

# De dichtheid van

# gesteenten op het Zechstein in relatie tot zouttektoniek

*Zoute magma drong opwaarts  
vanwege dichtheidsverschil*

STEF HEEREMA  
INFO@MANUFACTURINGENGINEERS.NL

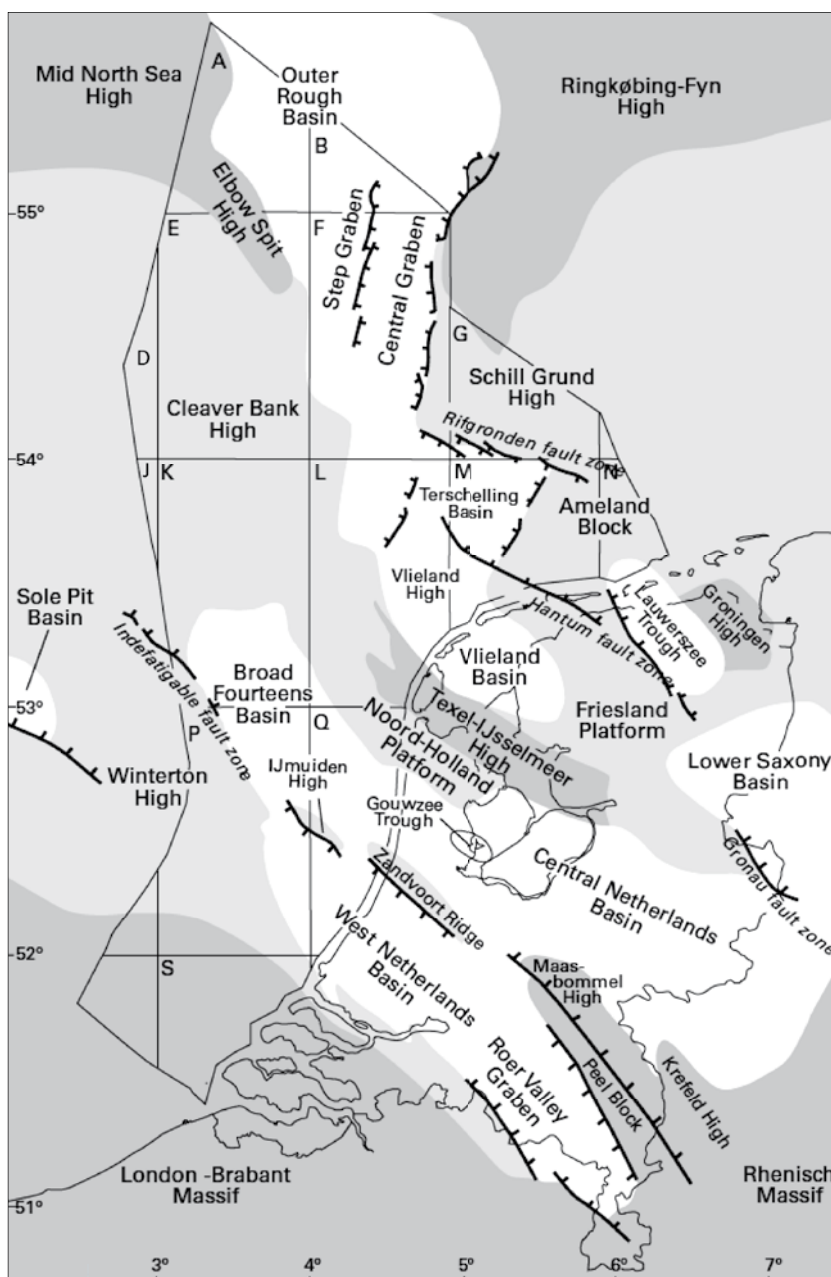
Zoutpijlers kunnen kilometers hoog zijn en kunnen reiken tot boven het maaiveld. Algemeen wordt verondersteld dat ze zijn ontstaan doordat bovenliggende lagen (de zg. overburden) de lichtere zoutlaag omhoog zouden hebben geperst. Het zout zou sinds het Trias, toen het pakket afzettingen op het zout een dikte van 500 m overschreed, zijn gaan vloeien. Het zoutgesteente verplaatste zich daarbij over soms tientallen kilometers horizontaal en kilometers verticaal. Dit vloeimechanisme staat bekend als *diapirisme*, *halokinese* of *zouttektoniek*.



AFBEELDING LINKERPAGINA | Drie kilometer hoge zoutpijlers onder Noord-Nederland raken op een paar honderd meter na het maaiveld. Ze zijn volledig begraven onder sedimentair gesteente. Bron: TNO Geological Survey of The Netherlands.

Citaat uit 'Geology of the Netherlands' (Wong *et al.*, 2007): "Rock salt compacts already during early stages of burial to a tight mass with a constant density of 2.168 kg/m<sup>3</sup>. Other sediments show an increase in density with depth owing to cementation and the reduction of pore volume as a function of overburden and pore pressures. Consequently, in near-surface positions, where sand and clay typically show densities of 1.200 to 1.400 kg/m<sup>3</sup>, halite is relatively heavy, whilst below 500 m it is lighter than surrounding rocks. This results in an unstable situation."

Tabel 1 geeft een overzicht van de diverse dichtheden die worden aangenomen in modellen om zouttektoniek te simuleren en te verklaren.



AFBEELDING 1: | Kaart van het Nederlandse deel van de Noordzee. Het onderzoek heeft zich beperkt tot alle offshore boringen in de blokken B, D, F, J, M en N. Bron: TNO - Geological Survey of the Netherlands.

Deze uitgangspunten worden niet ondersteund door onderzoek dat de veronderstelde dichtheden van de betrokken gesteenten aantoonst. Ook wordt in de bovenliggende lagen de gebergtevorming, die gepaard moet gaan met deze voortgaande zoutverplaatsing, niet waargenomen. Daarom werd het ontstaan van zoutpijlers ook wel vergeleken met het proces in een lavalamp. In een lavalamp rijst de ene vloeistof omhoog en geeft de andere vloeistof weerstandsloos ruim baan. Toch is het onvoorstelbaar dat beide gesteenten, zout en overburden, zo weerstandsloos hebben gevloeid. Alle redenen dus om zouttektoniek en de onderbouwing van de vermeende dichtheidsverschillen eens nader te onderzoeken.

### Dichtheidsonderzoek overburden

Deze studie richt zich op aardlagen uit achtereenvolgens Trias, Jura, Krijt, Tertiair en Kwartair boven het Zechstein (Perm). Van deze gesteenten, tot een diepte van maximaal drie kilometer, zijn de dichtheden geïnventariseerd. Alle 177 boringen in het Nederlandse deel van de Noordzee, in de blokken B, D, F, J, M en N, waarvan de data beschikbaar waren via [www.nlog.nl](http://www.nlog.nl) in de periode februari tot mei 2014, zijn geanalyseerd. Zie afbeelding 1 voor een overzichtskaart.

Van slechts een beperkt aantal boringen zijn van boorkernen de korrel-dichtheid en de porositeit vastgesteld. Door de korrel-dichtheid te vermenigvuldigen met de porositeit is de actuele dichtheid van het droge gesteente nauwkeurig te berekenen. Uitgaande van met water á 1.000 kg/m<sup>3</sup> gevulde poriën kan de werkelijke dichtheid worden benaderd. De resultaten zijn getoond in Tabel 2 en ingetekend in afbeelding 2. De overburden blijkt fors lichter dan de waarden in tabel 1. Mogelijk is het effect van porositeit en de diepte afhankelijkheid onderschat in de modelvorming.

### Dichtheidsonderzoek steenzout

Steenzout is een mix van allerlei zouten waaronder bijvoorbeeld het zware anhydriet. In Tabel 3 worden alle dichtheidsmetingen van lagen in het Zechstein genoemd. Helaas zijn aan zoutkernen uit de vakken B, D, F, J, M en N slechts enkele dichtheidsmetingen uitgevoerd. Om een goed beeld te verkrijgen zijn gegevens



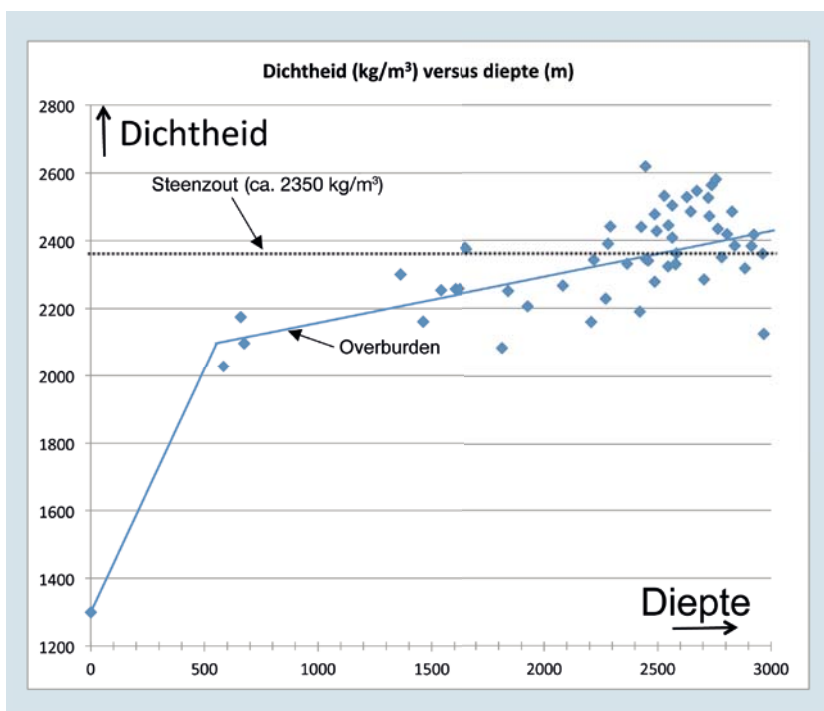
van enkele onshore boringen toegevoegd. Het valt op dat het steenzout met een dichtheid van  $2.702 \text{ kg/m}^3$  gemiddeld veel zwaarder is dan in Tabel 1 is aangenomen. Daarbij moet wel opgemerkt worden dat de Z2 en Z3 zoutlagen niet gesampled zijn. Deze bestaan grotendeels uit haliet met een dichtheid van  $2.168 \text{ kg/m}^3$ . Het polytechnisch zakboekje (Tysma *et al.*, 1993) bepaalt het steenzout op  $2.300\text{--}2.400 \text{ kg/m}^3$ . Dat is aannemelijk met de beschikbare gegevens, daarom is in afbeelding 2 een waarde van ca.  $2.350 \text{ kg/m}^3$  genomen voor steenzout.



AFBEELDING 3: | De vloeistof in een lavalamp stijgt op, als gevolg van dichtheids-verschil.

Studie	Zout dichtheid ( $\text{kg/m}^3$ )	Overburden ( $\text{kg/m}^3$ )	Dichtsheids-verschil ( $\text{kg/m}^3$ )	Diepte afhankelijkheid
Schultz-Ela <i>et al.</i> , 1993	2200	2400	200	Diepte onafhankelijk
Keken <i>et al.</i> , 1993	2160	2300	140	Diepte onafhankelijk
Poliakov <i>et al.</i> , 1996	2200	2500	300	Diepte onafhankelijk
Davison <i>et al.</i> , 1996	?	2500	?	Diepte onafhankelijk
Gemmer <i>et al.</i> , 2005	2200	2300	100	Diepte onafhankelijk
Wong <i>et al.</i> , 2007	2168	1300 (at surface) 2168 (at 500 m)	?	Diepte afhankelijk
Fuchs <i>et al.</i> , 2011	2264	2600	336	Diepte onafhankelijk

TABEL 1: | Dichtheden zoals toegepast in verschillende modellen om zouttektoniek te verklaren. De diepte afhankelijkheid wordt grotendeels genegeerd. Ondanks de grote onderlinge verschillen wordt geen van de gebruikte waarden onderbouwd met een dichtheidsonderzoek. Opmerking m.b.t. Poliakov *et al.* (1996): hoewel op pagina 292 wordt aangegeven dat de dichtheid zou variëren van  $1.800 \text{ kg/m}^3$  aan de oppervlakte tot  $2.500 \text{ kg/m}^3$  op 4 km diepte, zijn deze dichtheden niet in het model toegepast.



AFBEELDING 2: | De dichtheid van steenzout is diepte-onafhankelijk, vanwege de verwaarloosbare porositeit. De dichtheid van de overburden is bepaald met de data uit Tabel 2. Deze neemt toe met de diepte, vanwege de porositeit die compactie en cementatie toelaat. Sedimentaire gesteenten onder een overburden van ca. 2.500 meter verkrijgen een hogere dichtheid dan steenzout.

## Bespreking resultaten

Het is duidelijk dat de data uit Tabel 1 niet overeenkomen met de feitelijke situatie zoals samengevat in afbeelding 2. De data waarop de modellen ter verklaring van zouttektoniek zijn gebouwd zijn dus onjuist.

Toch is de eerste indruk dat zoutpijlers zijn ontstaan door een lavalamp-achtige dichtheidsverschil-gedreven-beweging wel mogelijk (Afb. 3). (Vervolg op pagina xx)



Periode	Stratigrafische eenheid Zie tabelopmerking (1*)	Boring	Aantal metingen	Diepte (m) (2*)	Porositeit (%)	Dichtheid (Kg/m <sup>3</sup> )
Kwartair-Tertiair	Boven-Noordzee Groep	Wong, 2007	-	0	-	1300
Kwartair-Tertiair	Boven-Noordzee Groep	B10-03	74	584	39.3	2028
Kwartair-Tertiair	Boven-Noordzee Groep	B17-05	75	660	30.7	2175
Kwartair-Tertiair	Boven-Noordzee Groep	B17-06	34	675	33.8	2097
Boven-Krijt	Krijtkalk Groep	B13-02	7	1624	26.1	2258
Boven-Krijt	Krijtkalk Groep	B13-01	8	1814	37.6	2082
Boven-Krijt	Ekofisk Formatie	B14-01	12	1927	28.5	2206
Boven-Krijt	Ommelanden Formatie	F06-02	2	1463	31.7	2162
Boven-Krijt	Ommelanden Formatie	F02-A-03	5	1541	26.1	2254
Boven-Krijt	Ommelanden Formatie	F03-03	23	1656	18.8	2375
Boven-Krijt	Ommelanden Formatie	F03-01	14	1842	15.3	2251
Boven-Jura/Onder-Krijt	Vlieland Kleisteen Formatie	M04-01	20	2628	8.8	2528
Boven-Jura/Onder-Krijt	Vlieland Kleisteen Formatie	M07-03	15	2723	12.4	2526
Boven-Jura/Onder-Krijt	Kimmeridge Klei Formatie	B14-01	61	2219	15.8	2343
Boven-Jura/Onder-Krijt	Kimmeridge Klei Formatie	F03-FB-107	21	2546	20.5	2324
Boven-Jura/Onder-Krijt	Scruff Groenzand Formatie	B13-02	35	2271	24.6	2228
Boven-Jura/Onder-Krijt	Scruff Groenzand Formatie	F03-01	36	2365	20.7	2331
Boven-Jura/Onder-Krijt	Scruff Groenzand Formatie	B18-03	48	2421	27.4	2190
Boven-Jura/Onder-Krijt	Scruff Groenzand Formatie	F03-07	73	2487	21.5	2278
Boven-Jura/Onder-Krijt	Stortemelk Laagpakket	F18-10-S1	29	2082	20.8	2267
Boven-Jura/Onder-Krijt	Stortemelk Laagpakket	F15-A-01	52	2565	15.3	2409
Boven-Jura/Onder-Krijt	Stortemelk Laagpakket	M07-03	22	2729	14.7	2472
Boven-Jura/Onder-Krijt	Scruff Spiculiet Laagpakket	F18-01	50	2208	28.7	2159
Boven-Jura/Onder-Krijt	Scruff Spiculiet Laagpakket	F15-A-01	29	2580	19.5	2330
Boven-Jura/Onder-Krijt	Scruff kleilig Laagpakket	F18-05	43	2449	18.8	2345
Boven-Jura/Onder-Krijt	Boven-Slenk Formatie	F03-FB-107	197	2579	21.0	2330
Boven-Jura/Onder-Krijt	Boven-Slenk Formatie	F03-03	4	2583	17.2	2362
Boven-Jura/Onder-Krijt	Boven-Slenk Formatie	F03-04	57	2766	11.5	2435
Boven-Jura/Onder-Krijt	Vlieland Boven Kleisteen Formatie	F03-FB-105-S3	27	2962	20.4	2361
Boven-Jura/Onder-Krijt	Midden-Slenk Zandsteen Laagpakket	F03-FB-105-S3	6	2967	31.4	2124
Boven-Jura/Onder-Krijt	Onder-Slenk Formatie	F11-01	62	2282	18.0	2390
Boven-Jura/Onder-Krijt	Onder-Slenk Formatie	B18-03	11	2782	13.5	2351
Boven-Jura/Onder-Krijt	Onder-Slenk Formatie	F03-08	33	2840	15.7	2385
Boven-Jura/Onder-Krijt	Onder-Slenk Formatie	F03-01	42	2913	17.4	2384
Boven-Jura/Onder-Krijt	Onder-Slenk Formatie	F03-07	18	2924	14.8	2418
Boven-Jura/Onder-Krijt	Puzzle Hole Formatie	F09-02	36	1605	25.7	2258
Boven-Jura/Onder-Krijt	Friese Front Formatie	F17-06	10	1651	17.7	2379
Boven-Jura/Onder-Krijt	Friese Front Formatie	F18-07	11	2447	8.6	2619
Boven-Jura/Onder-Krijt	Friese Front Formatie	F17-04	28	2458	19.0	2341
Boven-Jura/Onder-Krijt	Friese Front Formatie	F15-06	3	2487	9.2	2478
Boven-Jura/Onder-Krijt	Friese Front Formatie	F18-10-S2	19	2495	15.3	2428
Boven-Jura/Onder-Krijt	Friese Front Formatie	F18-02	10	2564	9.6	2504
Boven-Jura/Onder-Krijt	Friese Front Formatie	F18-09-S1	34	2672	11.4	2546
Boven-Jura/Onder-Krijt	Friese Front Formatie	M04-02	6	2828	6.9	2485
Boven-Jura/Onder-Krijt	Terschelling Zandsteen Laagpakket	M01-01	27	2292	15.2	2441

TABEL 2 | Voor vervolg en uitleg zie volgende pagina.



Periode	Stratigrafische eenheid Zie tabelopmerking (1*)	Boring	Aantal metingen	Diepte (m) (2*)	Porositeit (%)	Dichtheid (Kg/m <sup>3</sup> )
Boven-Jura/Onder-Krijt	Terschelling Zandsteen Laagpakket	M04-02	52	2645	11.4	2485
Boven-Jura/Onder-Krijt	Rifgronden Laagpakket	F17-04	27	2547	12.4	2445
Midden/Onder-Jura	Onder-Werkendam Formatie, ATWDL	F11-01	71	2530	11.3	2532
Trias	Solling Formatie	M08-02	71	2428	14.7	2440
Trias	Onder- Detfurth Formatie, Zandsteen	F10-01	134	2704	21.6	2285
Trias	Onder-Detfurth Formatie, Zandsteen	M07-02	11	2738	8.5	2563
Trias	Volpriehausen Formatie, Klei en Siltsteen	N07-01 (3*)	5	1363	21.1	2301
Trias	Volpriehausen Formatie, Klei-Siltsteen	M07-02	144	2757	7.8	2581
Trias	Onder- Volpriehausen Formatie, Zandsteen	M07-02	39	2805	13.5	2419
Trias	Onder-Volpriehausen Formatie, Zandsteen	M07-05-51	59	2885	20.7	2318
Totaal aantal metingen			2042			

TABEL 2. | Porositeiten en dichtheden van boorkernen uit diverse lagen van de overburden. Van elke stratigrafische laag zijn alle metingen per boring gemiddeld. De vermelde dichtheid is berekend door de korrel-dichtheid te vermenigvuldigen met de porositeit en door aan de poriën een dichtheid van 1.000 kg/m<sup>3</sup> toe te kennen.

(Opmerkingen bij tabel 2; (1\*) Details betreffende de stratigrafische eenheden kunnen worden gevonden bij [www.dinoloket.nl](http://www.dinoloket.nl), bijvoorbeeld: <https://www.dinoloket.nl/ommelanden-formation-ckgr>. (2\*) De diepte langs het boorgat is gecorrigeerd voor dilatatie in geval het verschil groter was dan 10 m. (3\*) Van boring M07-01 en N07-01 zijn op een diepte van 1363 m exact identieke resultaten geadministreerd. Via de originele onderzoeksrapporten kon worden vastgesteld dat alleen de data van N07-01 correct zijn. Daarom is M07-01 uit dit overzicht gelaten.)

Zoutlaag (Zechstein)	Boring	Aantal metingen	Diepte (m)	Porositeit %	Dichtheid kg/m <sup>3</sup>
Zechstein Caprock	F15-06	54	2523	11.9	2569
Zechstein Groep (4*)	AKM-14	67	1944	18.6	2440
Of, waarschijnlijk: Zechstein Boven-Kleisteel Formatie en: Z4 PegmatietAnhydriet Laagpakket	AKM-14	59	1943	20.9	2373
Z4 PegmatietAnhydriet Laagpakket	AKM-14	8	1953	1.3	2935
Z3 Carbonaat Laagpakket	SLO-01	3	1354	10.7	2739
Z2 BasaalAnhydrietLaagpakket	SLO-04	3	2618	0.97	2667
Z2 Carbonaat Laagpakket	AKM-13	32	2174	2.9	2662
Z2 Carbonaat Laagpakket	SLO-04	18	2607	1.5	2709
Z2 Carbonaat Laagpakket	SLO-01	23	2608	4.2	2658
Z2 Carbonaat Laagpakket	ANA-01	11	2828	1.2	2721
Z2 Carbonaat Laagpakket	D15-02	22	3204	1.5	2759
Z1 Anhydriet Laagpakket	SLO-04	4	2624	0.2	2886
Z1 Anhydriet Laagpakket	SLO-01	46	2630	1.5	2874
Z1 Anhydriet Laagpakket	D15-02	38	3213	0.3	2886
Z1 Carbonaat Laagpakket	SLO-04	10	2644	1.7	2712
Z1 Carbonaat Laagpakket	SLO-01	21	2646	6.2	2656
Z1 Carbonaat Laagpakket	ANL-01	2	3271	8.3	2597
Totaal aantal metingen		354	Gemiddelde dichtheid		2702

TABEL 3. | Porositeiten en dichtheden van boorkernen uit diverse Zechstein-zoutlagen. Van elke stratigrafische laag zijn alle metingen per boring gemiddeld. De vermelde dichtheid is berekend door de korrel-dichtheid te vermenigvuldigen met de porositeit en door aan de poriën een dichtheid van 1.000 kg/m<sup>3</sup> toe te kennen. NB: Betreffende het Z4 PegmatietAnhydriet Laagpakket: Pegmatietkristallen wijzen veelal op een vulkanisch gesteente. Het is opmerkelijk dit te vinden in een indampingsgesteente. Sinds 1982 wordt onderkend dat anhydriet voorkomt in stollingsgesteenten (Luhr, 2008). Voorheen werd anhydriet uitsluitend gekend als indampingsgesteente. (Opmerkingen bij tabel 3; (4\*) De naam 'Zechstein Groep' is vaag, aangezien er daarbinnen vele lagen te onderscheiden zijn. Deze data kan verdeeld worden in 59 en 8 onderscheiden metingen. Mogelijk behorend tot respectievelijk de Zechstein Boven-Kleisteel Formatie en het Z4 Pegmatiet Anhydriet Laagpakket. Dit dient dan wel geverifieerd te worden aan de kernen zelf.)



(Vervolg van pagina xx) Namelijk, door vloeibaar gesteente als uitgangspunt te nemen. In Tabel 4 zijn de dichtheden van de betrokken vloeibare zouten geïnventariseerd. Een zoute magma is aanmerkelijk lichter dan de gestolde vorm. Zo'n magma heeft een dichtheid van ongeveer 2000 kg/m<sup>3</sup>, wat zich al stollend een weg door de sedimenten er boven zou banen.

De zouten die onderdeel uitmaken van steenzout	Temperatuur(K)	Dichtheid (kg/m <sup>3</sup> )	Bron
NaCl	1077	1549	Robertson <i>et al.</i> , 1958
CaCO <sub>3</sub>	1073	2502	Liu en Lange, 2003
KCl	1058	1517	Jaeger, 1917
MgCl <sub>2</sub>	1077	1658	Janz, 1988
CaSO <sub>4</sub>	-	?	-

TABEL 4. | De dichtheden van de betrokken zouten in vloeibare fase bij atmosferische druk. Een beperkte literatuurstudie leverde geen gegevens op van anhydriet. De belangrijkste component van steenzout, NaCl, smelt bij 1074 K. Elk zout dat aan de smelt wordt toegevoegd, verlaagt de smelttemperatuur verder. Een zoutmagma heeft dus een betrekkelijk laag smeltpunt. N.B.; Liu en Lange bepalen rekenkundig de dichtheid bij atmosferische druk. In een magma treedt geen decompositie naar CaO en CO<sub>2</sub> op, vanwege de hoge druk.

Dergelijke magma's komen voor en zijn zeer dun vloeibaar, als water. Alle ionen, die de zouten in steenzout hebben gevormd, worden bijvoorbeeld gevonden in de lava van de Ol Doinyo Lengai (Mitchell, 2008). Deze magma komt voort uit de mantel.

### Tot slot

Uiteraard vereist een dergelijk scenario een totale ommekeer in het huidige geologisch denken. In plaats van steenzout te duiden als een indampingsgesteente, onderworpen aan langzame processen, wordt nu een vulkanisch ontstaan voorgesteld. Aan gezien een catastrofaal ontstaan meer verklarend is voor zoutdiapirisme is dit zeker het overwegen waard.

## LITERATUUR

- Davison, I., I. Alsop & D. Blundell, 1996. *Salt tectonics: some aspects of deformation mechanics*, Geological Society, London, Special Publications, v.100, 8 pp.
- Fuchs, L., H. Schmeling & H. Koyi, 2011. *Numerical models of salt diapir formation by down-building: the role of sedimentation rate, viscosity contrast, initial amplitude and wavelength*, *Geophysical Journal Int.*, 3 pp.
- Gemmer, L., C. Beaumont & S.J. Ings, 2005. *Dynamic modelling of passive margin salt tectonics: effects of water loading, sediment properties and sedimentation patterns*, *Basin Research* 17, pp. 383–402; Fig 6.
- Jaeger F.M., 1917. *Über die Temperaturabhängigkeit der molekularen freien Oberflächenenergie von Flüssigkeiten im Temperaturbereich von -80°C bis +1650°C*, *Z.Anorg.Allg.Chem.* 101, pp. 1-214.
- Janz, G. J., 1988. *Thermodynamic and Transport Properties of Molten Salts: Correlation Equations for Critically Evaluated Density, Surface Tension, Electrical Conductance, and Viscosity Data*, *J. Phys. Chem. Ref. Data*, 17, Suppl. 2, 70 pp.
- Keken, P.E. van, C.J. Spiers, A.P. van den Berg & E.J. Muzyert, 1993. *The effective viscosity of rocksalt: implementation of steady-state creep laws in numerical models of salt diapirism*, Figure 5.4, *Tectonophysics*, 69 pp.
- Liu, Q. & R.A. Lange, 2003. *New density measurements on carbonate liquids and the partial molar volume of the CaCO<sub>3</sub> component*; Abstract; *Contributions to Mineralogy and Petrology*; vol. 146, issue 3, pp. 370-381.
- Luhr, J.F., 2008. *Primary igneous anhydrite: Progress since its recognition in the 1982 El Chichón trachyandesite*, *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 175(4): pp. 394–407.
- Mitchell, R.H. & F.A. Belton, 2008. *Cuspidine-sodalite natrocarbonatite from Oldoinyo Lengai, Tanzania: a novel hybrid carbonatite formed by assimilation of ijolite*, *Mineralogical Magazine*, December, Vol. 72(6), pp. 1261–1277.
- Poliakov, A. N. B., Y.Y. Podladchikov, E.C. Dawson & C.J. Talbot, 1996. *Salt diapirism with simultaneous brittle faulting and viscous flow*; Geological Society, London, Special Publications, 100: pp. 291-302, 296 pp.
- Robertson, E.C., R.A. Robie & K.G. Books, 1958. *Physical Properties of Salt, Anhydrite, and Gypsum--Preliminary Report, Trace Elements Memorandum Report 1048*, United States Department of the Interior, Geological Survey: 23 pp.
- Schultz-Ela, D.D., M.P.A. Jackson & B.C. Vendeville, 1993. *Mechanics of active salt diapirism*; *Tectonophysics*, 228, 304 pp.
- Tysma, S., *et al.*, 1993. *Poly Technisch Zakboekje*, Royal PBNA, 45th edition, ISBN 90-6228-217-2, hoofdstuk E1, Tabel 1.25.
- Wong, Th.E., D.A.J. Batjes & J. de Jager, 2007. *Geology of the Netherlands*, Royal Netherlands Academy of Arts and Sciences, Chapter concerning Salt edited by Geluk, M.C., W.A. Paar & P.A. Fokker, 284 pp.

