

TNO report**TNO 2021 R10346****TKI Natural Seals Research and Test Well –
Openbaar eindrapport**

Princetonlaan 6
3584 CB Utrecht
P.O. Box 80015
3508 TA Utrecht
The Netherlands

www.tno.nl

T +31 88 866 42 56
F +31 88 866 44 75

Date	23 feb. 21
Author(s)	K. van der Valk, K. Castelein, H. Fischer A.N. Corina, B. Orlic, J. Wollenweber, E. Calignano
Copy no	
No. of copies	
Number of pages	11 (incl. appendices)
Number of appendices	
Sponsor	TKI Nieuw Gas Topsector Energy, EBN, Shell, Total, Nouryon, ONEDyas, Neptune
Project name	Natural Seals Research and Test Well
Project number	TKI2019-02-GE TNO 060.35502Project period01/01/2019 – 01/04/2021Project coordinatorTNOProject partnersEBN, Shell, Total, Nouryon, ONEDyas, Neptune
Project period	01/01/2019 – 01/04/2021
Project coordinator	TNO
Project partners	EBN, Shell, Total, Nouryon, ONEDyas, Neptune

All rights reserved.

No part of this publication may be reproduced and/or published by print, photoprint, microfilm or any other means without the previous written consent of TNO.

In case this report was drafted on instructions, the rights and obligations of contracting parties are subject to either the General Terms and Conditions for commissions to TNO, or the relevant agreement concluded between the contracting parties. Submitting the report for inspection to parties who have a direct interest is permitted.

© 2021 TNO

Contents

1	Project informatie	3
2	Openbaar eindrapport	4
2.1	Introductie	4
2.2	Onderzoek scope	5
2.3	Methode	6
2.4	COVID-19	7
2.5	Resultaten en conclusies	7
2.6	Follow-up, spin off binnen en buiten de sector	8
3	Implementation of the project	9
3.1	Deviations from initial project plan	9
3.2	Deviation from initial project budget	9
3.3	Technical or management issues	9
3.4	Knowledge dissemination	9
3.5	Explanation PR project and further PR options	10

1 Project informatie

Subsidiereferentie: TKI2019-02-GE

Topsector Energy, TKI Nieuw Gas:

Program line Geo Energy – Research theme: Decommissioning and Abandonment

Projectduur:

1 januari 2020 – 1 april 2021

Project partners:

TNO (coordinator), EBN, Total, Shell, ONE-Dyas, Neptune, Nouryon

2 Openbaar eindrapport

2.1 Introductie

De ontmantelingskosten van bestaande en toekomstige putten worden geschat op enkele tientallen miljarden euro's wereldwijd en 3-4 miljard euro voor Nederland alleen al¹. Cement is momenteel het materiaal bij uitstek voor het afdichten en verlaten (plug and abandon – P&A) van olie- en gasputten (O&G putten). Cement is echter onderhevig aan chemische reacties in aanwezigheid van zure formatievloeistoffen (bijvoorbeeld op basis van CO₂ en H₂S) en kan (te) broos zijn om mechanische en thermische belastingen te weerstaan zonder mechanische schade². Daarom kan het afdichtend vermogen en de integriteit van putbarrière-elementen op basis van cement (pluggen en annulaire afdichtingen) worden belemmerd, vooral op de lange termijn^{2,3,4}. Lekkende putten vormen een veiligheids- en milieurisico en vereisen ingrijpen tegen hoge kosten, daarnaast kunnen ze ook leiden tot een negatieve beeldvorming bij het publiek.

Duurzame en meer economische P&A-oplossingen voor annulaire afdichting en pluggen voor putten zouden een gunstige invloed hebben op de haalbaarheid en het economische concurrentievermogen van veelbelovende duurzame geo-energieopties, zoals geothermische energie of gasopslag. Het Masterplan Aardwarmte⁵ schetst duidelijk de noodzaak van substantiële kostenreducties en tegelijkertijd verbetering van de putveiligheid.

Recent onderzoek gericht op veilige en duurzame P&A-opties identificeerde bentoniet als een veelbelovende afdichting voor boorputten in diepe ondergrondse geo-energietoepassingen^{6,7}. De algemene voordelen van het gebruik van natuurlijke materialen zoals bentoniet of steenzout ten opzichte van cement zijn hun afdichtingscapaciteit op lange termijn en chemische stabiliteit onder boorgatcondities^{8,9,10}.

¹ Nexstep Re-use and decommissioning rapport, 2019 ([link](#))

² Bachu S and Bennion DB. Experimental assessment of brine and/or CO₂ leakage through well cement at reservoir conditions. *International Journal of Greenhouse Gas Control* 2009; 3, 494-501.

³ King G.E. and D.E. King, *Environmental risk arising from well-construction failure: Difference between barrier and well failure, and estimates of failure frequency across common well types, locations, and well age*. SPE 166142, 2013.

⁴ Davies R.J., et al., *Oil and gas wells and their integrity: Implications for shale and unconventional resource exploitation*. *Marine and Petroleum Geology*, 2014. **56**: p. 239-254.

⁵ EBN, DAGO, Platform Geothermie, (2018): Masterplan Aardwarmte Nederland

⁶ C.J.K. Castelein, P. Hopmans, H. R. Fischer, J. Wollenweber (2019). Results of large-scale bentonite well sealing experiments. TKI Using Bentonites for zonal isolation and well abandonment, deliverable report D1.2 TNO 2019 R10813

⁷ B. F. Towler, M. Firouzi, H.G. Holl, R. Gandhi, A. Thomas (2016). "Field trials of plugging oil and gas wells with hydrated bentonite," presented at the SPE Asia Pacific Oil & Gas Conference and Exhibition, SPE-182199

⁸ H. Fischer, B. Orlic, K. Geel, P. Pipilikaki, J. Wollenweber (2016) The phenomena of the ductile properties of shales and salts. TKI Plugging wells by enhanced formation ductility – Deliverable report D3.1 TNO 2016 R11749

⁹ H. Fischer, B. Orlic, S. Osinga, P. Hopmans, J. Wollenweber, K. Geel (2016). Options to initiate and enhance ductile properties of shale for well bore sealing. TKI Plugging wells by enhanced formation ductility, deliverable report D5.1, TNO 2016 R10970

¹⁰ Towler, B. F., Firouzi, M., Mortezaipoor, A., Hywel-Evans, P.D. (2015): Plugging CSG Wells with Bentonite, Review and Preliminary lab Results, SPE 176987 (2015)

De toepassing van bentoniet vereist over het algemeen minder dure apparatuur voor het plaatsen van het materiaal en lagere kosten voor materiaal en monitoring¹¹. Er bestaat echter geen speciale plugmethode voor diepe O&G putten die vroegtijdig zwellen van het bentoniet voorkomt voordat de afsluitdiepte wordt bereikt, wat als gevolg heeft dat de plug onvoldoende sterkte heeft. Verificatie van de afdichtingsprestaties bij hoge drukken en hoge temperatuur, die relevant zijn voor de P&A van koolwaterstofputten (in NL), is vereist om vervolgens een veldproef mogelijk te maken. Er zijn laboratoriumtests uitgevoerd^{6,10} maar opschaling van laboratorium-naar veldschaal, wat testen onder in een boorgat vereist, is essentieel om de afdichtingsprestaties onder werkelijke omstandigheden en afmetingen onder in het boorgat te onderzoeken. Daarnaast zijn innovaties met betrekking tot plaatsing en verbeterde afdichtingsprestaties nodig.

Het huidige TKI Geo-energie Onderzoeksthema *Decommissioning & Abandonment* heeft tot doel de kosten van P&A-operaties te verlagen en tegelijkertijd de afdichtingsprestaties van putbarrières op lange termijn te garanderen zonder de putveiligheid in gevaar te brengen. Dit project vormt een elementair onderdeel van deze programmalijn en zal een testlocatie in een boorgat bieden om kosteneffectieve en betrouwbare P&A-technologieën te ontwikkelen op basis van natuurlijke, ductiele materialen.

2.2 Onderzoek scope

Eerdere studies binnen dit programma hebben gekeken naar de haalbaarheid van het afdichten van putten met bentoniet⁸ en kleinschalige¹² en grootschalige laboratoriumtests⁶ uitgevoerd. Dit project beoogt kwalificatietesten van bentonietpluggen onder relevante P&A-omstandigheden onder in het boorgat uit te voeren. Dit zal gebeuren op de nieuwe locatie. Rijswijk Centrum voor Duurzame Geo-energie (RCSG) (het voormalige Shell Well Technology Research Center). Dit centrum is uitgerust met grootschalige testapparatuur (5-1/2 "tot 13-3/8" casings, 6 m lengte) en een onderzoekspuit inclusief een boorinstallatie. De testlocatie in Rijswijk biedt een unieke kans om nieuwe boorputafdichtingsmaterialen voor P&A, plaatsingsconcepten en monitoringtechnologieën te testen en te demonstreren.

De belangrijkste onderzoeksdoelstellingen van dit project zijn als volgt gedefinieerd:

1. Het onderzoeken van de afdichtingsprestaties en het kwalificeren van natuurlijke afdichtingstechnieken als betrouwbare en kosteneffectieve P&A-opties voor putten die worden gebruikt in diepe ondergrondse geo-energietoepassingen (O&G, geothermie, CCUS, H₂- of energieopslag etc.) in de onderzoekspuit in Rijswijk.
2. Het ontwikkelen en testen van verschillende methoden voor optimale plaatsingsprocedures van bentoniet in de put, die uitgevoerd is met casings, met als doel een geoptimaliseerde plaatsingsprocedure voor bentonietpluggen te ontwikkelen.
3. Een monitoringplan ontwikkelen om het afdichtingsproces in bentonietpluggen in het boorgat continu te monitoren.

¹¹ P. Hopmans and J. Wollenweber (2018). Business case for using bentonite for O&G wellbore sealing. TKI Using bentonites for zonal isolation and well abandonment, deliverable report D3.1, TNO 2018 R11235

¹² Hopmans, H. Fischer, J. Wollenweber (2019). Results of small-scale bentonite well sealing experiments. TKI Using Bentonites for zonal isolation and well abandonment, deliverable report D1.1, TNO 2019 R10162

4. Het uitvoeren van afdichtings- en mechanische integriteitstesten op bentonietpluggen in overeenstemming met standaard verificatiemethoden onder in het boorgat (bijv. druktesten, instroomtesten) en in overeenstemming met de Nederlandse Mijnbouwwet.
5. Faalwijzen van bentoniet identificeren door de afdichting onder in het boorgat te monitoren, integriteitstests op de pluggen uit te voeren en bentonietmateriaal van de geteste pluggen te analyseren.
6. Het onderzoeken van de effecten van verschillende samenstellingen, mengverhoudingen en plaatsingsmethoden van bentoniet pluggen op de kwaliteit, afdichtingscapaciteit en mechanische sterkte deze pluggen en het verifiëren van de prestatie van de plug onder in het boorgat.
7. Voorspellende numerieke modellen ontwikkelen, die worden gekalibreerd met veld- en laboratoriumresultaten, voor het ontwerpen van bentonietpluggen.
8. Toewerken naar een ondergrondse natuurlijke afdichting veldtest in een bestaande put om de laatste kwalificatiestap (veldproef, TRL 6) in een vervolgproject te kunnen aanpakken.

2.3 Methode

Dit project is opgedeeld in drie fasen om ervoor te zorgen dat de meeste waarde wordt gecreëerd.

In de eerste fase worden speciale grootschalige experimenten uitgevoerd in het RCSG-laboratorium om de kritische aspecten van deze tests voor te bereiden en de risico's van de rig-tests te verminderen. De specifieke onderwerpen die in deze experimenten aan bod komen zijn:

- Het bepalen en optimaliseren van de plaatsingsverhouding tussen bentoniet en water;
- Het bepalen van de plaatsingsmethode en het generen van referentiedruktestwaarden voor de afmetingen van de verbuizingen die in de boortest worden toegepast;
- Het uitvoeren van lektesten met vloeistof (water) en gas (stikstof);
- Het testen van een verificatiemethode voor bentonietpluggen in het boorgat;
- Het uitbreken van casings met bentonietpluggen erin en het analyseren van gehydrateerde bentonietmonsters in het laboratorium;
- Het beoordelen van de invloed van het zoutgehalte van pekkel op de prestaties van de plug.

Op basis van de resultaten van de grootschalige tests wordt fase 2 gestart waarin rig tests worden ontworpen en uitgevoerd. Het doel van deze experimenten is om het effect van opschaling naar echte pluglengtes van 25 en 50 meter te beoordelen en de operationele procedures voor bentonietplaatsing te testen.

Ten slotte worden in fase drie de resultaten vertaald naar een analytisch en FEM-model om een meer gedetailleerde analyse van de resultaten mogelijk te maken en om experimentele bevindingen op te schalen naar echte putten en om de prestaties van pluggen te voorspellen onder verschillende omstandigheden die niet experimenteel zijn getest.

Alle experimenten worden uitgevoerd met Eijkelkamp QSE bentonietpellets en in zoet water tenzij anders gespecificeerd.

2.4 COVID-19

Tijdens de uitvoering werd dit project getroffen door de COVID-19 pandemie. Het resulteerde in vertragingen bij de rig-test, een meer gecompliceerde logistiek en uitvoering van de experimenten en het beperken van het aantal mensen dat aanwezig kon zijn in het RCSG-lab. Daarnaast moest de meeste communicatie online worden geregeld, zowel intern als in het consortium. Ondanks de complicaties slaagde het team erin de impact te beperken door een flexibele planning en een COVID-19-procedure voor het RCSG-lab te implementeren.

2.5 Resultaten en conclusies

In de eerste fase is, als vervolg op eerdere bentonietafdichtingsproeven binnen dit programma, een reeks grootschalige labexperimenten opgezet. De belangrijkste focus van deze tests is om de risico's van de rig-tests te verminderen en om de impact van bepaalde parameters, zoals zoutgehalte op de bentonietafdichtingsprestaties, verder te onderzoeken. De belangrijkste bevindingen uit deze experimenten zijn dat 1) het mogelijk is om op pragmatische manier pluggen te maken, die voldoen aan de gewenste volumeverhouding van de componenten en dichtheidseisen, die kan worden toegepast voor de rig-test en waarschijnlijk in het veld; 2) de aanvankelijke verplaatsingsdruk en de bijbehorende initiële afschuifbindingssterkte worden verhoogd wanneer de pluggen onder druk of voor langere tijd kunnen uitharden; 3) een initiële afschuifsterkte van 10.000 N/m² is realistisch en 4) het creëren van een bentonietplug in (zout) kunstmatig zeewater heeft een negatieve invloed op de plugsterkte in vergelijking met zoet water. Deze resultaten zijn gebruikt om de rig-test te finetunen.

Het belangrijkste doel van dit project was om de capaciteit van bentonietpluggen op volledige schaal te testen, d.w.z. pluglengtes van ~25 en ~50 m in realistische afmetingen van verbuizingen, en om de afdichtingscapaciteit op realistische schaal te onderzoeken. Tijdens elke test hebben we het afdichtingsproces continu gemonitord en daarna de afdichtingsprestaties getest met standaard verificatiemethoden onder in het boorgat (bijv. druktesten, instroomtesten). Er zijn monsters genomen van de bentonietplug bij het terughalen van de plug naar het oppervlak om de homogeniteit, vloeit en mechanische eigenschappen van de gevormde plug te analyseren om de afdichtingsprestaties te kunnen valideren. De belangrijkste bevinding is dat de pluggen van 25 en 50 meter zich gedroegen zoals verwacht en vergelijkbare afschuifbindingscapaciteiten hadden in vergelijking met de eerdere kleinschalige en grootschalige experimenten in dit programma. Zowel de experimenten met vloeistof (zoet water) als gas (stikstof) bevestigden een solide plug zonder enig teken van lekkage of voortijdige verplaatsing.

Uit de analytische beoordeling werd geconcludeerd dat, op basis van de experimentele resultaten, het afschuifbindingsvermogen een geschikte methode is voor een eerste analyse van de bentonietplugcapaciteit. Daarnaast maakt dit een vergelijking van de plugcapaciteit tussen verschillende maten verbuizing, gebaseerd op pluglengte en verplaatsingsdruk, mogelijk voor dit type bentoniet en in zoet water. Uit de gedetailleerde eindige-elementenmodellering kan worden geconcludeerd dat de afschuifsterkte van de hechting afhankelijk is van (i) de effectieve normale

spanning die inwerkt op het afschuifoppervlak en (ii) de weerstand tegen afschuiving. Geconcludeerd kan worden dat het eindige-elementenmodel, gecreëerd in dit project, de experimentele resultaten nauwkeurig kan nabootsen. Op basis van deze bevinding kan worden besloten om het model verder uit te breiden om het te kunnen gebruiken voor gedetailleerd ontwerp van bentonietpluggen en voorspelling van bentonietplugsterkte op basis van de veldomstandigheden.

2.6 Follow-up, spin off binnen en buiten de sector

Gebaseerd op de resultaten van dit project en aanverwant werk in de programmalijn over het natuurlijk afdichten van boorputten, zouden de volgende spin-offs kunnen worden gestart om de resterende uitdagingen aan te pakken. Beide vervolgpiloten zijn gericht op demonstratie van de afdichting technologie bij grootschalige en volledige tests, inclusief het gebruik van een echte, afgesloten gas put.

- Toegekend project: TKI 2020 Natural Sealing large-scale implementation (TKI2020-05-GE Natural Seals)
- Onderzoeksvoorstel: TKI 2021 Field Pilot P&A Using Bentonite (TKI GE2020-10)

De goede vooruitgang bij de ontwikkeling van deze alternatieve afdichtingstechnologie leidde tot een uitbreiding van het consortium van de TKI-programmalijn Hergebruik en Ontmanteling met het toetreden van Wintershall voor het TKI 2020 project.

Aangezien het project eerder gericht was op technologie- en patentontwikkeling, heeft het werk dat niet nog gepubliceerd in tijdschriften of conferenties. Op dit moment wordt gewerkt aan een paper voor de ARMA conferentie op 17 en 18 juni 2021 dat publiek beschikbaar wordt.

Voor meer informatie over dit project kunt u contact opnemen met het secretariaat van TNO's onderzoeksgroep Applied Geosciences via secretariaat-aarde@tno.nl.

Het project is uitgevoerd met subsidie van het Ministerie van Economische Zaken, Nationale regelingen EZ-subsidies, Topsector Energie uitgevoerd door Rijksdienst voor Ondernemend Nederland.

3 Implementation of the project

3.1 Deviations from initial project plan

The project had a duration of 15 months and was conducted from January 1st 2020 to April 1st 2021 together with the industry partners EBN, Shell, Total, Nouryon, Neptune and One Dyas.

Project start date was postponed from May 2019 to January 2020, mainly because of longer contract negotiation between consortium partners.

Lockdowns due to the Covid-19 pandemic in 2020 caused delay in lab and field work. As a consequence, the rig test, initially planned for Q2 2020 had to be postponed to Q3 2020. Moreover, Nouryon had to delay/cancel activities planned to be performed in the selected well because lockdown prevented them to hire a rig crew. As a consequence, the activities for Nouryon changed from well inspection to definition of a plan for the field test and in order to accommodate this change in project plan the project end date was postponed by three months, from 1 January 2021 to 1st April 2021.

All changes were made in agreement with the partners and TKI Nieuw Gas. The overall scope was not affected.

3.2 Deviation from initial project budget

Test activities at RCSG were performed more efficiently than planned, while more man hours became necessary for a detailed experimental analysis related to results more complex than expected. Therefore, 12k of the TNO budget where re-allocate from outillage to personnel, in agreement with TKi Nieuw Gas.

During the course of the project most of Nouryon's budget was moved from materials to third party costs, because of change in activities resulting in work being performed by an external well engineer.

3.3 Technical or management issues

During the course of the project the project leader (TNO) changed from J. Wollenweber to E. Calignano. The project handover did not result in any issue.

Due to lockdowns in response to the Covid-19 pandemic, most partners meetings had to be held online.

3.4 Knowledge dissemination

The project results will be published in the paper:

“Application of Bentonite as an Alternative Sealing Material for Deep Hydrocarbon and Geothermal Wells” by

Corina, A. N., Wollenweber, J., Castelein, K., van der Valk, K., Fischer, H., Heerens, G-J., Moghadam, A. ,

which will be submitted to the ARMA journal in February/March 2021.

The project, as part of the Decommissioning and Abandonment program, was presented to SodM, during a visit to the RCSG.

3.5 Explanation PR project and further PR options

No PR activity in addition to planned reporting and dissemination activities.