

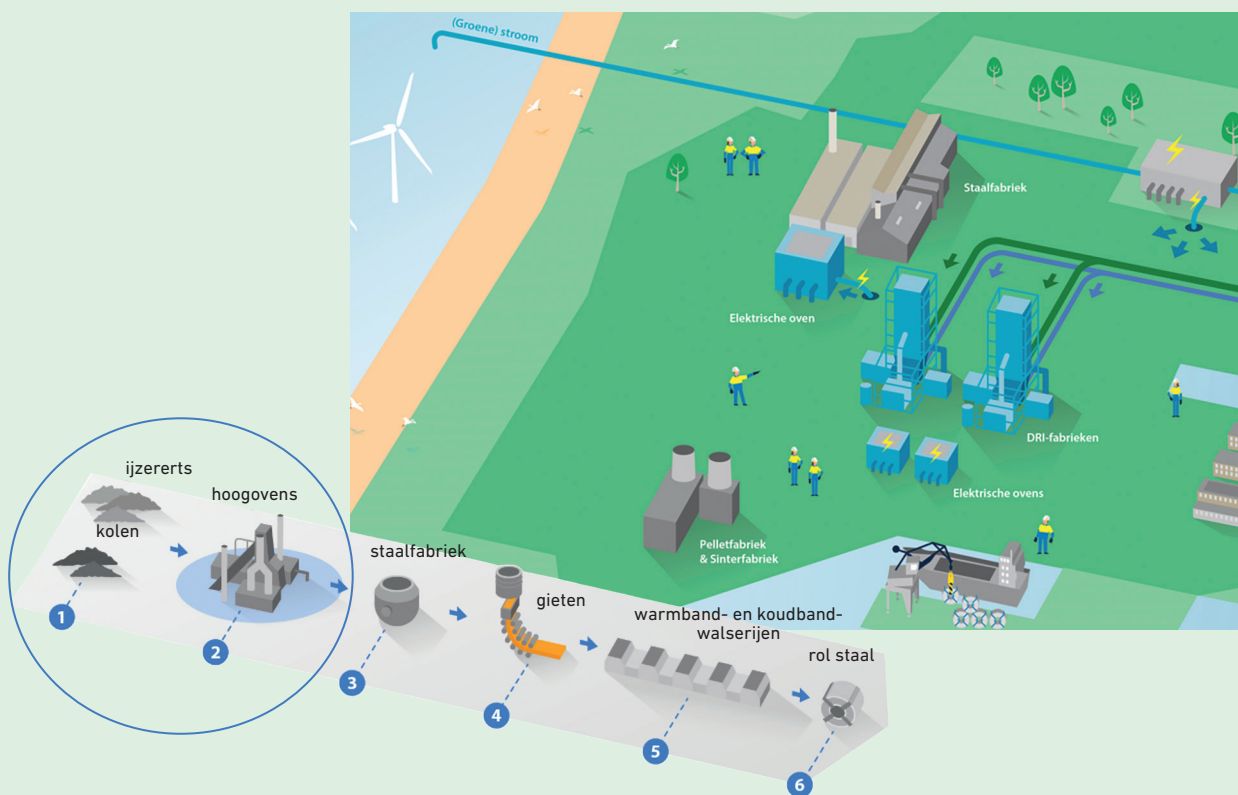
# Vloeistof-mechanische uitdagingen voor de overgang naar op waterstof gebaseerde staalproductie

Staal kent veel toepassingen, bijvoorbeeld in auto's, batterijen, zonnepanelen, windmolens, voedselverpakking (conservenblikken), constructiebuizen en huishoudelijke apparaten. Staal is ook een product dat goed gerecycled kan worden en in dat opzicht past in een circulaire economie. Bij de productie van staal komt echter veel CO<sub>2</sub> vrij dat bijdraagt aan het broeikas-effect. Om de CO<sub>2</sub>-uitstoot stapsgewijs terug te brengen naar nul rond het jaar 2045, is een uitdagende decarboniseringsroute uitgestippeld voor de staalproductie in IJmuiden.

**H**et huidige staalmaakproces bestaat uit een serie van productiestappen waarmee de grondstoffen kolen en ijzererts (gesteente dat ijzerverbindingen bevat) worden omgezet in rollen staal, wat een legering is van ijzer en koolstof, zie figuur 1. De meeste CO<sub>2</sub>-uitstoot vindt plaats bij het maken van vloeibaar ruwijzer (ijzer dat een koolstofpercentage bevat van rond de 4-5%) in de hoogoven. Dit deel zal vervangen worden door twee aparte stappen van directe reductie (van ijzererts naar vast ijzer) en smelten. Dit is schematisch aangegeven in figuur 1 in de groene figuur rechtsboven. De directe reductie zal uiteindelijk met waterstof plaatsvinden en de smeltovens zullen draaien op groene elektriciteit. Samen met een aantal andere maatregelen ontstaat daardoor een proces zonder netto CO<sub>2</sub>-uitstoot. De voorbewerking van koolstof en ijzererts tot cokes

en sinter zal komen te vervallen, wat eveneens een grote milieuwinst oplevert. Cokes en sinter worden gebruikt in het traditionele proces voor ruwijzerproductie in de hoogoven. Cokes wordt gemaakt uit kolen door het te verhitten tot rond de 1000 °C. Alle vluchtige componenten ontwijken en een poreus, voornamelijk koolstofhoudend materiaal blijft over. Het is ideaal voor in de hoogoven omdat het de koolstof levert voor het reductieproces, energiebron is in het hoogovenproces, poreus is om procesgassen door de hoogoven te laten stromen en genoeg dragend vermogen heeft om de verticale last in de hoogoven te dragen. Sinter bevat een combinatie van fijne ertsen, restmiddelen uit het staalmaakproces en smeltmiddelen. Deze worden samen gebakken en vormen een poreuze koek die vermalen wordt om op juiste grootte te brengen. Sinter en pellets vormen samen de

ijzerhoudende substanties die aan de hoogoven worden toegevoegd. Voor de vervanging van het hoogovenproces worden twee deels verschillende routes ontwikkeld. In de eerste route wordt het direct gereduceerde ijzer (DRI) samen met een grote hoeveelheid schroot gesmolten in een vlamhoogoven. Dit levert vloeibaar staal dat daarna wordt geraffineerd en gelegeerd om tot de juiste samenstelling te komen. In de tweede route, waarop de focus ligt in dit artikel, zal het DRI in een volledig afgesloten elektrische oven worden omgezet in ruwijzer. Daarna volgt de standaardroute om van ruwijzer staal te maken. Het huidige proces bestaat uit het omzetten van ijzeroxide (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) in ijzer (Fe) met behulp van een tegenstroomreactor, de hoogoven. In deze reactor, zie figuur 2a, worden ijzererts en cokes onder toevoeging van hete lucht in een aantal stappen omgezet in vloeibaar ruwijzer



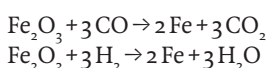
Figuur 1. Schematische weergave van het staalproductieproces. In het blauw omcirkelde deel staat het huidige proces afgebeeld. De groene figuur omvat het toekomstige vloeibaar-ruw-ijzermaakproces bestaande uit twee DRI-fabrieken, twee smeltovens en een vlamboogoven.

volgens de samengestelde reactie  $2 \text{Fe}_2\text{O}_3 + 3 \text{C} \rightarrow 4 \text{Fe} + 3 \text{CO}_2$ . In een eerdere productiestap worden van ijzererts pellets en sinter gemaakt en worden kolen omgezet in cokes, die aan de hoogoven worden gevoerd. De grote vraag is of en hoe de koolstof in het ijzermaakproces vervangen kan worden door waterstof.

In het volgende deel zal wat dieper ingegaan worden op het DRI-proces en de speciale elektrische oven waarin de gereduceerde pellets uit het DRI-proces worden gesmolten. Binnen de onderzoeksafdeling van Tata Steel Nederland (TSN) wordt gebruikgemaakt van zowel *computational fluid dynamics* (CFD) als experimentele opstellingen om deze nieuwe productieprocessen beter te begrijpen en te voorspellen. De verworven inzichten zijn van belang voor het optimaliseren van ijzerproductie en om tot een goed ontwerp te komen van de nieuwe installaties.

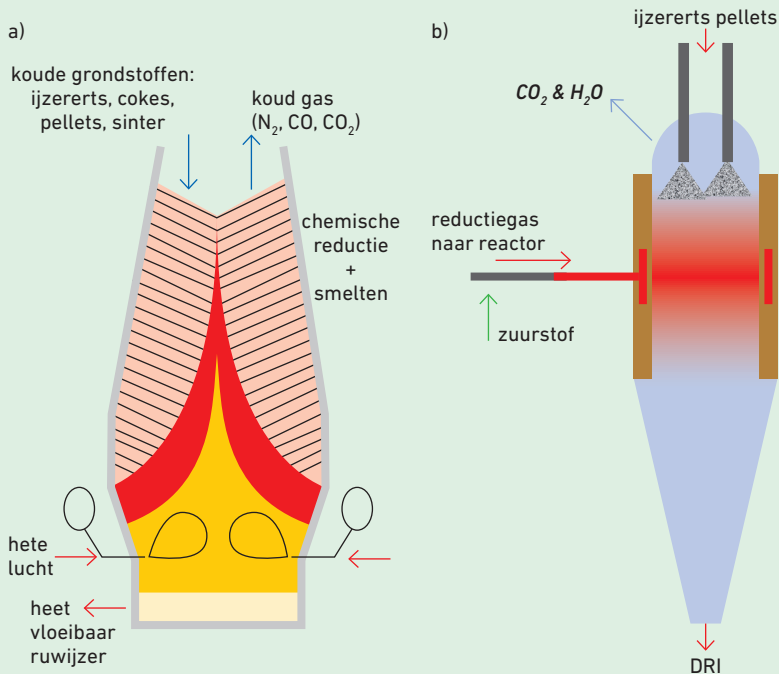
### Het DRI-proces onder de loop met behulp van CFD

De DRI-fabriek is net als de hoogoven een tegenstroomreactor. Bovendien worden pellets, vorgebakken ijzererts in de vorm van knikkers met een diameter van ongeveer twaalf millimeter, ingeladen die door de schacht naar beneden zakken, zie figuur 2b. De pellets bestaan voornamelijk uit ijzeroxide ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) en worden omgezet in ijzer met behulp van een reductiegas. Dit gas wordt extra verhit met zuurstof en het gevormde reductiegas wordt halverwege de reactor ingeblazen. De gassen verlaten de reactor via de bovenkant. In tegenstelling tot het hoogovenproces vinden er geen smeltprocessen plaats in de DRI-fabriek, de pellets blijven dus in vaste vorm. Om  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  te reduceren tot ijzer kan zowel  $\text{CO}$  als  $\text{H}_2$  gebruikt worden:



Het DRI-proces wordt al op grote schaal in de staalindustrie gebruikt, waarbij het reductiegas deels uit  $\text{CO}$  bestaat. Als gevolg hiervan wordt dus  $\text{CO}_2$  uitgestoten. De DRI-fabriek in IJmuiden zal eerst op aardgas ( $\text{CH}_4$ ) draaien dat in de reactor wordt omgezet in  $\text{CO}$  en  $\text{H}_2$ . Daardoor wordt de  $\text{CO}_2$ -uitstoot al aanzienlijk verminderd. Stapsgewijs zal steeds meer  $\text{H}_2$  gebruikt worden. Een proces dat volledig op  $\text{H}_2$  draait bestaat nog niet op grote schaal, maar TSN heeft de ambitie dit te realiseren. Daar wordt nu volop onderzoek naar gedaan om een beter beeld te krijgen van de gewenste procescondities.

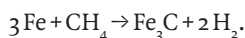
Een onderdeel van het onderzoek naar het DRI-proces bestaat uit het maken van CFD-modellen die helpen om beter inzicht te krijgen in de stromingsdynamiek, de temperatuur en samenstelling van de gassen en pellets in de reactor. CFD maakt gebruik van wiskundige modellen en numerieke



Figuur 2. a) Schematische weergave hoogovenproces. De zwarte lijnen representeren cokes-lagen, afgewisseld met lagen van ijzererts pellets en -sinter (roze). Het rode deel geeft grofweg aan waar het ijzer smelt (*cohesive zone*). Het donkergele gebied bestaat uit cokesdeeltjes die voor het grootste gedeelte worden geconsumeerd door het verbrandingsproces in het gebied waar de hete lucht de hoogoven instroomt. Het vloeibaar ruwijzer (lichtgeel) wordt beneden in de hoogoven verzameld en periodiek getapt. b) Schematische weergave DRI-proces.

berekeningen om de stroming, druk, temperatuur en het resultaat van chemische reacties van vloeistoffen en gassen te voorspellen. De stroming kan gevisualiseerd worden, en de samenstelling, druk- en temperatuurverdeling kunnen geanalyseerd worden. Voor het DRI-proces is het belangrijk het temperatuurprofiel goed in kaart te brengen, zeker wanneer meer  $H_2$  ingezet gaat worden. De reductie met CO is namelijk een exotherm proces, terwijl de reductie met  $H_2$  endotherm is. Dit betekent dat er warmte aan het proces toegevoegd moet worden. Hoeveel en in welke vorm is een van de vragen waar CFD-modellen meer inzicht in kunnen geven. Zo kan bijvoorbeeld gekeken worden naar het effect van het verder verhitten van het reductiegas, maar ook het effect van externe verwarming kan worden geëvalueerd. Daarnaast is het interessant om te analyseren hoe hoog het koolstofgehalte is in de gereduceerde pellets.

Voor het verder opwerken van staal uit ruwijzer dient het ruwijzer een bepaald koolstofpercentage te bevatten. Bij de productie van DRI met aardgas eindigt een deel van de koolstof in de pellets. Wanneer de overstap gemaakt wordt naar een DRI-proces op basis van  $H_2$ , dient koolstof via een andere weg toegevoegd te worden. Dit kan bijvoorbeeld door aardgas in de schacht toe te voegen, waarbij de volgende carburisatiereactie optreedt:



Met CFD kan lokaal in de reactor gekeken worden waar de carburisatiereactie plaatsvindt en welke koolstofpercentages behaald kunnen worden.

### Hoe een watermodel bijdraagt aan een succesvol ontwerp van een elektrische oven

De vaste voorgereduceerde pellets zullen in een tweede stap met een

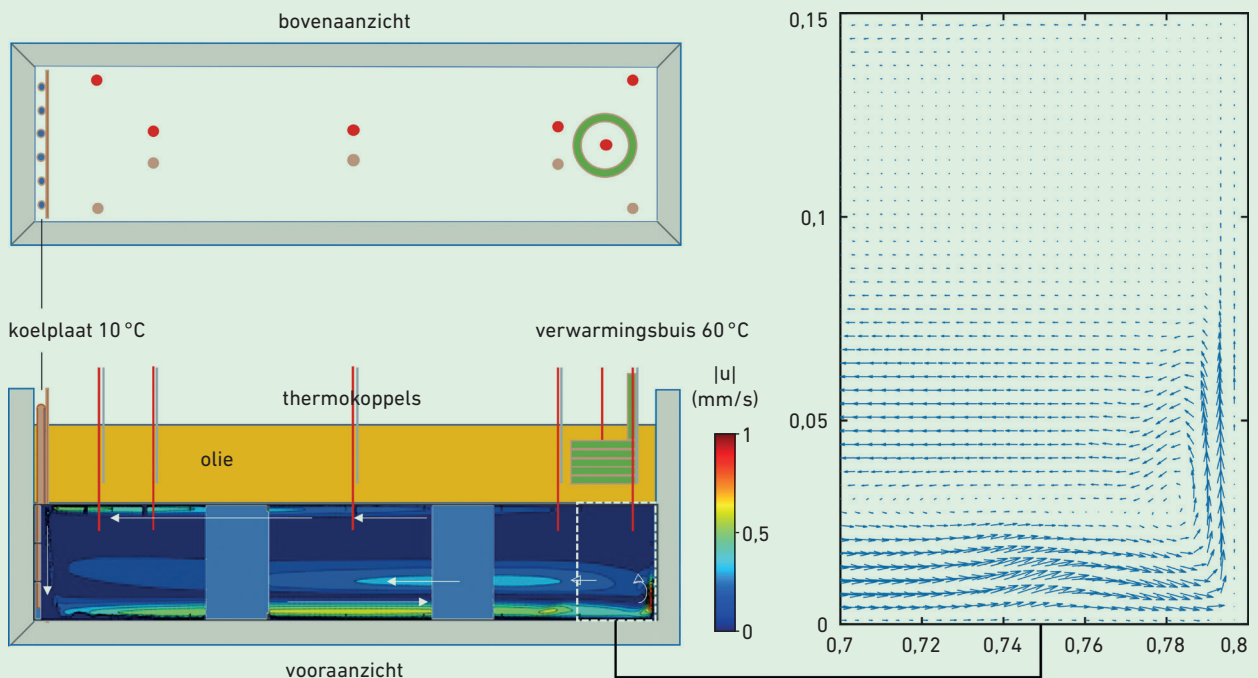
elektrische oven (in vaktaal *reducing electric furnace* (REF)) gesmolten worden. Ook dat proces wordt met simulatiemodellen bestudeerd. En aan de basis van die rekenmodellen staan onder andere gedetailleerde metingen in watermodellen waarin het proces vereenvoudigd wordt nagebootst.

In de REF-oven bevinden zich twee vloeibare fasen. Het gesmolten ruwijzer is de zwaarste fase en verzamelt zich op de bodem. Een lichtere fase, de slak, bevat voornamelijk oxides afkomstig uit het ganggesteente dat zich in het ijzererts bevindt. De pellets worden in de REF-oven gestort waarbij elektrodes gebruikt worden om warmte te produceren. Tussen de elektrodes loopt een elektrische stroom door de slak-laag die daardoor op zal warmen. De pellets smelten en het ruwijzer en de slak worden gescheiden door hun verschil in soortelijk gewicht.

Dit soort ovens wordt echter nog nergens in de wereld toegepast voor het opsmelten van ijzerhoudende DRI-pellets en daarom worden, in een versneld ontwerptraject, de verwachte processen in deze ovens bestudeerd. Dit is essentieel om tot een goed ontwerp te komen zodat uiteindelijk een werkend en rendabel apparaat wordt gebouwd dat ook goed te regelen is.

De processen in de REF vormen wederom een ingewikkeld samenspel van verwarming, stroming en chemische reacties: de opwarming van de vloeistoffen door een in de slak ondergedompelde elektrode, de resulterende stroming in het ruwijzer en de slak, en de reacties tussen diverse elementen in de oven die moeten leiden tot de juiste product-samenstelling en temperatuur. Een belangrijke randvoorwaarde is dat dit proces langdurig – jarenlang – kan plaatsvinden zonder dat de oven het begeeft.

Dit traject brengt de nodige uitdagingen met zich mee. Men kan bijvoorbeeld niet putten uit procesgegevens, laat staan meetdata van een werkend apparaat. Stap voor stap worden daarom numerieke modellen opgebouwd



Figuur 3. Schematische weergave van het vereenvoudigde model van de REF-oven. In een doorzichtige bak wordt een laag olie op een laag water aangebracht. Aan de linkerkant van de bak is een vlakke koelplaat geplaatst om warmte uit de bak te onttrekken zoals dat in werkelijkheid door wanden van vuurvast materiaal gebeurt. In de olielaag is een gewikkelde koperen buis als verwarmingselement aangebracht. Dit element simuleert de warmteontwikkeling nabij de elektrode. Temperaturen worden op diverse posities en dieptes gemeten met thermokoppels. In de figuur is een typische weergave van een gemeten snelheidsveld te zien. Hieruit valt af te leiden hoezeer stratificatie in het water een rol speelt in de (limitering) van de warmteoverdracht van de hete olie naar het koude water. De koude vloeistofstroom langs de bodem van de bak botst tegen een iets warmere laag met een daardoor lagere dichtheid en maakt een scherpe bocht. Daarmee wordt de warmteoverdracht van de olie naar het water niet door de temperatuurgedreven stroming bevorderd.

die al deze processen in samenhang beschrijven.

Daarbij wordt goed gekeken naar bruikbare informatie van vergelijkbare processen in de beschikbare literatuur. Verder worden delen van het proces in het laboratorium bestudeerd en zijn er plannen voor ovens op een pilotschaal. Maar vanuit kosten- en flexibiliteitsoverwegingen worden ook meer hanteerbare fysische modellen gebruikt.

Het loont om op kleine schaal in een vergelijkbare geometrie naar het samenspel tussen een lokaal verwarmde laag olie op water te kijken. Vanwege een aantal belangrijke overeenkomsten in materiaaleigenschappen (viscositeit en warmtegeleiding) geeft dat proces goed inzicht in wat er straks op grote schaal plaats zal vinden. Maar het biedt meer: met geavanceerde meettechnieken kan minutieus in water en olie relatief

eenvoudig vastgelegd worden hoe warmte en stroming elkaar beïnvloeden. Hierdoor kunnen gegevens over het verloop van temperatuurverdelingen en snelheidsprofielen worden vastgelegd. Die meetgegevens geven daarmee direct de mogelijkheid om de gebruikte numerieke methoden tegen het licht van de praktijk te houden (zie figuur 3). Zo wordt een stevig fundament gebouwd voor de modellen waarmee later definitieve ontwerpberekeningen kunnen worden gedaan.

Experimenten in vereenvoudigde fysische modellen hebben in de staalindustrie altijd een belangrijke rol gespeeld vanwege de ontoegankelijkheid van de echte productieprocessen. Ook nu wordt die aanpak in de decarbonisatieprojecten toegepast. Hij speelt een cruciale rol bij het valideren en verbeteren van de numerieke modellen, omdat hij snel nauwkeu-

rige feedback geeft over hoe goed een numeriek model de werkelijkheid weergeeft en waar eventuele tekortkomingen liggen.

**Sjaak van Oord** studeerde aan de TU Delft en werkt als experimenteel fysisch bij Tata Steel R&D (IJmuiden). Hij richt zich op diverse processen waar warmte- en stromingsleer een rol spelen.

**Isa van der Vlugt** studeerde chemical engineering aan de TU Delft. Sinds 2023 werkt zij bij Tata Steel R&D (IJmuiden) waar zij zich vooral bezighoudt met het maken van CFD-modellen voor het directe reductieproces.

**Daniel van Odyck** studeerde natuurkunde aan de Universiteit van Amsterdam. Sinds 2015 werkt hij als onderzoeker bij Tata Steel R&D (IJmuiden) op het gebied van Computational Fluid Dynamics. [Daniel.van-Odyck@tatasteel.eu](mailto:Daniel.van-Odyck@tatasteel.eu)