

# **Dutch Initiative on Thorium Molten Salt Reactors (DIMOS)**

Onuitputtelijk energie,  
Schoon, Betrouwbaar en CO<sub>2</sub>-vrij

**Auteurs:**

**J.L. Kloosterman, J. Sietsma, A. Smith  
Technische Universiteit Delft**

**S. de Groot, R. Hania, F. Roelofs  
NRG Petten**

**Met bijdragen en deelname van:**

**TU/Eindhoven  
Universiteit Twente  
DIFFER Eindhoven  
HIT, Delft  
Urenco, Almelo  
VDL, Eindhoven**

**Email: [J.L.Kloosterman@tudelft.nl](mailto:J.L.Kloosterman@tudelft.nl)**

<b>Indieners en deelnemers</b>		
Prof. Dr. Jan Leen Kloosterman	TU Delft	Hoogleraar Kernreactorfysica
Prof. Dr. Rudy Konings	TU Delft	Hoogleraar Chemie van de splijtstofcyclus
Dr. Danny Lathouwers	TU Delft	Onderzoeker Neutron transport theorie
Dr. Martin Rohde	TU Delft	Onderzoeker Warmte en massa transport
Dr. Henk Schut	TU Delft	Onderzoeker Defecten in materialen
Dr. Anna Smith	TU Delft	Onderzoeker Chemie van de splijtstofcyclus
Prof. Dr. Jilt Sietsma	TU Delft	Hoogleraar Metaalkunde
Dr. Behnam Taebi	TU Delft	Onderzoeker Ethiek van techniek
Prof. Dr. Marc Geers	TU Eindhoven	Hoogleraar Mechanica van materialen
Prof. Dr. A.H. van den Boogaard	Universiteit Twente	Hoogleraar Nonlinear Solid Mechanics
Prof. Dr. Marco de Baar	DIFFER	Hoogleraar Metaalkunde
Ir. Sander de Groot	NRG	Ontwikkelaar Bestralingstechnologie
Dr. Ralph Hania	NRG	Onderzoeker Bestralingstechnologie & radiochemie
Ir. Ferry Roelofs	NRG	Onderzoeker Computational fluid dynamics
Dr. Cock Heemskerk	HIT	CEO Heemskerk Innovative Technologies
Ir. Ad Louter	URENCO	CEO URENCO Nederland
Dr. Hans Priem	VDL ETG	Manager Van der Leegte Enabling Technologies Group

## Samenvatting

Met dit voorstel hebben de Nederlandse technische universiteiten, onderzoeksinstituten en bedrijven die een belangrijke bijdrage kunnen leveren aan de ontwikkeling van de Thorium gesmolten zout reactor (In het Engels: Thorium-MSR) hun krachten gebundeld met als belangrijkste doel:

### De ontwikkeling van een nieuwe schone en betrouwbare energiebron vòòr 2050

De Thorium-MSR is een nieuwe vorm van kernenergie die twee innovatieve aspecten in zich draagt:

- Het gebruik van **thorium** in plaats van uranium. Thorium is overvloedig aanwezig en kan geheel worden omgezet in energie. Thorium is een vrijwel onuitputtelijke energiebron die de wereld voor tienduizenden jaren van elektriciteit kan voorzien.
- De energieopwekking in **gesmolten zout reactoren**. Met een gesmolten zout reactor kan op zeer veilige wijze het thorium worden omgezet in elektriciteit en/of hoge-temperatuurwarmte zonder noemenswaardige productie van plutonium en ander langlevend kernafval. Het risico van het resterende kernafval daalt na 300 jaar tot een verwaarloosbare niveau.

Dit voorstel heeft als doel de ontwikkeling van de Thorium-MSR drastisch te versnellen. Nederland is hier bij uitstek voor geëquipeerd door de kennis en onderzoekservaring bij TU Delft, coördinator van het Europese onderzoeksprogramma op dit gebied, en de unieke infrastructuur, zoals de Hoge Flux Reactor, bij het NRG in Petten. Deze combinatie geeft Nederland een uniek 'window-of-opportunity' van ruim 10 jaar. De Hoge Flux Reactor (HFR) in Petten is namelijk als enige onderzoeksreactoren in de wereld ingericht met een faciliteit waar grote objecten kunnen worden bestraald. Bovendien beschikt NRG over de benodigde 'hot-cells' en speciale laboratoria en instrumenten voor het onderzoek aan bestraalde materialen en objecten.

Door een groot bestralingsexperiment te plaatsen naast de reactorkern van de HFR kunnen de belangrijke effecten van straling op de chemie en de fysica van materialen en zouten worden onderzocht onder omstandigheden zoals die ook in een echte gesmolten zout reactor zouden plaatsvinden. Op deze wijze kunnen materialen worden getest en chemische processen worden gekarakteriseerd zonder dat er een dure testreactor hoeft te worden gebouwd.

Onderstaand programma leidt tot de demonstratie van alle technologieën die de Thorium-MSR mogelijk maakt. Het uiteindelijke doel is om te komen tot een ontwerp voor een prototype Thorium-MSR, dat goed is onderbouwd met de in het project gegenereerde experimentele data en gevalideerde modellen. Na afloop van dit programma kan worden gestart met de bouw van deze reactor en vervolgens met het ontwerp en bouw van een vermogensproductiereactor. Via deze snelle ontwikkelroute, die alleen in Nederland kan plaatsvinden, kan de Thorium-MSR vanaf 2050 een belangrijke bijdrage leveren aan onze energievoorziening in de vorm van schone CO<sub>2</sub>-vrije elektriciteit en hoge-temperatuur warmte voor industriële toepassingen.

De kwaliteit van het onderzoek en de infrastructuur in Nederland maakt van Nederland

een gidsland op dit gebied. De Nederlandse politiek kan deze uitgangspositie benutten en versterken door het onderzoek gedurende langere tijd substantieel te ondersteunen, waardoor Nederland wereldwijd een leidende positie krijgt die aanzuigend zal werken op toptalent onder wetenschappers, ingenieurs en studenten. Om dit effect te bevorderen, zal zoveel mogelijk onderzoek worden geconcentreerd op één campus om tevens de opleiding van studenten tot de nieuwe generatie wetenschappers, ingenieurs en ontwerpers mogelijk te maken. Met de kennis en ervaring die dit programma zal genereren, kan zoals hierboven geschetst in een versneld traject een commerciële Thorium-MSR centrale worden ontwikkeld.

In dit document is een project geschetst dat loopt tót en met de ontwikkeling van een eerste reactor. Uiteraard is een dergelijk plan op dit moment alleen maar voor de eerste 10-15 jaren concreet in te vullen. Al doende zal blijken welke onderwerpen meer en welke minder aandacht vergen. Met dit programma is een bedrag gemoeid van circa 200 miljoen euro. De uitvoering van dit plan zal leiden tot grote economische spin-off voor Nederland in een hooggekwalificeerd vakgebied en natuurlijk tot een schone onuitputtelijke energiebron voor onze toekomst.

## I. Inleiding

De wereldbevolking is afgelopen twee eeuwen met een factor zeven toegenomen en zal naar verwachting groeien tot 11 miljard mensen in 2100. Samen met een stijgend energieverbruik per hoofd van de bevolking zal dit leiden tot een sterke toename in het wereldenergieverbruik. In onze energiebehoefte wordt momenteel voor meer dan 80% voorzien door verbranding van fossiele brandstoffen, hetgeen gepaard gaat met milieuvervuiling en emissie van CO<sub>2</sub> en andere broeikasgassen. Dit leidt tot een stijging van de gemiddelde temperatuur op aarde met uiteindelijk ingrijpende gevolgen voor grote groepen van de wereldbevolking.

Tijdens de klimaatconferentie in Parijs (COP21) hebben alle deelnemende landen waaronder de Europese Unie afgesproken de uitstoot van CO<sub>2</sub> en andere broeikasgassen sterk te reduceren om zeker te stellen dat de verwachte temperatuurstijging met grote waarschijnlijkheid kleiner is dan 2°Celsius. Ook Nederland heeft zich hieraan gecommitteerd, hetgeen tot uiting komt in de Energieagenda van het Ministerie van Economische Zaken. Daarin wordt gesteld dat het kabinet een energietransitie wil realiseren die stuurt op één enkelvoudig doel, namelijk de reductie van de uitstoot van CO<sub>2</sub> in 2050 tot slechts 5% van die in 1990. Dit is een zeer ambitieuze doelstelling die met inzet van bestaande middelen niet kan worden behaald.

De Adviesraad voor Wetenschap, Technologie en Innovatie (AWTI) heeft in zijn recente publicatie "Oppakken en doorpakken" gesignaleerd dat energie-innovatie in Nederland achterblijft bij de doelstellingen en dat een meer sturende rol van de overheid noodzakelijk is. In zijn aanbevelingen stelt de AWTI dat, gezien de grote opgave waar Nederland voor staat, meer aandacht en budget nodig is voor radicale energie-innovatie. Daarnaast is Nederland sinds 2016 aangesloten bij het internationale Mission Innovation programma, waarin leden met elkaar hebben afgesproken om hun collectieve investeringen in energieonderzoek vanaf 2017 te verdubbelen.

In de ogen van veel deskundigen kan en moet kernenergie een belangrijke bijdrage leveren aan een CO<sub>2</sub>-vrije energievoorziening. Voorwaarde is wel dat kernenergie veilig is en geen langlevend kernafval produceert. De Thorium gesmolten zout reactor (in het Engels "Thorium Molten Salt Reactor" of "Thorium-MSR") is een nieuwe vorm van kernenergie die aan deze voorwaarden kan voldoen. De Thorium-MSR kan in enkele tientallen jaren worden gerealiseerd en vervolgens een grote bijdrage leveren aan de ambitieuze doelstellingen van de Nederlandse overheid en de EU, maar dat vereist een positieve keuze en een gecoördineerde aanpak. Dit document beschrijft een voorstel voor de ontwikkeling van de Thorium-MSR, die elektriciteit en hoge-temperatuurwarmte kan produceren met de volgende kenmerken:

- **Schoon.**  
De Thorium-MSR stoot geen CO<sub>2</sub> uit en laat nauwelijks langlevend kernafval na.
- **Duurzaam.**  
De aardkorst bevat voldoende thorium om gedurende tienduizenden jaren in de mondiale elektriciteitsvraag te kunnen voorzien. Bovendien komt thorium voor in een groot aantal landen en is de leverantie gegarandeerd.
- **Goedkoop.**

Alhoewel nog geen concrete voorspelling van de kosten gegeven kan worden, zijn de kenmerken gunstig voor een lage kostprijs. Er is veel minder transport van radioactieve materialen nodig en de grondstof thorium is in overvloed aanwezig tegen verwaarloosbare kostprijs.

- **Veilig.**

De splijtstof is opgelost in het koelmiddel en kan eenvoudig worden gekoeld.

Tevens leidt een verstoring van het systeem tot een automatische afschakeling van het splijttingsproces. Het nucleaire systeem staat niet onder druk en er is geen kracht aanwezig die tot verspreiding van radioactiviteit kan leiden.

Dit voorstel omvat de eerste fase van 12 jaar van dit Thorium-MSR Initiatief en richt zich op de unieke en belangrijke bijdrage die Nederland kan leveren aan de ontwikkeling van de Thorium-MSR, namelijk het testen en karakteriseren van de speciale materialen en technologieën van een commerciële MSR in realistische omstandigheden:

- Theoretische en experimentele onderbouwing van essentiële ontwerpkeuzes.
- Opleiden van hooggekwalificeerde wetenschappers, ingenieurs en technici.
- Kwalificatie van zouten en materialen voor de Thorium-MSR.
- Demonstratie van processen voor de zuivering van zouten.
- Testen en demonstratie van MSR veiligheidsprincipes en componenten.
- Testen van de diverse processen in samenhang en in realistische bestralingscondities in de Hoge Flux Reactor (HFR) in Petten.
- Conceptontwerp van een Thorium-MSR.

Deze Nederlandse bijdrage is gestoeld op onze kennis en ervaring en op onze unieke faciliteiten. Zij kan de basis vormen voor een snel en verantwoord ontwerp van een energiesysteem waarvan de technologiebasis al 50 jaar geleden in een uitgebreid experiment is aangetoond, het perspectief van een schone, overvloedige en betaalbare energiebron buiten kijf staat, maar de implementatie nog ontwikkeling vergt. Deze aanpak biedt tal van mogelijkheden voor de Nederlandse industrie (metaalindustrie, machinebouw, chemische industrie, instrumentatie, automatisering, robotisering, ...) om een grote rol te spelen in de toekomstige mondiale energievoorziening.

Met de unieke Nederlandse kennisbasis en infrastructuur kan met het voorgestelde programma een belangrijke bijdrage worden geleverd aan de ontwikkeling van een CO<sub>2</sub>-vrij energieproductiesysteem, en kan de Nederlandse industrie sterk profiteren van een grote voorsprong in kennis en ervaring met betrekking tot deze veelbelovende en hooggekwalificeerde technologie.

## II. Concept

De reactorkern van een gesmolten zout reactor bestaat uit een cilindrisch blok grafiet met een afmeting van enkele meters met daarin kanalen waar een gesmolten fluoride zout doorheen stroomt. In het zout zitten zowel thoriumfluoride als uraniumfluoride opgelost. Het uranium betreft in dit geval de kunstmatige isotoop uranium-233 die eerder in het zout is gevormd door neutronvangst in het thorium. Het zout heeft een bedrijfstemperatuur van 600°C en zal in de reactorkern opwarmen tot circa 700°C. Via een warmtewisselaar en een tussencircuit gevuld met zout of vloeibaar metaal zal de warmte uiteindelijk worden omgezet in elektriciteit of als proceswarmte verder worden gedistribueerd. De hoge bedrijfstemperatuur van de reactor zorgt voor een efficiënte omzetting in elektriciteit, en maakt de opgewekte warmte via een warmtekracht koppeling ook direct bruikbaar voor industriële processen. Via een tussenstap kan de temperatuur van de warmte worden verhoogd naar meer dan 1000°C, zodat deze geschikt is voor gebruik in de metaalindustrie en overige industrieën. Deze toepassingen kunnen niet eenvoudig worden bediend met bestaande hernieuwbare energiebronnen en ook niet met conventionele kerncentrales.

Tijdens reactorbedrijf worden splijttingsproducten gevormd waarvan de meeste opgelost blijven in het zout, sommige gasvormig zijn (bijvoorbeeld krypton en xenon) en andere metallische (de edelmetalen) als vaste deeltjes zullen neerslaan in de koudere delen van het splijstofcircuit. Bovendien beïnvloeden de splijttingsproducten de kettingreactie waardoor deze uiteindelijk zou doven. Om dat te voorkomen moet het zout continu worden gezuiverd door middel van fysische en chemische processen. Hiertoe wordt een kleine fractie van het zout afgetapt en behandeld, vervolgens voorzien van vers thorium en weer teruggevoerd naar de reactor. Dit betekent dat de reactor niet hoeft te worden stilgelegd voor verversing van de splijstof, zoals bij huidige reactoren het geval is.

Door gebruik van een vloeibaar splijstofzout in plaats van vaste splijstofstaven bezit de reactor uitstekende veiligheidskenmerken. Als het zout opwarmt zal de dichtheid van de splijstof in de reactorkern afnemen totdat deze onvoldoende is om de kettingreactie in stand te houden. De kettingreactie dooft dan vanzelf uit. Dit is een natuurlijk proces dat geen kunstmatig ingrijpen nodig heeft en dus de reactorveiligheid garandeert. Bovendien bevindt zich onderin het reactorvat een afvoerpijp die is afgesloten met een vriesplug. Dit is een prop bevroren zout die van buitenaf met inzet van elektriciteit wordt gekoeld. Indien de energievoorziening uitvalt dan zal de plug smelten en het splijstofzout in veilige opslagtanks onderin het reactorvat stromen. Ook in dit geval wordt de reactor dus in veilige toestand gebracht zonder menselijk ingrijpen. Nadrukkelijk wordt erop gewezen dat de bovenstaande veiligheidsprincipes bewezen technologie is en reeds zijn toegepast in experimentele reactoren in de jaren vijftig en zestig van de vorige eeuw.

Het gebruik van thorium als brandstof heeft het zeer grote voordeel dat praktisch geen langlevend kernafval wordt geproduceerd. In uranium-gebaseerde reactoren zorgt slechts 4% van de uraniumatomen voor de omzetting van energie; de andere 96% ondergaat deels kernreacties die leiden tot de productie van plutonium en ander langlevend kernafval. Bij thorium wordt 100% gebruikt voor de productie van energie.

### III. Kenmerken

Het gebruik van een vloeibaar splijtstofzout biedt de volgende unieke voordelen:

- Door de thermische expansie van het zout zal de dichtheid van de splijtstof in de reactorkern afnemen met toenemende temperatuur. Dit levert een terugkoppeling op die automatisch in werking treedt en de kettingreactie zal doven.
- Door natuurlijke circulatie van het zout kan de nawarmte (ten gevolge van het radioactief verval van de splijttingsproducten) efficiënt worden afgevoerd.
- Het zout kan altijd veilig worden opgeslagen in tanks onderin het reactorgebouw. Dit mechanisme treedt automatisch in werking via natuurlijke processen.
- Doordat het splijtstofzout vloeibaar is kan het continu worden gezuiverd. Dit verlaagt de concentratie van splijttingsproducten in het zout. De resterende splijttingsproducten zijn sterk gebonden aan het zout en kunnen niet vrijkomen.
- De samenstelling van het splijtstofzout kan continu worden aangepast. In theorie kan een reactor worden geladen met het langlevend kernafval van bestaande reactoren en nadat dit is verbruikt overschakelen op het schone thorium.

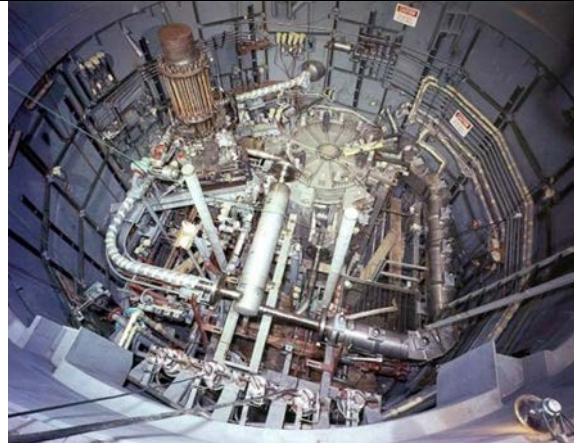
Bovengenoemde voordelen van het gebruik van een vloeibaar splijtstofzout leiden tot de volgende kenmerkende voordelen van gesmolten zout reactoren. De thorium-MSR is:

- **Passief veilig.** De Thorium-MSR is zeer sterk zelfregulerend en zal te allen tijde veilig afschakelen.
- **Schoon en duurzaam.** De Thorium-MSR produceert geen langlevend kernafval en kan zelfs bestaand langlevend kernafval vernietigen. De thoriumvoorraden kunnen voor tienduizenden jaren in de mondiale elektriciteitsvraag voorzien.
- **Toekomstbestendig.** De Thorium-MSR heeft excellente eigenschappen om de schommelingen in het aanbod van zon en wind te compenseren en is daarmee goed te combineren met andere duurzame energieproductiesystemen.



#### IV. Historische en Internationale context

De gesmolten zout reactor heeft zijn technologische haalbaarheid al bewezen. In de jaren vijftig van de vorige eeuw werd bij het Oak Ridge National Laboratory in de VS geëxperimenteerd met verschillende concepten, zoals het "Aircraft Reactor Experiment" (ARE) dat met een vermogen van 2,5 MW een zouttemperatuur van 860 °C bereikte, en het "Molten Salt Reactor Experiment" (MSRE). De laatste reactor heeft gedurende vijf jaar succesvol gedraaid met uranium en plutonium als splijtstof, echter zonder gebruik van thorium en zonder zuivering van het splijtstofzout. Dit programma werd begin jaren zeventig gestopt ten gunste van de natrium-gekoelde snelle reactor die parallel in de VS werd ontwikkeld. Deze reactorlijn werd als veelbelovend gezien vanwege het feit dat met deze technologie vijftig maal meer energie uit uranium kan worden vrijgemaakt en sneller de benodigde splijtstof voor nieuwe reactoren kan worden gekweekt. De natrium-gekoelde snelle reactor is echter nooit commercieel rendabel geworden.



Figuur: foto van het 'Molten Salt Reactor Experiment' in Oak Ridge National Lab.

Sinds het begin van deze eeuw is de belangstelling voor de MSR enorm toegenomen. In China draait een groot onderzoeksprogramma om een Thorium-MSR te ontwikkelen en te bouwen. Dit betreft een demonstratiereactor die grote gelijkenis vertoont met de MSRE uit de jaren zestig. De totale investering van dit programma bedraagt enkele honderden miljoenen dollars. In Rusland werkt het Kurchatov Instituut aan een versie van de MSR die plutonium en ander langlevend afval kan vernietigen. Dit is het MOSART concept. De kennis en ervaring van deze wetenschappers is groot, maar de financiële slagkracht is beperkt. In de VS is begin 2016 een startbudget van 40 miljoen dollar vrijgemaakt voor onderzoek naar gelijksoortige concepten. De aandacht ligt hier op het doel om effectief de langlevende componenten uit bestaand kernafval te kunnen vernietigen. In Europa wordt onderzoek gedaan naar de "Molten Salt Fast Reactor" (MSFR) die als standaardoptie werkt met thorium, maar ook langlevend kernafval kan vernietigen. Dit onderzoek wordt uitgevoerd door 11 partners onder leiding van TU Delft. Het budget van 5 miljoen euro is echter gering in vergelijking met dat in China en de VS, terwijl de wetenschappelijke uitdagingen van de MSFR zeer groot zijn.

Naast deze onderzoeksprogramma's zijn er ook diverse startups actief, zoals Terrestrial Energy uit Canada, dat een kleine MSR wil ontwikkelen voor de verbranding van bestaand kernafval. Dit doel wordt ook nagestreefd door Terrapower, gefinancierd door Bill Gates, en Transatomic Power (beide in de VS). Het bedrijf FliBe energy (VS) streeft naar een Thorium-MSR zoals ook beschreven in dit voorstel. Ook in Europa zijn startups actief, maar op kleine schaal en met geringe financiële middelen. Bovendien hebben deze bedrijven geen toegang tot de bestralingsfaciliteiten zoals wij in Nederland hebben en zullen zij zich waarschijnlijk te zijner tijd ook tot ons (moeten) richten.

## V. Beschrijving van het project

Nederland kan een leidende rol spelen op de deelgebieden die cruciaal zijn voor de ontwikkeling van de Thorium-MSR en zo de ontwikkeling van deze energie-optie drastisch versnellen. TU Delft en NRG dragen al in belangrijke mate bij aan het Europese onderzoek, terwijl de kennis en infrastructuur bij DIFFER en andere partners de Nederlandse inbreng in belangrijke mate zal versterken. Met name op het gebied van kwalificatie van fluoridezouten, constructiematerialen, reactorcomponenten en – systemen kan Nederland een belangrijke rol spelen door de expertise bij TU Delft, NRG, DIFFER en andere universiteiten de mogelijkheid om grote onderdelen in realistische condities te beproeven in de Hoge Flux Reactor (HFR) in Petten.

Het primaire doel van het hier voorgestelde ontwikkelingsproject is dan ook te komen tot een realistische test voor de primaire materialen en componenten van de MSR. Hiertoe dient een gesmolten zout circuit te worden geplaatst in de ‘pool-side facility’ van de HFR in Petten waarin een uitgekende selectie van splijtstofzouten en constructiematerialen kan worden getest in een intens stralingsveld onder goed beheersbare condities en met nauwkeurige instrumentatie. Deze opstelling zal ook belangrijke componenten als pompen en vriespluggen kunnen testen en kwalificeren als ook de zuiveringsprocessen voor het splijtstofzout. De HFR is hiervoor bij uitstek geschikt omdat niet alleen de neutronflux in de kern tienmaal hoger is dan in de meeste andere onderzoeksreactoren, waardoor veel van de te bestuderen verschijnselen sneller en nauwkeuriger kunnen worden bestudeerd, maar vooral ook omdat de HFR als enige onderzoeksreactor in de wereld een ‘pool-side facility’ heeft waarin een dergelijke grote proefopstelling geplaatst kan worden. Dit geeft Nederland een unieke mogelijkheid om de technologie voor de Thorium-MSR te ontwikkelen en te demonstreren, waarna de weg openligt voor de verdere commerciële ontwikkeling van deze veelbelovende energie-optie.

Bovenstaande ontwikkeling zal worden uitgevoerd door wetenschappers en ingenieurs van Nederlandse kennisinstellingen als TU Delft, NRG, DIFFER, TU Eindhoven en Universiteit Twente met inzet van studenten, promovendi en postdocs. De wetenschappers en de studenten zullen wereldwijd worden geworven om te garanderen dat het onderzoek onder de beste condities met de beste mensen wordt uitgevoerd, terwijl tevens een nieuwe generatie wetenschappers en ingenieurs wordt opgeleid die nodig zijn voor de verdere ontwikkeling van de Thorium-MSR.

Het onderzoek richt zich op de volgende speerpunten:

### V.1 LUMOS faciliteit voor bestraling van stromend zout in de HFR: testen en kwalificeren onder representatieve MSR omstandigheden

De kern van het voorstel is het ontwerp en de bouw van een experimentele faciliteit waarin een splijtstofzout zal worden rondgepompt door een speciaal experimenteel circuit op de unieke ‘pool-side facility’ dicht tegen de reactorkern van de HFR. Op deze wijze kunnen splijtingsreacties worden geïnitieerd door neutronen van de HFR. Zo kunnen op relatief eenvoudige wijze belangrijke experimenten worden uitgevoerd onder realistische condities, geregistreerd door nauwkeurige meetinstrumenten, zonder dat hiervoor een demonstratiereactor hoeft te worden gebouwd. De gehele LUMOS-faciliteit kan in een niet-nucleaire omgeving worden gebouwd en getest voordat deze naast de HFR wordt

geplaatst; met deze werkwijze kan veel tijd worden gewonnen in de ontwikkeling van de MSR. NRG werkt op dit moment reeds aan het conceptueel ontwerp van deze opstelling.

Een klein deel van het splijtstofzout zal via een zogenaamde 'bypass' naar een zuiveringssysteem worden geleid waar met diverse processen zoals hieronder beschreven de diverse groepen splijtingsproducten en actiniden van het zout zullen worden afgescheiden. De LUMOS-faciliteit is daarmee een ideaal middel om versneld splijtstofzouten, constructiematerialen, componenten, controlesystemen en 'reactor performance codes' te kwalificeren, en om de 'proof of concept' te leveren van de essentiële processen in een MSR. Hieronder volgt een beschrijving van het onderzoek dat ten behoeve van en in LUMOS zal worden uitgevoerd.

## V.2 Karakteriseren van splijtstofzouten

Het splijtstofzout is niet alleen het oplosmedium voor thorium en het splijtbare uranium, maar tevens voor de gevormde splijtingsproducten. In de praktijk is het zout dus een complex chemisch systeem, waarbij de temperatuur en de electrochemische potentiaal het gedrag en de eigenschappen bepalen. Om de optimale zoutsamenstelling te bepalen en de performance van het zout te garanderen, is een nauwkeurige thermochemische beschrijving nodig. Dit zal worden gerealiseerd door middel van gedetailleerde thermochemische en fysisch-chemische modellering van het splijtstofzout en ondersteunende experimenten.

De kennis van het zout op atomair niveau is essentieel om de chemie te begrijpen en te beschrijven en daarom zal tevens theoretisch en experimenteel onderzoek worden uitgevoerd naar de moleculaire structuur van de zouten en de wijze waarop de splijtingsproducten in deze structuur kunnen worden ingepast. Deze aanpak is vernieuwend in vergelijking met de empirische benadering uit de jaren zestig/zeventig en de resultaten zullen leiden tot belangrijke kennis over de retentie-eigenschappen van de radioactieve splijtingsproducten in het zout en het effect op de corrosie van het vat en andere reactorcomponenten in de kern. Dit is tevens belangrijk voor de ontwikkeling van de chemische afscheidingsstappen en, voor zover het vluchtige stoffen betreft, voor de veiligheidsbeoordeling van de MSR.

Tevens zullen meetmethoden worden ontwikkeld om de thermo-fysische eigenschappen van splijtstofzouten als functie van de temperatuur te bepalen. Aandacht zal hierbij uitgaan naar eigenschappen die voor de veiligheid van het LUMOS gesmolten zout circuit en van latere commerciële reactoren van belang zijn, zoals de smelttemperatuur, warmtegeleiding, thermische expansie, viscositeit en dichtheid van de zouten.

Als ultiem doel zijn experimenten gepland in het LUMOS gesmolten zout circuit in de HFR en zullen geschikte meetmethoden worden ontwikkeld om tijdens de bestraling van de splijtstofzouten in-situ de samenstelling van het zout te meten en het eventuele vrijkomen van de gasvormige en mogelijk vluchtige splijtingsproducten te bepalen. Deze en andere methoden zullen tevens worden gebruikt om de samenstelling van het bestraalde zout na bestraling te bepalen. Hiermee zullen methoden en strategieën worden ontwikkeld om de samenstelling van het splijtstofzout tijdens de bestraling te kunnen aanpassen om de vrijgifte van elementen en de interactie van zout met constructiematerialen te minimaliseren.

### V.3 Testen van constructiematerialen

Constructiematerialen in een Thorium-MSR worden blootgesteld aan een combinatie van omstandigheden die het materiaal sterk op de proef stellen: hoge temperatuur, corrosieve omgeving en straling. Niettemin moeten de eigenschappen, stabiliteit en integriteit van de materialen gegarandeerd worden over een termijn van enkele decennia. Om dit te kunnen doen willen wij de invloed van de omstandigheden op de materialen beter begrijpen en goed kunnen voorspellen.

In de omstandigheden van de Thorium-MSR vinden vier belangrijke processen plaats die de materialen aantasten: (i) corrosie, (ii) langzame deformatie op hoge temperatuur (kruip), (iii) structuurveranderingen op hoge temperatuur, en (iv) stralingsschade. Deze processen zijn goed bekend en treden in alle metalen op, maar zijn in MSR condities onvoldoende gekwantificeerd. Daarom dient onderzoek gedaan te worden om de voorspelling van het materiaalgedrag met voldoende nauwkeurigheid mogelijk te maken. Een grote uitdaging hierbij is dat met name stralingsschade de andere processen in het materiaal sterk beïnvloedt.

Het materiaalonderzoek zal zich richten op nikkel-gebaseerde legeringen, omdat de nikkellegering Hastelloy-N in het MSRE-experiment gedurende vijf jaar goed bestand bleek tegen de aldaar heersende condities. Het onderzoek zal in een eerste fase gericht zijn op het bestuderen van de afzonderlijke processen, waarvan het doel is om de fysische modellen te verfijnen die het mogelijk maken het lange-termijnverloop van de afzonderlijke processen te voorspellen. Deze modellen zullen worden gevalideerd met experimentele resultaten van laboratoriumonderzoek en bestralingsonderzoek in contact met statisch zout. In de tweede fase moet de combinatie van invloeden bestudeerd worden. De fysische principes, vastgelegd in de eerste fase, blijven ook van kracht in de gecombineerde omstandigheden, maar kwantitatief kunnen significante veranderingen optreden, bij voorbeeld door de stralingsschade, het dynamische karakter van het contact met het zout en samenstellingsveranderingen door corrosie, die de kinetiek van structuurveranderingen sterk kunnen versnellen.

Waar in de eerste fase laboratoriumonderzoek en bestralingsexperimenten validatie en kwantificering van de fysische modellen mogelijk maken, dient in de tweede fase de combinatie van de dynamische omstandigheden in een Thorium-MSR toegepast te worden. Deze fase van het onderzoek zal plaatsvinden in de LUMOS-faciliteit in de HFR.

Voor het materiaalonderzoek zal de TU Delft, gespecialiseerd in de structuur van metalen, nauw samenwerken met de Technische Universiteiten in Twente en Eindhoven, vanwege de expertise op het gebied van mechanisch gedrag van materialen, en met DIFFER, vanwege hun expertise op het gebied van het bestralen van materialen en het onderzoek daaraan.

### V.4 Ontwikkelen en testen van zuiveringsprocessen voor zouten

Om het splijtstofzout tijdens reactorbedrijf te kunnen zuiveren zijn extractieprocessen voorgesteld die met verschillende fysisch-chemische methoden groepen chemisch verwante splijtingsproducten van het zout afscheiden. Dit betreft in eerste instantie de afscheiding van gasvormige splijtingsproducten en edelmetalen met een stroom van heliumbelletjes door het zout. De experimenten in de MSRE hebben laten zien dat op

deze wijze niet alleen xenon en andere gasvormige splijtingsproducten aan het zout kunnen worden onttrokken, maar dat ook precipitaten van edelmetalen op nano- en micrometerschaal door de gasbelletjes worden afgescheiden. Hoewel het principe van deze zuiveringsstap is aangetoond, is een dieper begrip nodig voor optimalisatie van de methode. Dit onderzoek zal zowel theoretisch, experimenteel als numeriek van aard zijn en na testen in laboratoriumcondities zal deze scheidingsstap in de HFR worden toegepast ter validatie en optimalisatie onder echte MSR omstandigheden.

Ook zal een alternatieve, innovatieve methode worden onderzocht, die is gebaseerd op het vernevelen van splijtstofzout in een speciale nevelkamer. Zo neemt het contact oppervlak tussen de zoutfase en het gas drastisch toe waardoor ook de gas-vormige splijtingsproducten en de edelmetalen uit de vloeistoffase kunnen worden verwijderd.

Tevens zal aan TU Delft worden onderzocht of met een 'lab on a chip' een scheiding kan worden aangebracht van specifieke elementen die interessant zijn voor medische of industriële toepassingen. In dat geval stroomt het zout door een geëtst microkanaal op een chip in contact met een extraherende vloeistof die specifiek één of meerdere elementen absorbeert. Een aansprekend voorbeeld is molybdeen dat in toenemende mate wordt gebruikt voor diagnostiek in de gezondheidszorg. Deze scheidingstechniek staat nog in de kinderschoenen maar biedt groot perspectief.

De tweede stap in het scheidingsproces betreft de separatie van uranium, neptunium en diverse splijtingsproducten met behulp van fluorinatie en zal met name binnen de NRG met expertise en inbreng van URENCO plaatsvinden. Hoewel de fluorchemie van uranium goed bekend is uit de uraniumverrijkingsindustrie, moet de toepassing ervan op gesmolten zout met daarin een mengsel van splijtingsproducten nog verder worden ontwikkeld. Het perspectief van deze methode is echter zeer groot, mede vanwege de mogelijkheid om medische isotopen zoals molybdeen in zuivere vorm af te scheiden.

Tenslotte zal de afscheiding van de resterende actiniden en lanthaniden in het zout met behulp van electrochemie worden onderzocht. Dat laatste zal in eerste instantie experimenteel per element worden uitgevoerd maar uiteindelijk ook in een hot-cell laboratorium worden toegepast op bestraald splijtstofzout uit het LUMOS gesmolten zout circuit met daarin een mengsel van elementen.

#### V.5 **Warmteoverdracht en experimentele vloeistofdynamica**

De Thorium-MSR wordt gekenmerkt door de toepassing van een gesmolten zout als koelmiddel en als splijtstofdrager. De vloeistofdynamica van zout als koelmiddel is onvoldoende nauwkeurig bekend om aan de huidige eisen met betrekking tot veiligheidsanalyse en vergunningsverlening van zowel LUMOS als latere commerciële reactoren te voldoen. Met experimentele opstellingen, toegerust met geavanceerde meetmethoden, kunnen betere gegevens worden verkregen waarmee deze lacunes kunnen worden opgevuld. Deze data wordt verkregen door experimenteel onderzoek op verschillende schalen:

- Fundamenteel onderzoek naar warmteoverdracht tussen het zout en de reactorwand. Zouten hebben veelal andere warmtetransport eigenschappen dan gassen en vloeistoffen zoals lucht en water waaraan de meeste ingenieurs gewend zijn. Het warmtetransport verloopt dan ook fundamenteel anders.

- Zoutstroming langs een wand of door kleine kanalen. Kenmerkend is dat het zout kan stollen langs de koude wand waarbij het een isolerende laag vormt waardoor een zeer sterke temperatuurgradiënt in het kanaal ontstaat met sterk variërende zouteigenschappen.
- Zoutstroming in een grote opstelling voor de simulatie van reactorsystemen (reactorkern, warmtewisselaar, pomp) waarbij de pompen niet of gedeeltelijk operationeel zijn. Kenmerkend is dat het zout in de MSR door de vervalwarmteproductie intern wordt verwarmd, waardoor de bestaande theoretische kennis op het gebied van natuurlijke circulatie van vloeistoffen niet direct toepasbaar is.

Voor deze toepassingsgebieden zullen experimentele opstellingen worden gebouwd en meetmethoden worden ontwikkeld om belangrijke parameters zoals snelheidsprofielen, temperatuurprofiel en drukval in stromingskanalen, temperatuurprofiel en dikten van gestolde zoutlagen, vloeistofdebiet door pijpen, drukval over pompen, warmtewisselaars en kleppen, en andere optredende fenomenen te bestuderen. In de opstelling kunnen ook demonstratiemodellen van de vriesplug en mechanische kleppen en pompen worden getest. Bovendien zullen modellen en correlaties tussen gemeten parameters worden opgesteld voor gebruik in numerieke codes, en zullen uitgebreide sets van meetdata worden gegenereerd om numerieke modellen en codes te valideren.

## V.6 Veiligheidsanalyses en vergunningsverlening

Een bijzonderheid van de MSR is dat de kettingreactie in sterke mate afhangt van de vloeistofstroming door het transport van splijtingsproducten die grote invloed hebben op de splijtingskettingreactie (dit zijn de zogenoemde 'precursors' en de sterk absorberende splijtingsproducten). Voor de vergunningsverlening van het LUMOS experimentele gesmolten zout circuit in de HFR en voor het ontwerp van commerciële reactoren is daarom een set van nieuwe numerieke codes vereist die de sterke koppeling tussen de vermogensproductie en de vloeistofstroming goed kunnen beschrijven. Bovendien moeten deze codepakketten de resulterende onzekerheid in de resultaten kunnen bepalen. Bestaande pakketten voor vloeistofdynamica zijn hiervoor niet geschikt.

Zowel de TU Delft als NRG ontwikkelen daarom neutronica- en vloeistofdynamicacodes die de ruimtelijke verdeling van de vermogensproductie koppelen aan het stromings- en temperatuurveld. Waar NRG zich richt op de ontwikkeling van een praktisch rekenplatform voor het ontwerp en het vergunningstraject van de LUMOS opstelling in de HFR en de vergunningsverlening van commerciële reactorsystemen, zal TUD zich richten op een high-fidelity rekenplatform dat ook de demonstratiereactor en later commerciële reactorconcepten accuraat kan doorrekenen inclusief de bijzondere verschijnselen die kunnen optreden in de warmtewisselaars, kleppen, pompen, vriesplug, zoutopslagtank en andere componenten. Daarnaast zullen geavanceerde numerieke technieken worden ontwikkeld en toegepast voor de bepaling van de resulterende onzekerheden. De afzonderlijke onderdelen van deze pakketten zullen worden gevalideerd met de resultaten van de experimentele opstellingen zoals eerder beschreven.



## V.7 Ontwerp van componenten en reactorsystemen

De MSR bevat componenten die de veiligheid van de reactor sterk bevorderen maar nooit in andere reactoren zijn getest. Dit zijn de onderdelen die het mogelijk maken het zout onder alle omstandigheden veilig in opslagtanks onderin het reactorgebouw op te slaan. Twee speciale componenten in dit circuit zijn de vriesplug en de zoutopslagtank. Deze zullen met de hierboven genoemde software worden ontworpen en in experimenten met inerte zouten worden getest. Cruciaal zijn de smelt- en stollingsverschijnselen die kunnen optreden in de vriesplug, in de afvoerpijpen en in de opslagtank. Het uiteindelijke doel is deze componenten te testen in de LUMOS faciliteit in de HFR.

Tevens zal in dit werkpakket onderzoek gedaan worden naar nieuwe demonstratie- en productiereactoren en zal een conceptontwerp van een prototype productiereactor worden opgesteld en zoveel mogelijk worden uitgewerkt. De nieuwe veiligheidsrelevante componenten die hierruit voortvloeien zullen worden gebouwd en getest in de LUMOS faciliteit. Ook zullen in dit pakket uitgebreide splijtstofcyclusberekeningen worden uitgevoerd om zeker te stellen dat een MSR zonder problemen kan worden bedreven met de ontwikkelde zuiveringstechnieken. TU Delft zal hiertoe een codesysteem ontwikkelen dat op nauwkeurige wijze de gehele inventaris van de MSR splijtstofcyclus kan bepalen en de evolutie van deze inventaris in de tijd kan uitrekenen met benodigde onzekerheden die inherent zijn aan deze berekeningen. Non-proliferatie aspecten zullen hier uitgebreid worden meegenomen.

Dit werkpakket zal leiden tot een conceptontwerp van een demonstratiereactor of van een vermogensproductiereactor met gevalideerde detailontwerpen van de veiligheidsrelevante processen, systemen en componenten.

## V.8 SALIENT bestralingsexperimenten met stilstaand zout in de HFR

In de SALIENT opstelling zal splijtstofzout in contact met geselecteerde nikkellegeringen worden bestraald in de HFR om inzicht te krijgen in de veranderende chemische samenstelling van splijtstofzout tijdens bestraling, het gedrag van splijttingsproducten in de reactor en de interactie van splijtstofzouten met materialen. Aangezien dit de eerste bestralingsexperimenten met splijtstofzouten zijn sinds tientallen jaren, zal door uitvoering van deze experimenten ook belangrijke ervaring opgedaan worden met het omgaan met splijtstofzout en het gedrag van materialen voor en na bestraling. Ook levert dit experiment belangrijke ervaring op met de veiligheidsanalyses en het vergunningsproces om zo'n bestraling te realiseren en is het een essentiële stap in de richting van het LUMOS gesmolten zout circuit. Het SALIENT programma is reeds in 2015 gestart en zal na het verkrijgen van de benodigde vergunningen in 2017/2018 leiden tot een bestraling in de HFR.

Het SALIENT programma genereert ook bestraald zout met splijttingsproducten en bestraalde materialen die kunnen worden gebruikt in de hot-cells, voor het testen van zuiveringstechnieken. Tenslotte is SALIENT geschikt om tijdens bestraling bepaalde zuiveringstechnieken te testen, en de efficiëntie daarvan als functie van temperatuur, bestraling en bestralingsduur te bepalen.

## V.9 Maatschappelijke en ethische aspecten

Het Maatschappelijk Verantwoord Innoveren (MVI) beoogt de maatschappelijke en ethische aspecten van innovaties in een vroeg stadium in kaart te brengen en mee te nemen in het ontwerpproces. Dit leidt tot een type innovatie dat niet alleen op meer draagvlak in de samenleving kan rekenen, maar ook voldoende rekenschap geeft van de bredere maatschappelijke aspecten. In lijn hiermee zullen de maatschappelijke en ethische aspecten van MSR al tijdens het ontwerpproces in kaart worden gebracht. Veel ogenschijnlijk technische keuzes aan de ontwerptafel hebben een morele dimensie en het MVI-onderzoek richt zich op het expliciet maken van deze keuzes, het faciliteren van een doordacht keuzeprocess en het beredeneren van wat een gerechtvaardigde keuze kan zijn. Bijvoorbeeld hoe we verantwoorde ontwerpkeuzes kunnen maken tussen veiligheid en duurzaamheid indien deze conflicteren. Een maatschappelijk verantwoorde MSR kan niet alleen beter rekenschap geven van de maatschappelijke en ethische aspecten van deze innovatie, maar kan ook rekenen op meer draagvlak in de samenleving.



## VI. Looptijd en Budget

De totale looptijd van het programma bedraagt circa 12 jaar (tot 2030) en levert als belangrijkste producten:

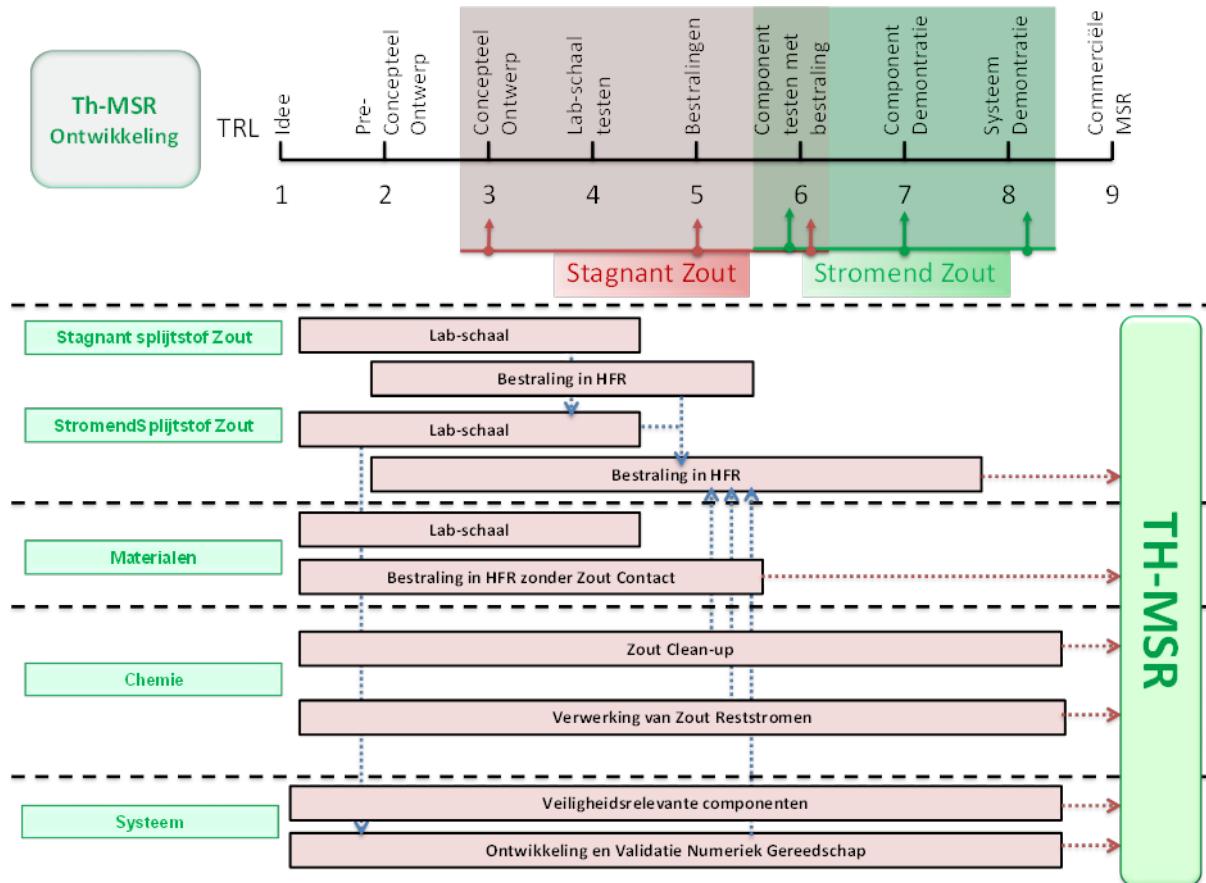
- Wetenschappelijke kennis en industriële ervaring met gekwalificeerde materialen, zouten en componenten die benodigd zijn om de bouw van een demonstratiereactor ter hand te kunnen nemen.
- Een conceptueel ontwerp van een prototype reactor met een concrete uitwerking van gevalideerde MSR-specifieke veiligheidssystemen.
- Een industrieel consortium om de Thorium-MSR commercieel te ontwikkelen tot een schone onuitputtelijke energiebron.

De eerste vijf jaar van het project zal in het teken staan van het ontwerp en bouw van LUMOS en van het voorbereidend onderzoek inclusief de SALIENT bestralingen. Daarnaast zal volop worden ingezet op het werven en opleiden van wetenschappers, ingenieurs en technici die het onderzoek naar materialen, chemie, en fysica zullen voortzetten en de experimentele onderzoekopstellingen zullen ontwikkelen die benodigd zijn voor het onderzoeks- en ontwikkelprogramma aan de universiteiten en in de HFR (LUMOS). De tweede termijn zal naast het lopende onderzoek, vooral ook in het teken staan van de bestralingsexperimenten in LUMOS. Deze termijn zal minimaal vijf jaar bedragen, maar zal indien nodig worden opgerekt zolang dit technisch haalbaar is. Een afsluitende termijn van enkele jaren is voorzien om de lopende onderzoeken en nieuwe urgente onderzoeksvragen die mogelijk uit de LUMOS bestralingen zijn voortgekomen uit te voeren en zorg te dragen voor een nette verwerking en afvoer van de bestraalde opstellingen en het radioactieve zout naar COVRA. Deze afsluitende periode is echter niet benodigd voor het leveren van de benodigde kennis en data, zodat de industriële ontwikkeling van de MSR al kan starten vanaf tien jaar na de start van het programma. De kosten zijn in indicatief en bedragen ca. 200 miljoen euro.

Fase	Start (jaar)	Eind (jaar)	Budget (M€)
Ontwerp en bouw van LUMOS en experimenten	1	6	20
Uitvoeren experimenten in LUMOS	3	11	15
Conditioneren van LUMOS en splijfstofzouten	11	12	5
Karakteriseren van splijfstofzouten	1	12	15
Testen van constructiematerialen	1	12	20
Corrosie en materiaalchemie	1	10	10
Ontwikkelen en testen van zuiveringsprocessen voor splijfstofzouten	1	12	25
Warmteoverdracht en vloeistofdynamica	1	12	20
Veiligheidsanalyses en vergunningsverlening	1	12	15
Componenten en reactorsystemen	1	12	20
Salient bestralingsexperimenten	1	7	15
Conditioneren van SALIENT en splijfstofzouten	7	8	3
Maatschappelijke en ethische aspecten	1	12	2
Projectorganisatie, PR en huisvesting	1	12	15
			200

## VII. Vooruitzicht

Onderstaand schema schetst de ontwikkelingen van dit project om de Thorium-MSR technologie te brengen naar het 'Technology Readiness Level (TRL)' dat benodigd is om een eerste demonstratiereactor te kunnen ontwerpen en bouwen en daarna een grote commerciële Thorium-MSR reactor.



Zoals eerder gesteld is dit project een unieke kans voor Nederland om de speciale faciliteit in de HFR in Petten te benutten om een enorme versnelling in de ontwikkeling van de Thorium-MSR technologie te realiseren, zodat deze technologie al in 2050 een bijdrage kan leveren aan onze energievoorziening. Hiertoe is het noodzakelijk dat al tijdens dit project (dus vòòr 2030) wordt gestart met het ontwerp van een prototype-reactor en er tevens zo snel mogelijk een industrieel consortium wordt gevormd dat de bouw van een grote commerciële vermogensproductiereactor ter hand kan nemen. Dit project levert hiervoor de cruciale kennis en ervaring. De clustering van internationaal talent in één instituut aan TU Delft en de nabijheid van de HFR met een unieke bestralingsfaciliteit biedt Nederland tijdelijk de kans om op wetenschappelijk en technologisch gebied internationaal de leiding te nemen en de Nederlandse industrie een technologische en commerciële voorsprong te geven in de ontwikkeling van de veelbelovende Thorium-MSR centrales.