatuur
Inlet water pressure	Pi	4	Bar	400	kPa	invullen inlaat druk
Massflow	Ms	240	ton/h	66.66666667	kg/s	invullen gewenste hoeveelheid warm water
Constants						
Gas constant	R	8.31	J/mol/K			Niets invullen!
Specific gas constant	Rs	461	J/kg/K			Niets invullen!
Specific heat water	Cp1	4000	J/kg			Niets invullen!
Specific heat steam	Cp2	2000	J/kg			Niets invullen!
Ratio of specific heats	k	1.306				Niets invullen!
Density of water	pw	980	kg/m3			Niets invullen!
Density of steam	ps	0.6	kg/m3			Niets invullen!
Ideal Required Power	Qideal	3.30E+04	kJ/s	33.0	MW	Niets invullen!

Appendix B3: Warmte Wisselaar

Preheating the fluid												
Pre determined conditions				Calculations								
Geothermal Conditions	Quantity	Value	Unit	Input Variable	Quantity	Value	Unit	Important Parameters	Quantity	Value	Unit	Limit
Input temperature	Th1	417.36	K	Material		RVS		Flow speed hot fluid	Vh	2.0	m/s	1.5<v<2
Mass flow	Mh	120.00	kg/s	Conductivity (internet)	k1	16	W/m/K	Flow speed cold fluid	Vc	0.9	m/s	1.5<v<2
Inlet pressure	Phi	40	bar									
Heat capacity	Cp	4000	J/kg	Plate Area	Ap	0.2	m2	Pressuredrop hot fluid	ΔPh	0.71	bar	<0.5 bar
				Plate thickness	t	0.005	m	Pressuredrop cold fluid	ΔPh	0.7	bar	<0.5 bar
Product Conditions	Quantity	Value	Unit	Plate gap (Hot fluid) material rubber	dh	0.005	m					
Input temperature	Tc1	358.00	K	Plate gap (cold fluid)	dc	0.0015	m	Determined from imput	Quantity	Value	Unit	Limit
Output temperature	Tc2	414.77	K					Mean temperature difference	ΔTm	16.9	K	
Mass flow	Mc	3.3333333	kg/s	Number of plates	Np	161		Overall heat transfer coefficient (guess)	U	1550.0	W/m2/K	
Heat capacity	Cp	4000	J/kg	Width of plate	w	0.32	m	Area	A	32.2	m2	
Inlet pressure	Pci	4.51	bar	Number channels with hot water	Nch	80		Length of tube	L	1.3	m	
				Number of channels with cold water	Ncc	81		Reynolds of hot fluid	Re,h	6.29E+04		
Calculated Values	Quantity	Value	Unit	Number of passes hot water	Nh	2		Reynolds of cold fluid	Re,c	8.6E+03		
Heating power	Q	0.84	MW	Number of passes cold water	Nc	10		Nusselt hot fluid	Nu,h	445.3		
Output Geo temperature	Th2	415.61	K					Nusselt cold fluid	Nu,c	122.4		
				Determined from table	Quantity	Value	Unit					
Calculated from pre determined cor	Quantity	Value	Unit	Correction factor (table 3, with R and S)	Ft	0.95						
Log Mean temperature difference	ΔTlm	17.740461	K	Friction factor tube (figure 1, with Re1)	f1	3.00E-01		Plate film coefficient hot fluid	Hp,h	27607		
Temperature Efficiency	S	0.03		Friction factor shell (figure 1, with Re2)	f2	4.0E-02		Plate film coefficient cold fluid	Hp,c	7590		
Specific heat ratio	R	0.9563429						Overall heat transfer coefficient	Uu	1470		
				Constant	Quantity	Value	Unit					
				Heattransfer coefficient	hi	6000	W/m2/K	Rectified Values	Quantity	Value	Unit	Limit
				Fouling factor	Ri	0.00017	m2K/W	Overall heat transfer coefficient	Uu	1469.6		
				Prandtl number	Pr	1.94E+00		Area	A	33.95920198		
				Conductivity of Water	k2	0.62	W/m/K	Error in area	Err	5%		<10%
				Viscosity of water	μ	3.00E-04	Pa*s					
				Density of water	ρ	9.50E+02	kg/m3					

Bij dit model wordt er gebruik gemaakt van een plaat warmte wisselaar. Dit is een bundel van platen waartussen de koude en warmte vloeistof stroomt. Er hoeft slecht een klein aantal waardes te worden ingevuld. Deze dienen zo te worden geconfigureerd dat waarden rechtsboven binnen hun limieten vallen. De waardes die ingevuld kunnen worden hebben een witte achtergrond. De mogelijke invulwaardes zijn hieronder weergegeven. Let wel op dat de platen voldoende dik moeten zijn in verband met hoge drukken.

Parameter	Mogelijke invulwaardes	Parameter	Mogelijke invulwaardes
Plaat oppervlakte (m ²)	0.03 – 1.5	Plaat afstand cold fluid	0.0015 – 0.005
Plaat dikte	0.0005 – 0.005	Aantal passes hot fluid	Een breuk van number of channels
Plaat afstand hot fluid (m)	0.0015 – 0.005	Aantal passes cold fluid	Een breuk van number of channels

Appendix B4: Boiler

Boiler											
Pre determined conditions				Calculations				Important Parameters			
Geothermal Conditions	Quantity	Value	Unit	Input Variable	Quantity	Value	Unit	Quantity	Value	Unit	Limit
Input temperature	Th1	433.00	K	Material		RVS		Flow speed hot fluid	Vh	0.8	m/s
Mass flow	Mh	120.00	kg/s	Conductivity (internet)	k1	16	W/m/K	Flow speed cold fluid	Vc	1.0	m/s
Inlet pressure	Phi	40	bar					Pressuredrop hot fluid	ΔPh	0.54	bar
Heat capacity	Cp	4000	J/kg	Plate Area	Ap	0.5	m ²	Pressuredrop cold fluid	ΔPh	0.2	bar
				Plate thickness	t	0.004	m				
				welded gap	dh	0.003	m				
				Plate gap (cold fluid)	dc	0.0035	m				
Product Conditions	Quantity	Value	Unit					Determined from input			
Input temperature	Tc1	414.77	K	Number of plates	Np	1095		Mean temperature difference	ΔTm	7.6	K
Output temperature	Tc2	414.77	K	Width of plate	w	0.50	m	Overall heat transfer coefficient (guess)	U	1800.0	W/m ² /K
Mass flow	Mc	3.3333333	kg/s	Number channels with hot water	Nch	548		Area	A	547.5	m ²
Heat capacity	Cp	2138.91	J/kg	Number of channels with cold water	Ncc	549		Length of tube	L	7.9	m
Inlet pressure	Pci	3.80	bar	Number of passes hot water	Nh	5		Reynolds of hot fluid	Re,h	2.55E+04	
				Number of passes cold water	Nc	55		Reynolds of cold fluid	Re,c	2.2E+04	
Calculated Values	Quantity	Value	Unit					Nusselt hot fluid	Nu,h	192.8	
Heating power	Q	7.50	MW					Nusselt cold fluid	Nu,c	176.6	
Output Geo temperature	Th2	417.36	K								
Calculated from pre determined cor	Quantity	Value	Unit	Determined from table							
Log Mean temperature difference	ΔTlm	8.0156699	K	Correction factor (table 3, with R and S)	Ft	0.95		Plate film coefficient hot fluid	Hp,h	14939	
				Friction factor tube (figure 1, with Re1)	f1	0.03		Plate film coefficient cold fluid	Hp,c	13690	
				Friction factor shell (figure 1, with Re2)	f2	0.03		Overall heat transfer coefficient	Uu	1695	
				Constant	Quantity	Value	Unit	Rectified Values			
				Heattransfer coefficient	hi	6000	W/m ² /K	Overall heat transfer coefficient	Uu	1695.0	
				Fouling factor	Ri	0.00017	m ² K/W	Area	A	581.4664042	
				Prandtl number	Pr	1.03E+00		Error in area	Err	6%	<10%
				Conductivity of Water	k2	0.62	W/m/K				
				Viscosity of water	μ	3.00E-04	Pa*s				
				Density of water	ρ	9.50E+02	kg/m ³				

Bij dit model wordt er gebruik gemaakt van een plaat warmte wisselaar. Dit is een bundel van platen waartussen de koude en warmte vloeistof stroomt. Er hoeft slecht een klein aantal waardes te worden ingevuld. Deze dienen zo te worden geconfigureerd dat waarden rechtsboven binnen hun limieten vallen. De waardes die ingevuld kunnen worden hebben een witte achtergrond, deze zijn hieronder weergegeven. Let wel op dat de platen voldoende dik moeten zijn in verband met hoge drukken.

Parameter	Mogelijke invulwaardes	Parameter	Mogelijke invulwaardes
Plaat oppervlakte (m ²)	0.03 – 1.5	Plaat afstand cold fluid	0.0015 – 0.005
Plaat dikte	0.0005 – 0.005	Aantal passes hot fluid	Een breuk van number of channels
Plaat afstand hot fluid (m)	0.0015 – 0.005	Aantal passes cold fluid	Een breuk van number of channels

Appendix B5: Naverwarmer

Afterheating the fluid												
Pre determined conditions				Calculations				Important Parameters				
Geothermal Conditions	Quantity	Value	Unit	Input Variable	Quantity	Value	Unit	Quantity	Value	Unit	Limit	
Input temperature	Th1	453.00	K	Material		RVS		flow speed tube	Vt	21.2	m/s	10 < v < 30
Mass flow	Mh	120.00	kg/s	Conductivity (internet)	k1	16	W/m/K	flow speed shell	Vs	0.7	m/s	0.3-1
Inlet pressure	Phi	40	bar					L/Ds		5.0		5 < L/Ds < 10
Heat capacity	Cp	4000	J/kg	Tube Inner diameter (table 1)	Di	0.4428	m	Pressure drop Tube	ΔPt	0.00	bar	< 0.2 Bar
				Tube Outer diameter (table 1)	Do	0.45	m	Pressure drop Shell	ΔPs	0.4	bar	< 0.5 Bar
				Thickness (table 1)	d	0.0036	m					
Product Conditions	Quantity	Value	Unit					Determined from input				
Input temperature	Tc1	414.77	K					Mean temperature difference	ΔTm	23.7	K	
Output temperature	Tc2	433.00	K	Number of tubes (table 2)	Nt	4		Overall heat transfer coefficient	Ui	524.4	W/m ² /K	
Mass flow	Mc	6.9444444	kg/s	Number of passes (table 2)	Np	1		Area	A	24.4	m ²	
Heat capacity	Cp	2400	J/kg					Length of tube	L	4.9	m	
Inlet pressure	Pci	0.4	bar	Diameter of Shell (table 2)	Ds	1.0	m	Reynolds number of tube	Re1	4.02E+05		
				Pitch (table 1)	Pt	0.5625	m	Reynolds number of shell	Re2	2.1E+06		
Calculated Values	Quantity	Value	Unit	Arrangement (table 1)		square		Nusselt number of tube	Nu1	817.2		
Heating power	Q	0.30	MW	Baffle Spacing	B	1.0	m	Nusselt number of shell	Nu2	3223.3		
Output Geo temperature	Th2	452.37	K									
				Determined from table								
Constant	Quantity	Value	Unit	Correction factor (table 3, with R and S)	Ft	0.85		Diameter Shell	Ds	1.0	m	
Heattransfer coefficient	hi	2000	W/m ² /K	Friction factor tube (figure 1, with Re1)	f1	0.03		Flow area	As	0.1895782	m ²	
Resistance	Ri	0.00033	m ² /K/W	Friction factor shell (figure 1, with Re2)	f2	0.03		Mass velocity	Gs	633	kg/m ² s	
Prandtl number water	Pr	1.94E+00		Calculated from pre determined condition				Rectified Values				
Conductivity of Water	k2	0.62	W/m/K	Log Mean temperature difference	ΔTlm	27.87781761	K	heat transfer coefficient tube	ht	1144.3	W/m ² /K	
Viscosity of water	μ	3.00E-04	Pa*s	Temperature Efficiency	S	0.03		Heat transfer coefficient shell	hs	4440.9981	W/m ² /K	
Density of water	ρ	9.50E+02	kg/m ³	Specific heat ratio	R	0.476809585		Overall heat transfer coefficient	Uu	496.96916	W/m ² /k	
Density of steam	ρ	6.00E-01	kg/m ³					Area	A	25.796264	m ²	
Viscosity of steam	μ	1.40E-05	Pa*s									
Prandtl number steam	Pr	2.1										
Conductivity of Steam	k2	0.016	W/m/K									

De naverwarmer gebruikt een tube-shell warmtewisselaar. Hier gelden andere invulwaarden dan bij een plate-shell warmtewisselaar. Er is gekozen voor een buizensysteem om de stroom snelheid van het stoom beter te kunnen reguleren. Deze moet namelijk niet te hoog zijn, aangezien de drukval dan te groot wordt. . Er hoeft slecht een klein aantal waardes te worden ingevuld. Deze dienen zo te worden geconfigureerd dat waarden rechtsboven binnen hun limieten vallen. In dit model kunnen de volgende parameters gebruikt worden:

Parameter	Invulwaardes
Buiten diameter buis	Alles
Dikte van de buis	0.0015 - 0.005
Lengte van de buis	1.83; 2.44; 3.66; 4.88; 6.10; 7.32

Appendix B6: Warmte wisselaar voor warm water processen

Heating of water											
Pre determined conditions				Calculations				Important Parameters			
Geothermal Conditions	Quantity	Value	Unit	Input Variable	Quantity	Value	Unit	Quantity	Value	Unit	Limit
Input temperature	Th1	417.77	K	Material		RVS		Flow speed hot fluid	Vh	1.9	m/s
Mass flow	Mh	120.00	kg/s	Conductivity (internet)	k1	16	W/m/K	Flow speed cold fluid	Vc	1.5	m/s
Inlet pressure	Phi	40	bar					Pressuredrop hot fluid	ΔPh	0.66	bar
Heat capacity	Cp	4000	J/kg	Plate Area	Ap	0.7	m ²	Pressuredrop cold fluid	ΔPh	0.9	bar
				Plate thickness	t	0.004	m				
				Plate gap (Hot fluid) material rubber	dh	0.004	m				
				Plate gap (cold fluid)	dc	0.0017	m				
Product Conditions	Quantity	Value	Unit					Determined from input			
Input temperature	Tc1	283.00	K					Mean temperature difference	ΔTm	50.6	K
Output temperature	Tc2	393.00	K					Overall heat transfer coefficient (guess)	U	1800.0	W/m ² /K
Mass flow	Mc	40	kg/s	Number of plates	Np	276		Area	A	193.2	m ²
Heat capacity	Cp	4180	J/kg	Width of plate	w	0.48	m	Length of tube	L	1.9	m
Inlet pressure	Pci	1	bar	Number channels with hot water	Nch	138		Reynolds of hot fluid	Re,h	4.80E+04	
				Number of channels with cold water	Ncc	139		Reynolds of cold fluid	Re,c	1.6E+04	
				Number of passes hot water	Nh	4		Nusselt hot fluid	Nu,h	380.4	
				Number of passes cold water	Nc	4		Nusselt cold fluid	Nu,c	185.4	
Calculated Values	Quantity	Value	Unit								
Heating power	Q	17.60	MW								
Output Geo temperature	Th2	381.11	K								
Calculated from pre determined cor	Quantity	Value	Unit	Determined from table							
Log Mean temperature difference	ΔTlm	53.281546	K	Correction factor (table 3, with R and S)	Ft	0.95		Plate film coefficient hot fluid	Hp,h	29479	
Temperature Efficiency	S	0.33		Friction factor tube (figure 1, with Re1)	f1	1.00E-02		Plate film coefficient cold fluid	Hp,c	14366	
Specific heat ratio	R	0.816195		Friction factor shell (figure 1, with Re2)	f2	1.0E-02		Overall heat transfer coefficient	Uu	1807	
				Constant				Rectified Values			
				Heattransfer coefficient	hi	6000	W/m ² /K	Overall heat transfer coefficient	Uu	1806.6	
				Fouling factor	Ri	0.00017	m ² /W	Area	A	192.46546	
				Prandtl number	Pr	2.02E+00		Error in area	Err	0%	<10%
				Conductivity of Water	k2	0.62	W/m/K				
				Viscosity of water	μ	3.00E-04	Pa*s				
				Density of water	ρ	9.50E+02	kg/m ³				

Bij dit model wordt er gebruik gemaakt van een plaat warmte wisselaar. Dit is een bundel van platen waartussen de koude en warmte vloeistof stroomt. Er hoeft slecht een klein aantal waardes te worden ingevuld. Deze dienen zo te worden geconfigureerd dat waarden rechtsboven binnen hun limieten vallen. De waardes die ingevuld kunnen worden hebben een witte achtergrond, deze zijn hieronder weergegeven. Let wel op dat de platen voldoende dik moeten zijn in verband met hoge drukken.

Parameter	Mogelijke invulwaardes	Parameter	Mogelijke invulwaardes
Plaat oppervlakte (m ²)	0.03 – 1.5	Plaat afstand cold fluid	0.0015 – 0.005
Plaat dikte	0.0005 – 0.005	Aantal passes hot fluid	Een breuk van number of channels
Plaat afstand hot fluid (m)	0.0015 – 0.005	Aantal passes cold fluid	Een breuk van number of channels

Appendix B7: Compressor en pomp

Compressing and Pumping the fluid																													
Adiabatic compression 1 stage No cooler						stages: 1		Adiabatic compression 3 stages 2intercoolers						stages: 2		Isothermal Compression = perfect cooled ΔT=0													
Product Conditions		Quantity	Value	Unit	Value	Unit	Product Conditions		Quantity	Value	Unit	Value	Unit	Product Conditions		Quantity	Value	Unit	Value	Unit									
Input Pressure		Pi	100.00	kPa	1.00	bar	Input Pressure		Pi	100.00	kPa	1.00	bar	Input Pressure		Pi	100.00	kPa	1.00	bar									
Output Pressure		Po	15000.00	kPa	150.00	bar	Output Pressure		Po	15000.00	kPa	150.00	bar	Output Pressure		Po	15000.00	kPa	150.00	bar									
Mass flow		Mc	9.7222222	kg/s	9.7222222	kg/s	Mass flow		Mc	9.72	kg/s	9.72	kg/s	Mass flow		Mc	9.72	kg/s	9.7222222	kg/s									
Input Temperature		Ti	100	°C	372.61	K	Input Temperature		Ti	100	°C	372.61	K	Input Temperature		Ti	150	°C	423.00	K									
Output Temperature		To	932	°C	1205.35	K	Output Temperature		To	480	°C	752.88	K	Output Temperature		To	150	°C	423.00	K									
Shaft power		Ws	23.131914	MW			Shaft power		Ws	18.6021	MW	291.6021		Shaft Power		Ws	13.57	MW											
Heat removed		Qr	0	MW			Heat removed		Qr	3.970573	MW			Heat removed (at 160°)		Qs	16.19	MW											
Heat added		Qa	0	MW			Heat added		Qa	0	MW			Heat added		Pt	0.98	MW											
Adiabatic compression 2 stages 1 intercoolers						stages: 3		Adiabatic compression 4 stages 3 inter coolers						stages: 4		Important constants													
Product Conditions		Quantity	Value	Unit	Value	Unit	Product Conditions		Quantity	Value	Unit	Value	Unit	Constant		Quantity	Value	Unit											
Input Pressure		Pi	100.00	kPa	1.00	bar	Input Pressure		Pi	100.00	kPa	1.00	bar	Gas constant		R	8.31	J/mol/K											
Output Pressure		Po	15000.00	kPa	150.00	bar	Output Pressure		Po	15000.00	kPa	150.00	bar	Specific gas constant		Rs	461	J/kg/K											
Mass flow		Mc	9.7222222	kg/s	9.7222222	kg/s	Mass flow		Mc	9.72	kg/s	9.72	kg/s	Specific heat water		Cp1	4180	J/kg											
Input Temperature		Ti	100	°C	372.61	K	Input Temperature		Ti	100	°C	372.61	K	Specific heat steam		Cp2	2000	J/kg											
Output Temperature		To	565	°C	838.08	K	Output Temperature		To	443	°C	716.13	K	Ratio of specific heats		k	1.306												
Shaft Power		Ws	17.461979	MW			Shaft power		Ws	16.94582	MW			Pressure constant		κ	0.2343032												
Heat removed		Qr	4.8291384	MW			Heat removed		Qr	5.182509	MW			Density of steam		ps	0.6	kg/m3											
Heat added		Qa	0	MW			Heat added		Qa	0	MW			Efficiency of compressor		ηc	70%												
Compressor Calculations						1 stage		2 stages		3 stages		4 stages		Adiabatic + isothermal compressor						stages: 4		Pump						stages: 4	
Product Conditions		Quantity	Value	Unit	Value	Unit	Product Conditions		Quantity	Value	Unit	Value	Unit	Product Conditions		Quantity	Value	Unit											
Input Pressure		Pi	100.00	kPa	1.00	bar	Input Pressure		Pi	100.00	kPa	1.00	bar	Input Pressure		Pi	0.10	Bar											
Output Pressure		Po	15000.00	kPa	150.00	bar	Output Pressure		Po	15000.00	kPa	150.00	bar	Output Pressure		Po	2.20	Bar											
Mass flow		Mc	9.72	kg/s	9.72	kg/s	Mass flow		Mc	9.72	kg/s	9.72	kg/s	Mass flow		Mc	9.72	kg/s											
Input Temperature		Ti	100	°C	372.61	K	Input Temperature		Ti	100	°C	372.61	K	Tube diameter		D	0.3	m											
Output Temperature		To	150	°C	423.00	K	Output Temperature		To	150	°C	423.00	K	Density of water		ps	980	kg/m3											
Shaft power adiabatic		Wa	1.399836	MW			Shaft power adiabatic		Wa	1.399836	MW			Volume flow		V	0.01	m3/s											
Shaft power isothermal		Wi	12.10438	MW			Shaft power isothermal		Wi	12.10438	MW			Pumping Power		Pp	2.6090417	kW											
Total shaft power		Wt	13.50421	MW			Total shaft power		Wt	13.50421	MW			Efficiency of pump		ηp	80%												
Product Conditions		Quantity	Value	Unit	Value	Unit	Product Conditions		Quantity	Value	Unit	Value	Unit	Product Conditions		Quantity	Value	Unit											
Input Pressure		Pi	100.00	kPa	1.00	bar	Input Pressure		Pi	100.00	kPa	1.00	bar	Input Pressure		Pi	0.10	Bar											
Output Pressure		Po	15000.00	kPa	150.00	bar	Output Pressure		Po	15000.00	kPa	150.00	bar	Output Pressure		Po	2.20	Bar											
Mass flow		Mc	9.72	kg/s	9.72	kg/s	Mass flow		Mc	9.72	kg/s	9.72	kg/s	Mass flow		Mc	9.72	kg/s											
Input Temperature		Ti	100	°C	372.61	K	Input Temperature		Ti	100	°C	372.61	K	Tube diameter		D	0.3	m											
Output Temperature		To	150	°C	423.00	K	Output Temperature		To	150	°C	423.00	K	Density of water		ps	980	kg/m3											
Shaft power adiabatic		Wa	1.399836	MW			Shaft power adiabatic		Wa	1.399836	MW			Volume flow		V	0.01	m3/s											
Shaft power isothermal		Wi	12.10438	MW			Shaft power isothermal		Wi	12.10438	MW			Pumping Power		Pp	2.6090417	kW											
Total shaft power		Wt	13.50421	MW			Total shaft power		Wt	13.50421	MW			Efficiency of pump		ηp	80%												
Product Conditions		Quantity	Value	Unit	Value	Unit	Product Conditions		Quantity	Value	Unit	Value	Unit	Product Conditions		Quantity	Value	Unit											
Input Pressure		Pi	100.00	kPa	1.00	bar	Input Pressure		Pi	100.00	kPa	1.00	bar	Input Pressure		Pi	0.10	Bar											
Output Pressure		Po	15000.00	kPa	150.00	bar	Output Pressure		Po	15000.00	kPa	150.00	bar	Output Pressure		Po	2.20	Bar											
Mass flow		Mc	9.72	kg/s	9.72	kg/s	Mass flow		Mc	9.72	kg/s	9.72	kg/s	Mass flow		Mc	9.72	kg/s											
Input Temperature		Ti	100	°C	372.61	K	Input Temperature		Ti	100	°C	372.61	K	Tube diameter		D	0.3	m											
Output Temperature		To	150	°C	423.00	K	Output Temperature		To	150	°C	423.00	K	Density of water		ps	980	kg/m3											
Shaft power adiabatic		Wa	1.399836	MW			Shaft power adiabatic		Wa	1.399836	MW			Volume flow		V	0.01	m3/s											
Shaft power isothermal		Wi	12.10438	MW			Shaft power isothermal		Wi	12.10438	MW			Pumping Power		Pp	2.6090417	kW											
Total shaft power		Wt	13.50421	MW			Total shaft power		Wt	13.50421	MW			Efficiency of pump		ηp	80%												
Product Conditions		Quantity	Value	Unit	Value	Unit	Product Conditions		Quantity	Value	Unit	Value	Unit	Product Conditions		Quantity	Value	Unit											
Input Pressure		Pi	100.00	kPa	1.00	bar	Input Pressure		Pi	100.00	kPa	1.00	bar	Input Pressure		Pi	0.10	Bar											
Output Pressure		Po	15000.00	kPa	150.00	bar	Output Pressure		Po	15000.00	kPa	150.00	bar	Output Pressure		Po	2.20	Bar											
Mass flow		Mc	9.72	kg/s	9.72	kg/s	Mass flow		Mc	9.72	kg/s	9.72	kg/s	Mass flow		Mc	9.72	kg/s											
Input Temperature		Ti	100	°C	372.61	K	Input Temperature		Ti	100	°C	372.61	K	Tube diameter		D	0.3	m											
Output Temperature		To	150	°C	423.00	K	Output Temperature		To	150	°C	423.00	K	Density of water		ps	980	kg/m3											
Shaft power adiabatic		Wa	1.399836	MW			Shaft power adiabatic		Wa	1.399836	MW			Volume flow		V	0.01	m3/s											
Shaft power isothermal		Wi	12.10438	MW			Shaft power isothermal		Wi	12.10438	MW			Pumping Power		Pp	2.6090417	kW											
Total shaft power		Wt	13.50421	MW			Total shaft power		Wt	13.50421	MW			Efficiency of pump		ηp	80%												
Product Conditions		Quantity	Value	Unit	Value	Unit	Product Conditions		Quantity	Value	Unit	Value	Unit	Product Conditions		Quantity	Value	Unit											
Input Pressure		Pi	100.00	kPa	1.00	bar	Input Pressure		Pi	100.00	kPa	1.00	bar	Input Pressure		Pi	0.10	Bar											
Output Pressure		Po	15000.00	kPa	150.00	bar	Output Pressure		Po	15000.00	kPa	150.00	bar	Output Pressure		Po	2.20	Bar											
Mass flow		Mc	9.72	kg/s	9.72	kg/s	Mass flow		Mc	9.72	kg/s	9.72	kg/s	Mass flow		Mc	9.72	kg/s											
Input Temperature		Ti	100	°C	372.61	K	Input Temperature		Ti	100	°C	372.61	K	Tube diameter		D	0.3	m											
Output Temperature		To	150	°C	423.00	K	Output Temperature		To	150	°C	423.00	K	Density of water		ps	980	kg/m3											
Shaft power adiabatic		Wa	1.399836	MW			Shaft power adiabatic		Wa	1.399836	MW			Volume flow		V	0.01	m3/s											
Shaft power isothermal		Wi	12.10438	MW			Shaft power isothermal		Wi	12.10438	MW			Pumping Power		Pp	2.6090417	kW											
Total shaft power		Wt	13.50421	MW			Total shaft power		Wt	13.50421	MW			Efficiency of pump		ηp	80%												
Product Conditions		Quantity	Value	Unit	Value	Unit	Product Conditions		Quantity	Value	Unit	Value	Unit	Product Conditions		Quantity	Value	Unit											
Input Pressure		Pi	100.00	kPa	1.00	bar	Input Pressure		Pi	100.00	kPa	1.00	bar	Input Pressure		Pi	0.10	Bar											
Output Pressure		Po	15000.00	kPa	150.00	bar	Output Pressure		Po	15000.00	kPa	150.00	bar	Output Pressure		Po	2.20	Bar											
Mass flow		Mc	9.72	kg/s	9.72	kg/s	Mass flow		Mc	9.72	kg/s	9.72	kg/s	Mass flow		Mc	9.72	kg/s											
Input Temperature		Ti	100	°C	372.61	K	Input Temperature		Ti	100	°C	372.61	K	Tube diameter		D	0.3	m											
Output Temperature		To	150	°C	423.00	K	Output Temperature		To	150	°C	423.00	K	Density of water		ps	980	kg/m3											
Shaft power adiabatic		Wa	1.399836	MW			Shaft power adiabatic		Wa	1.399836	MW			Volume flow		V	0.01	m3/s											
Shaft power isothermal		Wi	12.10438	MW			Shaft power isothermal		Wi	12.10438	MW			Pumping Power		Pp	2.6090417	kW											
Total shaft power		Wt	13.50421	MW			Total shaft power		Wt	13.50421	MW			Efficiency of pump		ηp	80%												
Product Conditions		Quantity	Value	Unit	Value	Unit	Product Conditions		Quantity	Value	Unit	Value	Unit	Product Conditions		Quantity	Value	Unit											
Input Pressure		Pi	100.00	kPa	1.00	bar	Input Pressure		Pi	100.00	kPa	1.00	bar	Input Pressure		Pi	0.10	Bar											
Output Pressure		Po	15000.00	kPa	150.00	bar	Output Pressure		Po	15000.00	kPa	150.00	bar	Output Pressure		Po	2.20	Bar											
Mass flow		Mc	9.72	kg/s	9.72	kg/s	Mass flow		Mc	9.72	kg/s	9.72	kg/s	Mass flow		Mc	9.72	kg/s											
Input Temperature		Ti	100	°C	372.61	K	Input Temperature		Ti	100	°C	372.61	K	Tube diameter		D	0.3	m											
Output Temperature		To	150	°C	423.00	K	Output Temperature		To	150	°C	423.00	K	Density of water		ps	980	kg/m3											
Shaft power adiabatic		Wa	1.399836	MW			Shaft power adiabatic		Wa	1.399836	MW			Volume flow		V	0.01	m3/s											
Shaft power isothermal		Wi	12.10438	MW			Shaft power isothermal		Wi	12.10438	MW			Pumping Power		Pp	2.6090417	kW											
Total shaft power		Wt	13.50421	MW			Total shaft power		Wt	13.50421	MW			Efficiency of pump		ηp	80%												
Product Conditions		Quantity	Value	Unit	Value	Unit	Product Conditions		Quantity	Value	Unit	Value	Unit	Product Conditions		Quantity	Value	Unit											
Input Pressure		Pi	100.00	kPa	1.00	bar	Input Pressure		Pi	100.00	kPa	1.00	bar	Input Pressure		Pi	0.10	Bar											
Output Pressure		Po	15000.00	kPa	150.00	bar	Output Pressure		Po	15000.00	kPa	150.00	bar	Output Pressure		Po	2.20	Bar											
Mass flow		Mc	9.72	kg/s	9.72	kg/s	Mass flow		Mc	9.72	kg/s	9.72	kg/s	Mass flow		Mc	9.72	kg/s											
Input Temperature		Ti	100	°C	372.61	K	Input Temperature		Ti	100	°C	372.61	K	Tube diameter		D	0.3	m											
Output Temperature		To	150	°C	423.00	K	Output Temperature		To	150	°C	423.00	K	Density of water		ps	980	kg/m3											
Shaft power adiabatic		Wa	1.399836	MW			Shaft power adiabatic		Wa	1.399836	MW			Volume flow		V	0.01	m3/s											
Shaft power isothermal		Wi	12.10438	MW			Shaft																						

Met dit tabblad kan het vermogen bepaald worden van de pomp en eventueel de compressor. In hoofdstuk 4 is bepaald dat het gebruik van een compressor energetisch gezien niet rendabel is. Het is echter niet onmogelijk om een compressor te gebruiken.

Appendix B8: Kosten schatting

Cost Prediction of the Equipment												
Preheater	Plate	Area of plate	0.2 m2	Boiler	Plate	Area of plate	1.5 m2	Afterheater	Tube	Tube diameter	0.45 m	
		Number of plate	246			Number of plate	307			tube thickness	0.0036 m	
		total Area	49 m2			total Area	461 m2			tube length	5 m	
		thickness	0.005 m			thickness	0.003 m			Tube price	394 €/m	
	shell	Shell volume	0.023528 m3	shell	Shell volume	0.219460673 m3	shell	number of tubes	4			
		material	RVS		material	RVS		Shell volume	0.088897425 m3			
		density	7800 kg/m3		density	7800 kg/m3		material	RVS			
	material price	10 €/kg		material price	10 €/kg		material price	10 €/kg		material price	10 €/kg	
	total weight	2102.04		total weight	12491.68256		total weight	738.2014465				
total material cost			21020 €	total material costs			124917 €	total material costs			14192 €	
Production costs			21020 €	Production costs			124917 €	Production costs			14192 €	
Calculated price of the preheater:			42041 €	Calculated price of the preheater:			249834 €	Calculated price of the preheater:			0 €	
Water heater	Plate	Area of plate	0.7 m2	Other equipment	Pump	Debit	12.6 m3/h	Total Costs	Equipment	Preheater	€ 42,041	
		Number of plate	276			Power	3 kW			Boiler	€ 249,834	
		total Area	193 m2			Estimated Price				50000 €	Afterheater	€ 50,000
		thickness	0.004 m			Steamline	Length			0 m	Waterheater	€ 129,959
	shell	Shell volume	0.060392 m3	price	800 €/m		Pump			€ 50,000		
			material	RVS	Total price		0 €			Steamline	€ 0	
			density	7800 kg/m3	pipeline	Length	2200 m			Pipelines	€ 440,000	
		material price	10 €/kg	Diameter		0.08061895 m	Geo Pump			€ 1,000,000		
			total weight	6497.966		price	200 €/m			Installation costs	€ 929,707	
					Total price	440000 €						
total material costs			64980 €									
Production costs			64980 €									
Calculated price of the preheater:			129959 €									

Appendix C Formule Blad

General Laws

First Law of Thermodynamics

$$U = Q + W$$

Second Law of Thermodynamics

$$dS \geq dQ/T$$

Ideal Gas Law

$$P * V = n * R * T$$

Specific Formula

Power consumption for an adiabatic compressor

$$P = \dot{m} * c_p * T \frac{\left((P_f/P_i)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right)}{\eta}$$

Power consumption for an isothermal compressor

$$P = \frac{\dot{m}RT}{\eta} * \ln \left(\frac{P_b}{P_a} \right)$$

Duty of the heat exchanger

$$Q = \dot{m} * c_p * \Delta T$$

Duty of the Boiler

$$Q = \dot{m} * \Delta H_e$$

Area required for a boiler / heat exchanger

$$A = \frac{Q}{U * Ft * \Delta T_{lm}}$$

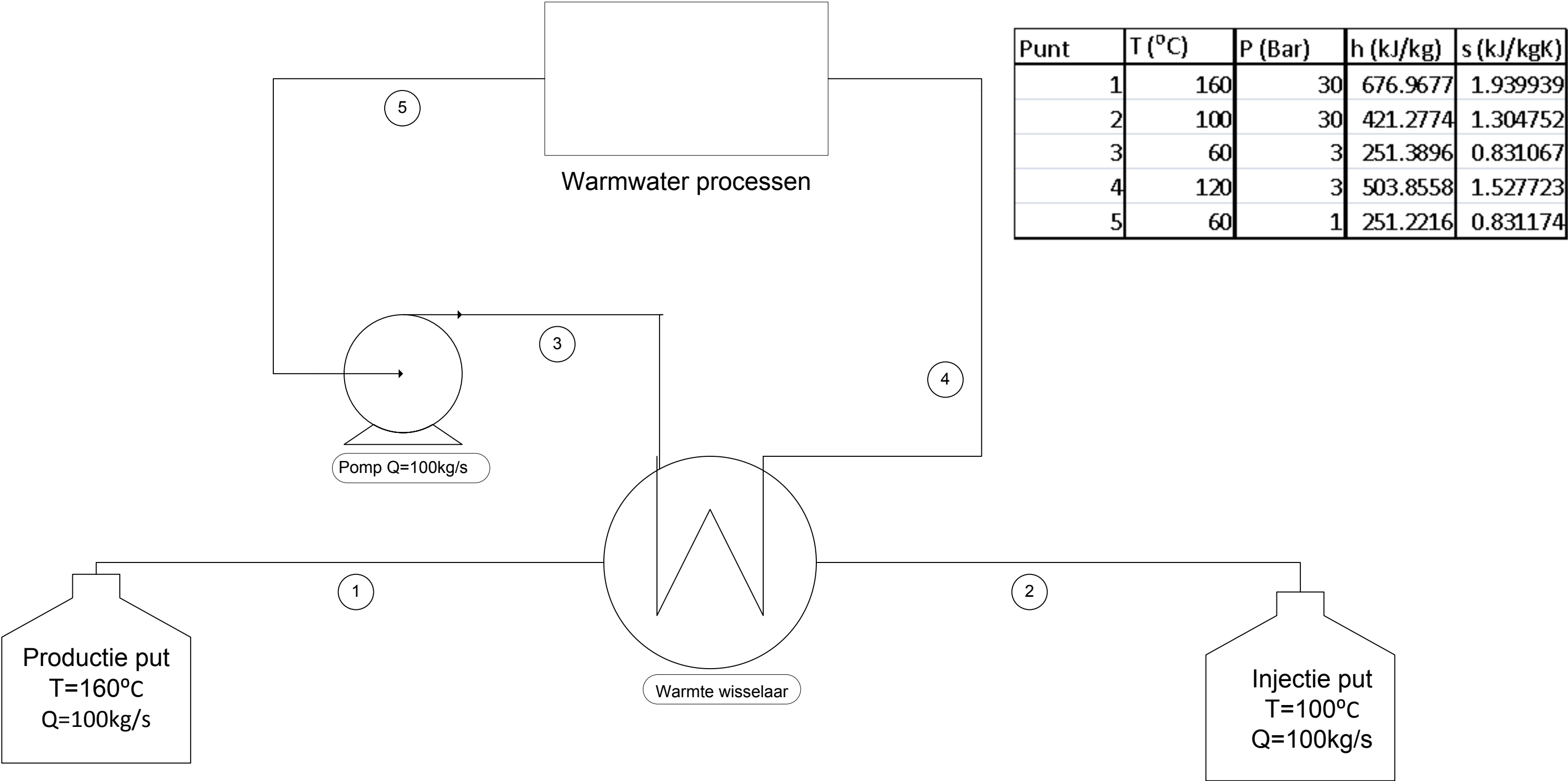
Overall heat transfer coefficient

$$U = \frac{1}{\sum \left(\frac{1}{h_i} \right) + R + \frac{d}{k}}$$

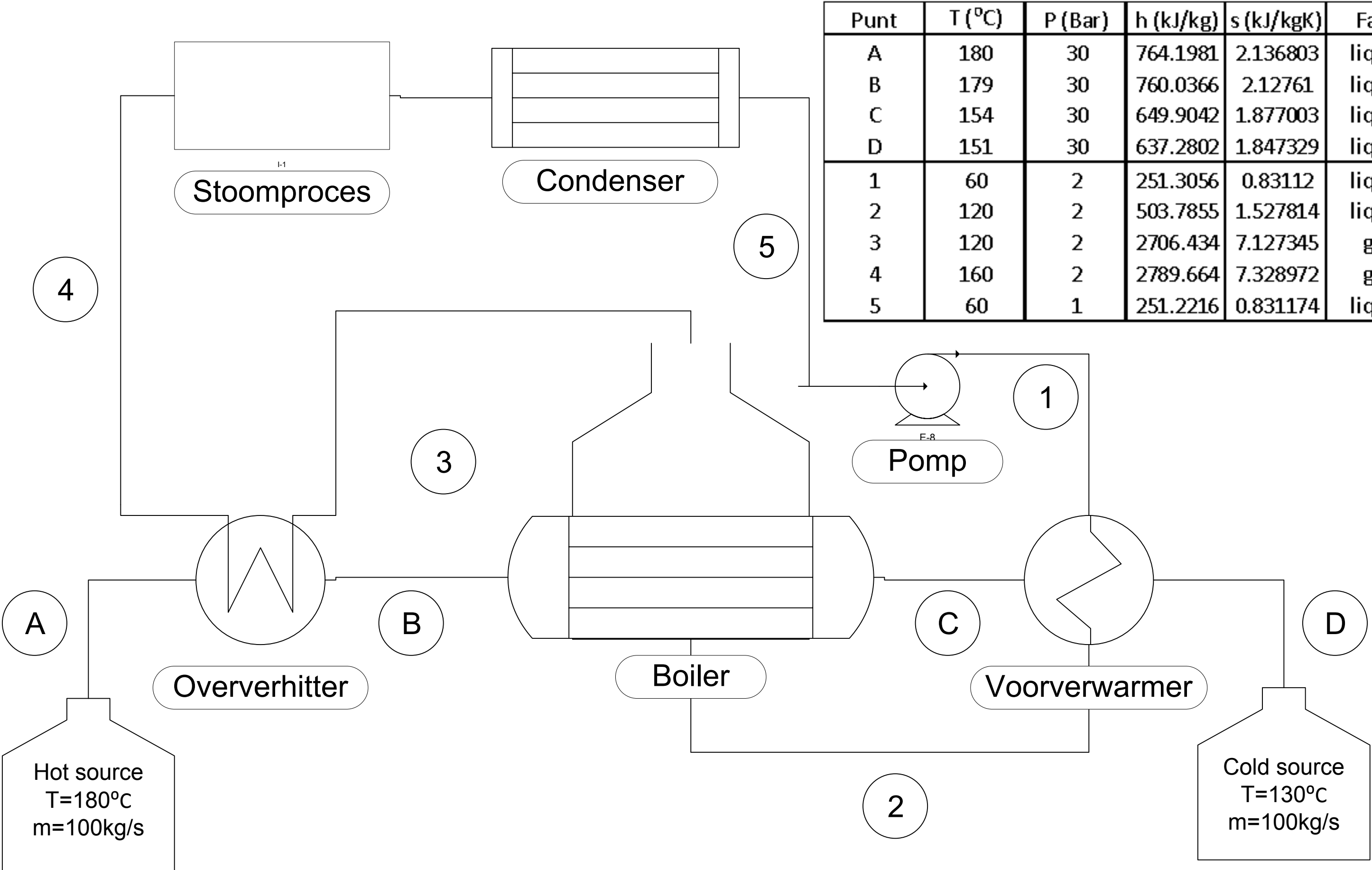
Log mean Temperature difference

$$\Delta T_{lm} = \frac{(T_{h1} - T_{c2}) - (T_{h2} - T_{c1})}{\ln \left(\frac{T_{h1} - T_{c2}}{T_{h2} - T_{c1}} \right)}$$

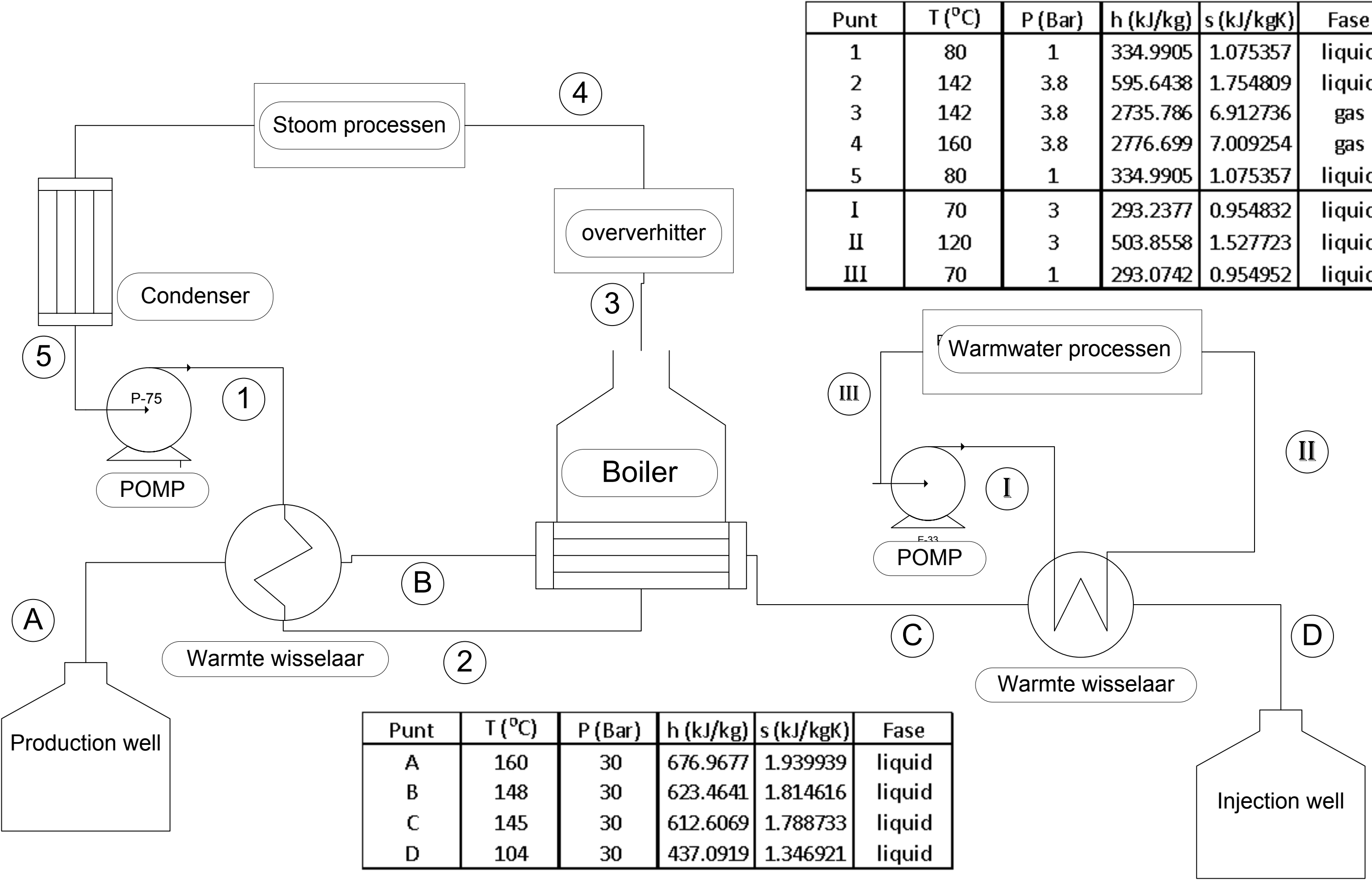
Bijlage D1 Processchema produceren van warmwater.



Appendix D2 Processchema om stoom te produceren



Appendix D3 Processchema produceren stoom en warm water



Appendix E1

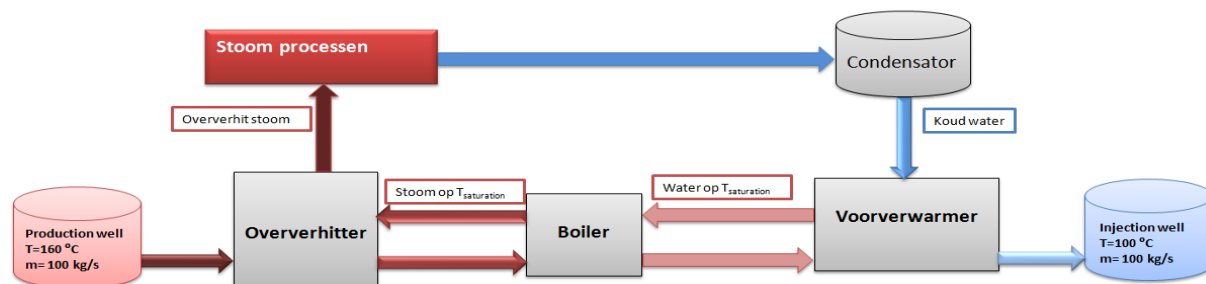
Rekenen aan stoom produceren met aardwarmte, met behulp van een voorbeeld.

Gegeven:

Een papierfabriek heeft voor het papierproces 20 ton per uur lage druk stoom nodig. De gewenste druk van deze stoom is 4 bar en de gewenste temperatuur is 160 °C. Om de stoom te produceren wil de fabriek een geothermische bron boren. Uit geologisch onderzoek is gebleken dat bij een diepte van 5000 meter een bron is, met een temperatuur van 180 °C en een debiet van 120 kg/s. Verder is gegeven dat het retour condensaat een temperatuur heeft van 70 °C.

Gevraagd:

- De maximaal te produceren hoeveelheid stoom.
- Is het mogelijk om oververhitte stoom te maken met de aanwezige aardwarmte?
- Bereken voor figuur 1, bij elke stap het thermisch overgedragen vermogen en de temperatuur van het water uit de geothermische bron.



Figuur 1

Berekeningen:

- Berekenen van de maximaal te produceren hoeveelheid stoom.

Het indampen van water kost zeer veel energie, veel meer dan dat er nodig is om het water op het kookpunt te brengen, zie tabel 1. Uit deze tabel valt ook te zien dat de temperatuur, waarbij het water begint te koken, stijgt naarmate de druk toeneemt. Verder is de hoeveelheid energie die nodig is om water te verdampen ook druk afhankelijk, bij lage druk is meer energie nodig dan bij hoge druk. De totale hoeveelheid energie die nodig is om een hoeveelheid water te verdampen kan berekend worden met [1].

$$Q = \dot{m}_2 * \Delta H_e \quad (\text{kW}) \quad [1]$$

$$\dot{m} = \text{massa stroom} = 5.6 \left(\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right)$$

$$\Delta H_e = \text{verdampings warmte} \left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right)$$

Tabel 1

Druk (Bar)	Temperatuur (°C)	Verdampingswarmte (kJ/kg)	Enthalpy water (kJ/kg)	Enthalpy stoom (kJ/kg)
1	100	2258	419	2675
2	120	2202	503	2706

5	150	2108	676	2748
10	180	2014	763	2777

Uit stoomtabellen is op te zoeken, dat bij een druk van 4 bar het kookpunt en de verdampingswarmte de volgende waarden hebben:

$$T_b = 143,7 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\Delta H_e = 2133 \text{ kJ/kg}$$

De warmte die nodig is om het water te verdampen, wordt geleverd door water uit de geothermische bron. In theorie kan er stoom geproduceerd worden, zolang het water uit de bron warmer is dan de verdampingstemperatuur. In de praktijk is de warmteflux (W/m^2) bij de laatste 2 graden temperatuursverschil zo laag, dat deze niet mee wordt genomen.

De in de praktijk maximaal te produceren hoeveelheid stoom, kan vervolgens berekend worden door een warmte balans op te stellen. Dit is gedaan bij [2].

$$\dot{m}_1 * cp * (T_{hi} - T_{ho}) * \eta = \dot{m}_2 * \Delta H_e \quad [2]$$

$$\begin{aligned} \dot{m}_1 &= \text{massastroom thermische bron} = 120 \text{ (kg/s)} \\ cp &= \text{soortelijke warmte van het water uit de thermische bron} = 3.9 \text{ (kJ/(kg}^{\circ}\text{C))} \\ T_{hi} &= \text{begin temperatuur thermische bron} = 180 \text{ }^{\circ}\text{C} \\ T_{ho} &= \text{eind temperatuur thermische bron} = T_b + 2 = 145.7^{\circ}\text{C} \\ \eta &= \text{rendement van de boiler} = 90\% \end{aligned}$$

Na het invullen van alle bekende waarden, kan de maximaal te produceren hoeveelheid stoom berekend worden:

$$120 * 3.9 * (180 - 145.7) * 0.9 = \dot{m}_2 * 2133$$

$$\dot{m}_2 = 6.7 \frac{\text{kg}}{\text{s}} = 24.1 \text{ ton/h}$$

b. Mogelijkheid tot oververhitten, met behulp van geothermische bron.

Om te kijken of oververhitten mogelijk is, dient eerst bepaald te worden hoeveel warmte er nodig is om de stoom op de gewenste temperatuur te krijgen. Dit kan worden berekend worden met [3].

$$Q = \dot{m}_2 * cp * (T_{hi} - T_{ho}) \quad [3]$$

$$\begin{aligned} \dot{m}_2 &= \text{massastroom stoom} = 5.6 \text{ (kg/s)} \\ cp &= \text{soortelijke warmte van stoom bij 4 bar} = 2,31 \text{ (kJ/(kg}^{\circ}\text{C))} \\ T_{hi} &= \text{begin temperatuur stoom} = 143.7 \text{ }^{\circ}\text{C} \\ T_{ho} &= \text{eind temperatuur stoom} = 160 \text{ }^{\circ}\text{C} \end{aligned}$$

De benodigde thermische vermogen is:

$$Q = 210 \text{ kW}$$

Het water uit de geothermische bron wordt, indien mogelijk, als eerste gebruikt om de stoom te oververhitten. Met behulp van een warmte balans kan de eindtemperatuur van het water uit de geothermische bron berekend worden:

$$\dot{m}_1 * cp * (T_{hi} - T_{ho}) * \eta = 210$$

$$120 * 3.9 * (180 - T_{ho}) * 0.9 = 210 \rightarrow T_{ho} = 179.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

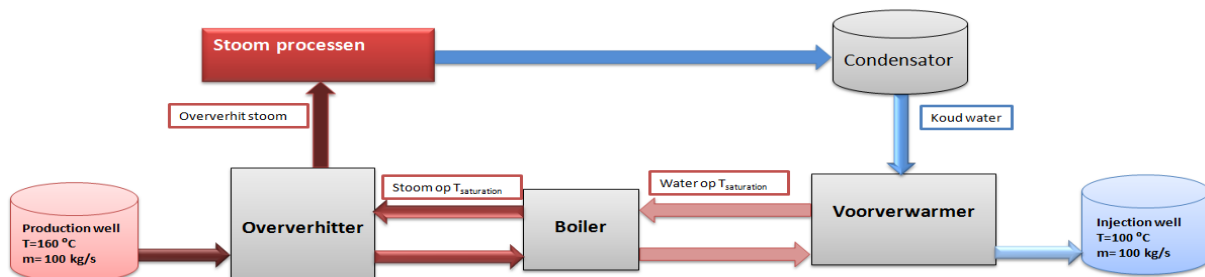
Het water uit de geothermische bron wordt daarna naar de boiler geleid. Er wordt hierbij verondersteld dat het water nog steeds dezelfde temperatuur heeft, als waarmee het de oververhitter heeft verlaten.

$$\dot{m}_1 * c_p * (T_{hi} - T_{ho}) * \eta = \dot{m}_2 * \Delta H_e \quad [2]$$

$$120 * 3.9 * (179.5 - 145.7) * 0.9 = \dot{m}_2 * 2133 \rightarrow \dot{m}_2 = 6.6 \frac{kg}{s} = 24 ton/h$$

24 ton per uur is nog steeds meer dan de benodigde hoeveelheid van 20 ton per uur. Dit betekent dat het mogelijk is om de geothermische warmte te gebruiken om het stoom te oververhitten.

- c. Bereken voor figuur 1, bij elke stap het thermisch overgedragen vermogen en de temperatuur het water uit de geothermische bron.



De 3 stappen waaraan gerekend moet worden zijn:

- De oververhitter
- De boiler
- De voorverwarmer

De oververhitter

Thermisch benodigde vermogen uit de geothermische bron was al in **b** berekend, dit was:

$$Q = 210/90\% = 234 \text{ kW}$$

De ingaande temperatuur van de geothermische bron was 180 °C en de uitgaande temperatuur was 179.5 °C

De Boiler

Het benodigde vermogen uit de geothermische bron kan berekend worden met [1], hierin is het rendement van de boiler bijgevoegd.

$$Q = \dot{m}_2 * \Delta H_e / 90\% \quad [1]$$

$$Q = 5.6 * 2133 / 90\% = 13272 \text{ kW}$$

De ingaande temperatuur van de geothermische bron is 179.5 °C en de uitgaande temperatuur van de geothermische bron kan berekend worden met [2].

$$\dot{m}_1 * c_p * (T_{hi} - T_{ho}) * \eta = \dot{m}_2 * \Delta H_e \quad [2]$$

$$T_{ho} = 179.5 - 13272 / 120 / 3.9 = 154 \text{ °C}$$

De voorverwarmer

Het benodigde vermogen uit de geothermische bron kan berekend worden met [3]. Houdt hierbij rekening met het feit, dat de warmtecapaciteit van water hoger is dan van proces stoom. De warmtecapaciteit van het proces water wordt geschat op 4.2 kJ/kg°C. Het benodigde vermogen wordt hiermee:

$$Q = \dot{m}_2 * cp * (T_{hi} - T_{ho}) / 90\% \quad [3]$$

$$Q = 5.6 * 4.2 * (143.7 - 70) / 90\% = 1925 \text{ kW}$$

De ingaande temperatuur van het water uit de geothermische bron is 154 °C. De uitgaande temperatuur, die tevens gebruikt kan worden om heet water te produceren voor andere processen, kan berekend worden met een warmtebalans:

$$\dot{m}_1 * cp * (T_{hi} - T_{ho}) = 1925$$

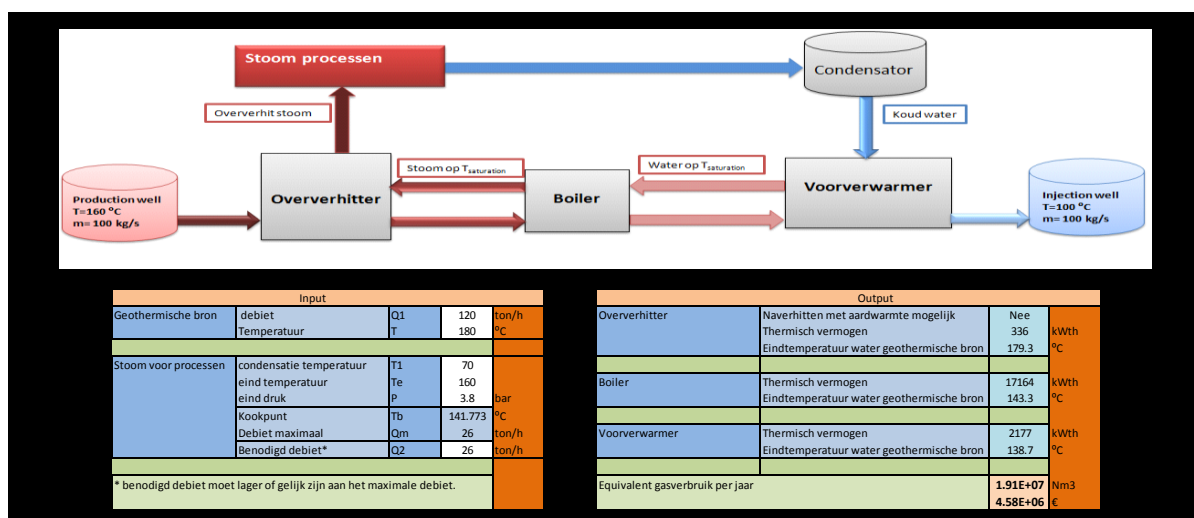
$$T_{hi} = 154 - 1925 / 120 / 3.9 = 150 \text{ } ^\circ\text{C}$$

.In het bijgeleverde Excel document kunnen de bovenstaande berekeningen worden overgedaan met verschillende variabelen. De volgende variabelen zijn in dit bestand meegenomen:

- Temperatuur van de geothermische bron
- Debiet van de geothermische bron
- Condensatie temperatuur = begin temperatuur proces water
- Gewenste druk
- Gewenste temperatuur

Met het invullen van deze variabelen kunnen de hierboven gestelde vragen (a,b en c) beantwoord worden.

Appendix E2 Excel Tool



Figuur E1 Overzicht Excel tool

Input				
Geothermische bron	debiet	Q1	120	ton/h
	Temperatuur	T	180	°C
Stoom voor processen	condensatie temperatuur	T1	70	bar
	eind temperatuur	Te	160	
	eind druk	P	3.8	
	Kookpunt	Tb	141.773	
	Debiet maximaal	Qm	26	
	Benodigd debiet*	Q2	26	ton/h
* benodigd debiet moet lager of gelijk zijn aan het maximale debiet.				

Figuur E2 Overzicht invulwaarden Excel tool, wit = invullen & blauw= niet invullen

Output			
Oververhitter	Naverhitten met aardwarmte mogelijk	Nee	kWth °C
	Thermisch vermogen	336	
	Eindtemperatuur water geothermische bron	179.3	
Boiler	Thermisch vermogen	17164	kWth °C
	Eindtemperatuur water geothermische bron	143.3	
Voorverwarmer	Thermisch vermogen	2177	kWth °C
	Eindtemperatuur water geothermische bron	138.7	
Equivalent gasverbruik per jaar		1.91E+07	Nm3
		4.58E+06	€

Figuur E3 Uitkomsten van berekeningen onder figuur E2 gekozen invulwaarden.