

TNO-rapport
NITG 00-314-B

Aanvullende Analyse zoutproblematiek (AAK)

Eindrapport

Datum

Augustus 2001

Auteur(s)

J. Baker
G. de Lange
A.F.B. Wildenborg

Richard Holkade 10
Postbus 157
2000 AD Haarlem

Telefoon 023 530 03 00
Fax 023 535 16 14

Alle rechten voorbehouden.
Niets uit deze uitgave mag worden
vermenigvuldigd en/of openbaar
gemaakt door middel van druk, foto-
kopie, microfilm of op welke andere
wijze dan ook, zonder voorafgaande
toestemming van TNO.

Indien dit rapport in opdracht werd
uitgebracht, wordt voor de rechten en
verplichtingen van opdrachtgever en
opdrachtnemer verwezen naar de
Algemene Voorwaarden voor
onderzoeksopdrachten aan TNO, dan
wel de betreffende terzake tussen de
partijen gesloten overeenkomst.
Het ter inzage geven van het
TNO-rapport aan direct belang-
hebbenden is toegestaan.

© 1998 TNO

Projectnummer

005.70084

Opdrachtgever

Ministerie van Economische Zaken

Goedgekeurd

J.L. Ritsema



Projectleider

A.F.B. Wildenborg



Dit rapport vormt een bijdrage aan het CORA Onderzoek-
programma Fase 1 en kwam mede tot stand met bijdragen van
Groundcontrol b.v. te Rotterdam.

Uitgebreide samenvatting

De CORA Commissie, opvolger van de OPLA Cie, duidde in haar kaderplan aan (Fase 1A, 1995-2000) dat gesignaleerde aardwetenschappelijke onzekerheden betreffende berging in zout dienden te worden weggenomen. Zij doelde hier in het bijzonder op onzekerheden in de resultaten van het OPLA Programma. In de aanbevelingen van de eindrapporten betreffende het project GEO-1A (RGD, 1993) en het project GEO-3A van Groundcontrol (1993) worden een aantal onzekerheden genoemd. In 1994 bracht Groundcontrol nog een aantal discussiepunten naar voren in een review van het aardwetenschappelijke onderzoek in Fase 1A van het OPLA Programma.

De AAK-studie – Aanvullende Analyse zoutproblematiek – sluit in haar *doelstelling* hier direct op aan. Deze is namelijk gericht op het vaststellen dan wel wegnemen van een aantal onzekerheden in de kennis van natuurlijke processen die de zoutbarrière en de omringende geosfeer kunnen beïnvloeden. Deze processen spelen een rol in de groep van ‘normale evolutie’ scenario’s; vooral de processen zoutoplossing en zoutstijging in zowel het subrosie/diapirose-scenario als het glaciatie-scenario.

De discussiepunten die in de AAK-studie nader onderzocht zijn, zijn in twee categorieën onder te verdelen:

A. Processen in de caprock

- Tijdens perioden van ijskapvorming fluctueert de druk en temperatuur in de ondiepe ondergrond. Het evenwicht gips <-> anhydriet in ondiep gelegen caprock zou hierdoor verstoord kunnen worden en kunnen leiden tot volumeverandering en vervorming van de caprock. Groundcontrol wijst erop dat onder hoge druk in een open systeem gips kan worden omgezet in anhydriet.
- De rol van holtevorming in de caprock tijdens interglacialen en holtesluiting gedurende ijstijden. Groundcontrol stelt dat holten tijdens een interglaciaal ontstaan en tijdens een glaciaal onder invloed van een ijslast worden dichtgedrukt.

B. Zoutbeweging

- Bij de berekeningsmethodiek bestaat verschil van inzicht in de te gebruiken formule voor de berekening van de uitwendige en inwendige stijgsnelheid en de subrosiesnelheid. Groundcontrol brengt de caprock-vormingssnelheid als extra variabele in.
- Aangaande de relatief grote stijgsnelheid van de pijler Schoonlo vindt discussie plaats over de oorzaak waaraan dit fenomeen moet worden toegeschreven: halokinese versus overconsolidatie en uitzetting van steenzout. De laatste twee aspecten zijn door Groundcontrol aangedragen.

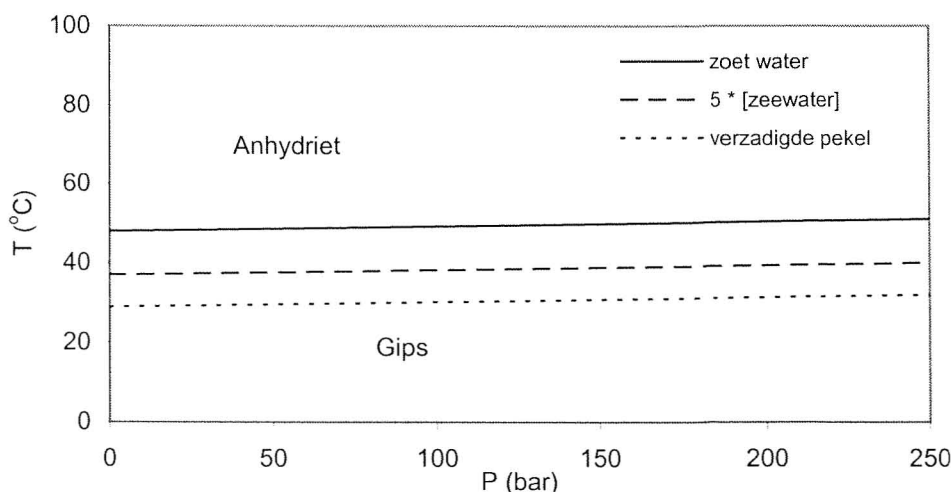
Processen in de caprock

Als de bovenzijde van een zoutstructuur in contact komt met onderverzadigd grond- of oppervlaktewater zal het goed oplosbare steenzout oplossen. Slechter oplosbare bestanddelen zoals anhydriet of kalk blijven in de vorm van een kap op het nog niet opgeloste zout achter. Deze kap wordt aangeduid met de term 'caprock' of gipshoed, en wordt per definitie als onderdeel van de zoutstructuur beschouwd.

De in een caprock accumulerende CaSO_4 -mineralen zijn niet stabiel. Afhankelijk van de temperatuur, druk en saliniteit kan omzetting plaatsvinden tussen de twee mineralen anhydriet (zonder kristalwater) en gips (met kristalwater). De sulfaatmineralen zelf zijn ook aan oplossing onderhevig, zij het in veel mindere mate dan steenzout.

Omzetting van sulfaat-mineralen in de caprock

De discussie is gericht op het effect van een ijsbedekking op de stabiliteit van gips. Groundcontrol stelt dat de ijsbedekking tijdens het Saalien in een aantal Nederlandse caprocks geleid heeft tot omzetting van gips in anhydriet. In een open systeem zou gips onder druk immers snel tot anhydriet transformeren. Anhydriet is een goede warmtegeleider. Daardoor zou permafrost dieper kunnen reiken dan door de RGD en ECN is berekend in het geval van een caprock bestaande uit gips.



Figuur 1 De stabiliteitsvelden van gips en anhydriet in een gesloten systeem als functie van de temperatuur, druk en saliniteit.

In een gesloten systeem is anhydriet stabiel bij een hoge temperatuur (figuur 1), terwijl druk van minder belang is. Significante verschuivingen in de overgang gips <-> anhydriet worden veroorzaakt door grote veranderingen in de saliniteit. De ontwerpen voor een berging van radioactief afval zijn geprojecteerd in een P-T

bereik, waarin omzetting tussen anhydriet en gips kan plaatsvinden.

De conclusie uit de berekeningen voor een *gesloten* systeem is dat landijs geen anhydriet en water (of ijs) uit gips kan maken.

Toenemende saliniteit bij een vaste temperatuur kan leiden tot omzetting van gips in anhydriet. Bij de saliniteit rondom de meeste zoutstructuren in Nederland zal dit punt tijdens een ijstijd niet bereikt worden.

De gebruikte thermodynamische relaties gelden niet voor een *open* systeem. Het is mogelijk dat gips in een open systeem door ijsbelasting wordt omgezet in anhydriet. Anhydriet neemt een kleiner volume in dan gips. Dit zou aldus Groundcontrol betekenen dat gipsvorming dateert van de periode na de laatste ijsbedekking (na het Saalien).

Tegelijkertijd met een ijsbelasting neemt de temperatuur af en kan de infiltratie van smeltwater tot een verlaging van de saliniteit leiden. Hoe drukverhoging in combinatie met een temperatuurverlaging uitwerkt op gips in een open systeem is niet bekend.

Vorming van oplosholten in de caprock

Zout (chloriden), anhydriet en gips (sulfaten) en kalk (carbonaten), lossen in afnemende mate op indien zij in contact komen met niet verzadigd grondwater. Daardoor ontstaan holruimten aan de rand van of in deze gesteenten. Door het al of niet gelijktijdig instorten of inzakken van de afdeklagen boven deze holruimten kunnen uiteindelijk verzakkingen aan het maaiveld optreden. Dergelijke oppervlakteverschijnselen manifesteren zich in horizontale zin op een schaal van enkele meters tot enkele honderden meters. Door deze processen neemt de porositeit toe, en daardoor kan de permeabiliteit toenemen.

Discussie over de vorming van oplosholten was vooral gericht op de timing. Groundcontrol veronderstelde dat holten worden gevormd in interglaciale perioden zonder ijsbedekking. Door de toegenomen verticale druk tijdens een ijsbedekking worden gevormde holten weer dichtgedrukt.

De relatie tussen oplossing van de caprock en het afwisselend optreden van glaciaal en interglaciaal in het Kwartair is niet eenduidig. Oplossing wordt versterkt indien zoet water met een behoorlijke snelheid langs voorkomens van anhydriet, gips of steenzout stroomt. Dit treedt vooral op in situaties waarbij meteorisch water boven ondiepe zoutvoorkomens infiltreert. Een dergelijke situatie kan zich zowel tijdens een interglaciaal als een glaciaal voordoen. Hier zijn enige aanwijzingen voor, die afkomstig zijn uit zowel veldwaarnemingen als modelstudies.

Stijging van zoutstructuren

Methode voor de berekening van zoutstijging

Sedimenten, die gelijktijdig met de beweging van het steenzout worden gevormd, zullen boven de zoutstructuur als relatief dunne pakketten worden afgezet. In de zoutdepletiegebieden blijven zij als relatief dikke lagen achter. De ontstaansgeschiedenis van de zoutstructuur en de mate van zoutbeweging zijn dus af te leiden uit de eigenschappen van het afdekpakket.

Voor de kwantificering van de zoutbeweging is door de Rijks geologische Dienst een praktisch concept ontworpen. In het concept zijn een aantal variabelen benoemd die de zoutbeweging karakteriseren (zie ook figuur 2A en B). Zechsteinzout met daarin een percentage slecht oplosbare bestanddelen, waaronder sulfaten, stijgt met een gemiddelde snelheid; deze wordt de gemiddelde inwendige stijgsnelheid genoemd. Zolang het steenzout aan de bovenzijde van de zoutstructuur niet aan oplossing onderhevig is, is de stijgsnelheid van de bovenzijde van de zoutstructuur gelijk aan de gemiddelde inwendige stijgsnelheid van het zoutlichaam. Tot zover is er geen verschil van inzicht in de gebruikte concepten van de Rijks Geologische Dienst en Groundcontrol.

Als het steenzout in contact komt met onverzadigd grondwater lost deze component op en de slecht-oplosbare bestanddelen blijven achter. De uitwendige stijgsnelheid is dan gelijk aan de inwendige stijgsnelheid min de subrosiesnelheid.

Groundcontrol introduceert twee nieuwe parameters in de formule voor de stijgsnelheid die is gebaseerd op diktevariaties in het afdekpakket:

- caprock-vormingsnelheid
- holtevormingsnelheid

De introductie van de *caprock-vormingsnelheid* in de door de RGD gehanteerde formule zou juist zijn als deze snelheid gekoppeld is aan volumeverandering van het reeds aanwezige oplossingsresidu. De verandering in het volume kan het gevolg zijn van oplossing van de caprock of van chemische omzetting van de caprock. Omzetting van anhydriet in gips leidt tot een vergroting van het volume van de caprock (relatieve stijging van de bovenzijde van de caprock, zie figuur 2C). Voortgaande oplossing van de sulfaten (zie figuur 2D) leidt juist tot een afname van het caprock-volume (relatieve daling van de bovenzijde van de caprock).

Het gebruik van de caprock-vormingsnelheid in de RGD-formule zou niet juist zijn als hiermee nieuwvorming van caprock wordt bedoeld. Caprocks boven Nederlandse zoutstructuren bestaan grotendeels uit sulfaten die oorspronkelijk in het niet-opgeloste steenzout aanwezig waren. Dit volumetrische aandeel sulfaten is impliciet in de variabele v_i (inwendige stijgsnelheid van steenzout inclusief slecht-oplosbare bestanddelen) opgenomen. Er is, dus buiten de zoutstructuur zelf, geen externe bron voor de sulfaten in de caprock.

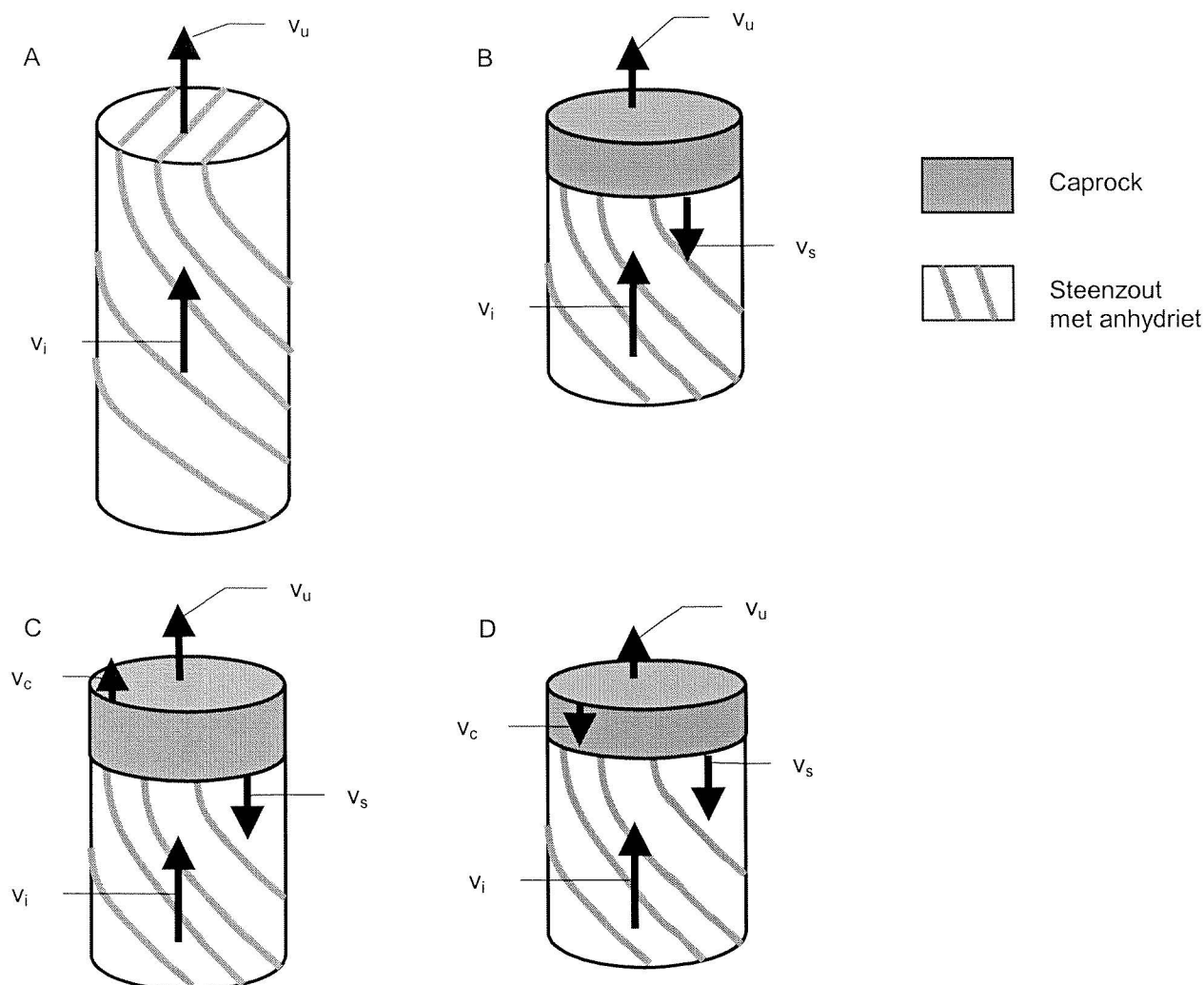
Door oplossing van steenzout of voortgaande oplossing van de caprock kunnen *holruimten* ontstaan (zie ook 'Vorming van oplosloten in de caprock'). Holtes worden gevormd op een schaal van enkele meters tot vele tientallen meters. Aan het maaiveld kunnen deze zich uiten in de vorming van depressies op een schaal van een tiental meters tot enkele honderden meters. Ten opzichte van de zoutstructuur met dimensies van 1 kilometer of meer zijn deze meestal lokale verschijnselen. Dit geldt ook voor de resulterende diktevariaties in het afdekpakket door de instorting of inzakking van de holruimtes. Zij vormen anomalieën in de meer grootschalige diktevariaties in het afdekpakket die optreden door de stijging van de zoutstructuur (horizontale schaal 1 tot 10 km). De lokale inzakkingverschijnselen vallen buiten de scope van de berekening van gemiddelde stijgsnelheden. Het kwantificeren van holtevorming en –sluiting op basis van geologisch data vergt een meer gedetailleerde verzameling veldgegevens dan voor de berekening van stijgsnelheden beschikbaar is.

Naast het verschil in ruimtelijke schaal is er ook een verschil in de tijdschaal waarop de processen opereren en zijn beschouwd. Het proces van holtevorming en –sluiting speelt zich af op een tijdschaal van enkele 10.000-en tot een miljoen jaar. De berekende stijgsnelheden zijn gemiddelden over perioden van enkele honderdduizenden tot vele miljoenen jaren. Zij omvatten doorgaans langere perioden dan voor de vorming en sluiting van holtes benodigd is.

Extra compactie door ijsbelasting

De kleilagen rondom een zoutstructuur kunnen extra inklinken door ijsbelasting, terwijl het zout zelf niet samendrukbaar is, zoals door Groundcontrol benadrukt is. In het project TRAKTOR (CORA Programma) is door het TNO-NITG het effect van ijsbelasting op klei gesimuleerd. In de modelberekeningen is aangenomen dat een ijskap van 1000 meter dik gedurende maximaal 20.000 jaar de ondergrond belast. De ijskap produceert smeltwater dat in de ondergrond infiltreert. Uit de modellering volgt dat de vervorming door ijsbelasting deels elastisch en deels plastisch is. De totale zakking aan het maaiveld door compactie bedraagt enige tientallen meters. De ijslast wordt na verloop van tijd nagenoeg volledig overgedragen op de korrelspanning in de klei, ook door infiltrerend smeltwater. De drainagecapaciteit van de aquifers boven en onder de klei is blijkbaar voldoende om de overdruk in de klei in een periode van 20.000 jaar te neutraliseren.

In eerdere berekeningen van de stijgsnelheid door de Rijks Geologische Dienst is aangenomen dat de waargenomen diktevariatie in het afdekpakket het gevolg is van zoutbeweging. De effecten van ijsbelasting zijn daarbij buiten beschouwing gelaten. De berekende stijgsnelheid is daardoor mogelijk overschat, aldus Groundcontrol. De aanpak van de RGD sluit wel goed aan bij de conservatieve benaderingswijze in de veiligheidsstudie.



Figuur 2 Schematische weergave van de gebruikte concepten voor de berekening van de gemiddelde uitwendige stijgsnelheid (v_u) en de relatie met de gemiddelde inwendige stijgsnelheid (v_i). Cilinders symboliseren zoutpijlers. A en B geven de situatie weer zoals is toegepast door de RGD, respectievelijk met subrosiesnelheid (v_s) = 0 en subrosiesnelheid > 0 ; C en D geven de concepten weer met inbegrip van de 'caprock-vormingsnelheid' (v_c), als deze zou verwijzen naar respectievelijk, een relatieve stijging van de bovenzijde van de caprock als gevolg van omzetting in gips of een relatieve daling van de bovenzijde van de caprock als gevolg van sulfaatoplossing.

Krimp en uitzetting van steenzout

Groundcontrol wees op de temperatuurafhankelijkheid van het steenzoutvolume; het krimpt bij temperatuurverlaging en zet uit bij temperatuurverhoging. Klimaatgebonden temperatuurschommelingen leiden tot beweging van de top van de zoutpijler.

Deze beweging is cyclisch omdat de temperatuurverandering zelf ook cyclisch is. Na gemiddeld 100.000 jaar, de duur van een glaciaal-interglaciaal cyclus, is het netto-effect nihil. Op korte termijn, d.w.z. op tijdsintervallen van enige 1.000-en tot 10.000-en jaren zijn wel netto-effecten van de temperatuurverandering op de stijgsnelheid mogelijk. Het door Groundcontrol gesignaleerde effect zou de lichte opwellingen kunnen verklaren die boven zoutpijlers te zien zijn. De door de RGD uitgevoerde berekeningen van de stijgsnelheid op basis van het afdekpakket hebben betrekking op lange tijdsintervallen, waardoor het temperatuureffect geneutraliseerd wordt.

De krimp die het steenzout door afkoeling ondergaat, zou kunnen leiden tot de vorming van scheuren in het zout. Dit proces zal aan een nader onderzoek onderworpen moeten worden.

Stijging van de pijler Schoonlo

Van alle in de Nederlandse ondergrond aanwezige zoutstructuren is de pijler Schoonlo een van de bekendste, mede door de publicatie van Mulder uit 1950. De pijler valt ook op door zijn voor Nederlandse begrippen hoge gemiddelde uitwendige stijgsnelheid van 0,11 mm per jaar voor de laatste 400.000 jaar, zoals door de Rijks Geologische Dienst was berekend. In wat breder perspectief is de hoogte van deze snelheid niet zo bijzonder. Uit het aanpalende gebied in Duitsland zijn meer structuren met een snelheid van een dergelijke grootte bekend.

In de berekeningen van de Rijks Geologische Dienst is aangenomen dat de diepte- en diktevariaties in het afdekpakket in belangrijke mate hun oorsprong vinden in de beweging van het dieper gelegen Zechstein-zout. Naast zoutbeweging zijn alternatieve processen denkbaar die een invloed uitoefenen op het afdekpakket. Twee daarvan, overconsolidatie van het afdekpakket door ijsbelasting rond niet-samendrukbaar zout en 'thermal recovering', zijn door Groundcontrol ingebracht. De omzetting van anhydriet in gips is een derde proces dat de beweging van de top van de zoutstructuur beïnvloeden kan. Het is evenwel niet duidelijk in hoeverre gips in de caprock van de pijler Schoonlo aanwezig is.

De berekende gemiddelde uitwendige stijgsnelheid van 0,11 mm/jaar voor de pijler Schoonlo is mogelijk te hoog geschat (maximaal 25%), doordat de afzettingen naast de pijler extra geconsolideerd zijn door ijsbelasting, terwijl het steenzout zelf niet is ingedrukt. Bovendien is het niet geheel uitgesloten dat de stijging voor een deel het gevolg is van uitzetting van de caprock, doordat anhydriet in gips wordt omgezet. Volgens analyses van Groundcontrol heeft de pijler Schoonlo in het geheel niet bewogen.

Conclusies en aanbevelingen

Caprock

In een gesloten systeem leidt ijsbelasting niet tot *omzetting van gips in anhydriet*. In een open systeem zou ijsbelasting wel tot omzetting van gips in anhydriet kunnen leiden. De druktoename gaat bij ijsbelasting gepaard met een temperatuurafname. De gezamenlijke invloed van deze veranderingen op de stabiliteit van gips is niet bekend.

Vorming van oplosloten vergroot de doorlatendheid van de caprock. Sluiting van oplosloten leidt tot het ontstaan van instortingdolines in het afdekpakket. Dit verhoogt de doorlatendheid van het afdekpakket. In de veiligheidsanalyse PROSA (OPLA Programma) is de caprock kortgesloten door de radionucliden vanuit het zout direct in de erboven liggende klei- en zandlagen te laten migreren. Omstandigheden voor de vorming van oplosloten kunnen zich zowel tijdens glacialen als interglacialen voordoen.

Zoutstijging

De introductie van de caprock-vormingsnelheid in de *berekening van de gemiddelde uitwendige stijgsnelheid* is juist als de eerstgenoemde variabele betrekking heeft op omvorming van het oplossingsresidu (hydratie, dehydratie of oplossing). De introductie is niet juist als de term betrekking heeft op nieuwvorming van de caprock. Groundcontrol blijft evenwel bij haar mening dat de door Groundcontrol voorgestelde methode voor de berekening van stijgsnelheden juist is.

Extra compactie van het afdekpakket door ijsbelasting rondom een niet samendrukbare pijler is zeker mogelijk, zoals Groundcontrol stelt. Het niet onderkennen van dit verschijnsel kan leiden tot een overschatting van de stijgsnelheid van de pijler. Een ijskap met een dikte van 1000 meter en een belastingsduur van 20.000 jaar kan een zakking van enige tientallen meters veroorzaken in een representatieve Nederlandse situatie. In de berekening van de stijgsnelheid op basis van diktevariaties in het afdekpakket is door de RGD een conservatieve benadering gebruikt. Zij nam aan dat de geobserveerde diktevariaties het gevolg zijn van zoutbeweging. Deze aanpak past in de conservatieve benadering van de veiligheidsanalyse.

Door *variatie in de temperatuur* van de ondergrond verandert het volume van steenzout. Bij een temperaturredaling resulteert dit in een daling van de top van het steenzout en vice versa. De klimaatgebonden variatie in de temperatuur speelt vooral op een termijn van 10.000 tot 100.000 jaar. Over langere perioden wordt de temperatuurverandering uitgemiddeld en speelt zij geen rol van betekenis in de netto stijging of daling van de top van het steenzout. Door krimp van het steenzout bij een temperatuurafname zouden scheuren in het zout kunnen ontstaan, die van invloed kunnen zijn op het radionuclidentransport.

Beschikbare waarden voor de gemiddelde uitwendige stijgsnelheid zijn niet in de veiligheidsstudie PROSA gebruikt. Dit geldt dus ook voor de waarde van de gemiddelde uitwendige stijgsnelheid die berekend is voor de *pijler Schoonlo*. In de

veiligheidsstudie PROSA is gebruik gemaakt van waarden voor de gemiddelde inwendige stijgsnelheid en de subrosiesnelheid.

Eindconclusie

De evaluatie van een aantal onzekerheden in de stijgsnelheid van zoutstructuren heeft geen ingrijpende gevolgen voor de veiligheidsanalyses die tot dusverre voor de berging van radioactief afval in Nederland uitgevoerd zijn. Krimp van steenzout door een temperatuurdaling zou kunnen leiden tot het ontstaan van scheuren in het steenzout en zou daarmee het transport van radionucliden in het steenzout kunnen beïnvloeden.

Aanbevelingen

De kans dat scheuren ontstaan in zout door afkoeling moet nader worden onderzocht. In de thermische analyses zal rekening gehouden moeten worden met de aanwezigheid van een goed warmtegeleidende anhydriet-caprock. De omzetting van gips in anhydriet in een open systeem en het voorkomen van gasinclusies in steenzout dient aan een nadere studie te worden onderworpen.

Slobeschouwing

Studies van het bureau Groundcontrol en van de Rijks geologische Dienst (nu TNO-NITG) geven aanleiding om rekening te houden met tijdelijke variaties in het tempo van het diapirisme en de vorming van caprock. Het valt aan te nemen dat het verschijnsel van de cyclische landijsbedekkingen, gepaarde gaande met een langdurig diep bevroren aardoppervlak, de processen zoutstijging en caprock vorming, althans voor een deel, heeft beïnvloed. Met de mechanismen die voor de ontwikkeling van Nederlandse zoutstructuren aangedragen zijn, is de geschiedenis van individuele pijlers eenvoudiger te herleiden.

Alle aangeroepte discussiepunten in het project AAK hebben betrekking op het gedrag van de geologische barrière op de lange termijn en de veiligheid van afvalberging. In het project kwam de discussie over het mijnbouwontwerp (technische barrière) en de implicaties van de huidige en toekomstige geologische omstandigheden hierop niet aan de orde. De onderzochte processen rond caprock vorming en zoutstijging hebben echter ook gevolgen voor het mijnbouwontwerp.

In de geologische berging van radioactief afval wordt het multi-barrière concept gehanteerd: technische en geologische barrières tezamen zullen een veilige berging moeten garanderen. Dit betekent dat het gedrag van de technische en geologische barrières integraal moet worden opgelost.

Wij bevelen aan om een integrale studie uit te voeren naar het gedrag van de technische en geologische barrières onder invloed van natuurlijke processen. De resultaten hiervan moeten leiden tot keuze-overwegingen voor locatie van een potentiële ondergrondse berging en tot aanpassingen in het ontwerp van de mijn.

Een dergelijk onderzoek zou uitgevoerd kunnen worden door samenwerking tussen mijnbouwtechnische onderzoeksinstituten, Groundcontrol en TNO-NITG.

Inhoud

Uitgebreide samenvatting.....	i
Lijst van figuren	xiii
1 Inleiding.....	1
2 Veranderingen in de caprock	5
2.1 Effecten van CaSO ₄ -omzetting	5
2.2 Vorming en sluiting van oplosloten.....	10
2.3 Slotbeschouwing van caprock-processen	16
3 Stijging van zoutstructuren	19
3.1 Methodiek voor de berekening van de stijgsnelheid	19
3.2 Compactie van het afdekpakket.....	26
3.3 Volumeverandering van steenzout.....	28
3.4 De zoutpijler Schoonlo	30
3.5 Slotbeschouwing van zoutstijging	33
4 Conclusies en aanbevelingen	35
5 Slotbeschouwing.....	37
Referenties.....	39

Lijst van figuren

Figuur 1	De stabiliteitvelden van gips en anhydriet in een gesloten systeem als functie van de temperatuur, druk en saliniteit.	ii
Figuur 2	Schematische weergave van de gebruikte concepten voor de berekening van de gemiddelde uitwendige stijgsnelheid (v_u) en de relatie met de gemiddelde inwendige stijgsnelheid (v_i).	vi
Figuur 2.1	De stabiliteitvelden van gips en anhydriet als functie van de temperatuur, druk en saliniteit.	6
Figuur 2.2	De stabiliteitvelden van gips, anhydriet en haliet als functie van de temperatuur en de saliniteit van het aanwezige (pekkel-)water (Dutton, 1987).	7
Figuur 2.4	Schematische geologische doorsnede van de ondergrond boven de pijler Lesum bij Bremen (Ortlam & Schnier, 1981).	13
Figuur 3.1	Methodiek voor de berekening van stijgsnelheden op basis van diktevariaties in het afdekpakket.	21
Figuur 3.2	Schematische weergave van de gebruikte concepten voor de berekening van de gemiddelde uitwendige stijgsnelheid (v_u) en de relatie met de gemiddelde inwendige stijgsnelheid (v_i).	24

1 Inleiding

In het OPLA Programma is reeds veel kennis over het natuurlijke gedrag van het steenzout en de omringende geosfeer vergaard (o.a. OPLA Commissie, 1993). Het in het OPLA Programma reeds uitgevoerde aardwetenschappelijke onderzoek ter ondersteuning van de veiligheidsstudie is desondanks toch op een aantal punten voor verbeteringen vatbaar.

Onzekerheden in de kennis van geologische processen waren gesignaleerd in de aanbevelingen van de eindrapporten betreffende het project GEO-1A (RGD, 1993) en het project GEO-3A van Groundcontrol (1993). In 1994 bracht Groundcontrol een review uit over de kwaliteit van het aardwetenschappelijke onderzoek in Fase 1A van het OPLA Programma.

Één van de conclusies van Groundcontrol over het aardwetenschappelijke onderzoek in Fase 1A van het OPLA Programma luidde, *op. cit.* Groundcontrol (1994, p. 37):

Naar de mening van Groundcontrol heeft het niet herkennen van relevante processen in het Kwartair in de OPLA-studies grote gevolgen gehad voor de uitkomsten van het OPLA-onderzoek.....

De CORA Commissie, opvolger van de OPLA Cie, gaf in haar kaderplan aan dat gesignaleerde aardwetenschappelijke onzekerheden betreffende berging in zout dienden te worden weggenomen. Zij doelde hier in het bijzonder op onzekerheden in de resultaten van het OPLA Programma.

Het project AAK – Aanvullende Analyse zoutproblematiek – sluit in haar doelstelling hier direct op aan. Deze is namelijk gericht op het vaststellen dan wel wegnemen van een aantal onzekerheden in de kennis van natuurlijke processen die de zoutbarrière en de omringende geosfeer kunnen beïnvloeden. Deze processen spelen een rol in de groep van ‘normale evolutie’ scenario’s; vooral de processen zoutoplossing en zoutstijging in zowel het subrosie/diapirisme-scenario als het glaciatie-scenario.

De discussie die in het rapport van Groundcontrol (1994) gevoerd werd, speelde vooral op de volgende terreinen: formulering van de stijg- en subrosiesnelheid van zout, alternatieve hypothesen voor de verklaring van zoutstijging, classificatie van caprock-typen, halokinese en interne zoutstructuur en de gevolgen van landijsbedekking op de stabiliteit van zoutstructuren (vorming en sluiting van holtes in de caprock en CaSO_4 -omzetting in de caprock).

De onderwerpen betreffende caprock-classificatie en de relatie tussen halokinese en interne zoutstructuur zijn in het project AAK om praktische redenen buiten beschouwing gelaten.

De discussiepunten die in het project AAK nader onderzocht zijn, zijn in twee categorieën onder te verdelen:

A. Processen in de caprock

- Door druk- en temperatuurfluctuaties in de top van relatief dicht onder het maaiveld gelegen zoutstructuren zou het *evenwicht gips <-> anhydriet* in de caprock verstoord kunnen worden en leiden tot volumeverandering en vervorming van de caprock. Groundcontrol heeft als hypothese gesteld dat gips-caprock in een open systeem onder ijsbedekking naar alle waarschijnlijkheid zal transformeren naar anhydriet dat een kleiner volume inneemt dan gips. Gipsificatie zou dan een proces zijn dat na de laatste ijsbedekking in Nederland optreedt.
Aangezien het optreden van zo'n evenwichtsverstoring tot nu toe niet in de berekeningen is meegenomen, verdient het aanbeveling om het mogelijke optreden van dit verschijnsel in verleden en toekomst nader te onderzoeken.
- De rol van holtevorming in de caprock tijdens interglacialen en holtesluiting gedurende ijstijden onder invloed van ijsbelasting. Groundcontrol neemt als hypothese aan dat holten die zich op plusminus 200 meter onder het maaiveld in de caprock bevinden, zullen worden dichtgedrukt wanneer zich hierboven nog eens 700 tot 1300 meter ijs ligt. Het is belangrijk om te onderzoeken of holten inderdaad worden dichtgedrukt. Dit zou een beter inzicht kunnen geven in de ontwikkeling van natuurlijke cavernen en het tijdsbestek waarin dit gebeurt. Als voorbeeld wordt genomen de holte die is aangetroffen in de caprock van de zoutpijler Zuidwending.

B. Zoutbeweging

- Bij de berekeningsmethodiek bestaat verschil van inzicht in de te gebruiken formules voor de berekening van de uitwendige en inwendige stijgsnelheid en de subsosiesnelheid. Onder meer de rol van holtevorming en -sluiting in de caprock speelt een rol in deze discussie (zie ook categorie A).
Groundcontrol heeft voor het beschrijven van de stijgsnelheid van een zoutpijler in Nederland een formule gebruikt waarin naast de subsosiesnelheid, en de interne zoutstijgsnelheid ook de caprock-vormingsnelheid wordt ingebracht. Op deze wijze, zo geeft Groundcontrol aan, kunnen alle toekomstige relevante verplaatsingen/bewegingen van zoutstructuren worden geschetst. Dit is vooral belangrijk voor de diktes van het zoutschild en de caprock, die beiden belangrijke factoren zijn voor de locatiebepaling van een mijn.
- Wat betreft de relatief grote stijgsnelheid van de pijler Schoonlo vindt discussie plaats over de oorzaak waaraan dit fenomeen moet worden toegeschreven: halokinese versus overconsolidatie door ijsbelasting met 'thermal recovering' tijdens periode van opwarming na een ijstijd. Groundcontrol bracht de twee laatstgenoemde, tot dusverre nog onvoldoende beschouwde mechanismen in. Het is belangrijk te weten welke mechanismen

voor de zoutstijging verantwoordelijk zijn en daarmee mogelijk beperkt zijn tot een korte tijdspanne in het Kwartair. In dit rapport zullen door Groundcontrol en TNO-NITG deze hypothesen samen worden getoetst.

De discussiepunten zijn vooral aan het volgende rapport van Groundcontrol onttrokken:

- Groundcontrol (1994). Aut.: P. van der Gaag en E.J. Stenhuis. Discussie met betrekking tot de kwaliteit van het aardwetenschappelijk onderzoek in het kader van OPLA 1988 – 1993, 69 p.

Indien nodig is meer achtergrondinformatie uit de volgende rapporten van Groundcontrol gehaald:

- Groundcontrol (1993). Aut.: P. van der Gaag, M. Melkert en H.M. van der Poel. Caprock studies eindrapport, OPLA 93-70, 44 p.
- Groundcontrol (1992). Aut.: P. van der Gaag, M. Melkert en H. van der Poel. Caprock studies – Evaluatie van het ontstaan van caprock en de natuurlijke processen in caprock met betrekking tot de Nederlandse situatie, OPLA 92-14, 46 p.
- Groundcontrol (1989). Aut.: P. van der Gaag. Een evaluatie van aardwetenschappelijke aspecten van belang voor OPLA Fase 1, 63 p.

De presentatie en evaluatie van de discussiepunten zijn als volgt in dit rapport weergegeven. Elk onderwerp wordt vakinhoudelijk ingeleid, waarna het punt van discussie wordt toegelicht. Hierna vindt een evaluatie van het discussiepunt plaats, al dan niet gebruik makend van aanvullende informatie. Deze omvat ook aanvullende informatie die door Groundcontrol is geleverd naar aanleiding van de bespreking van het conceptrapport van het NITG (hoofdstukken 2 en 3). In hoofdstuk 4 worden in de vorm van conclusies en aanbevelingen de eventuele consequenties voor de veiligheidsstudie besproken. In het project is uitsluitend van openbaar beschikbare gegevens en kennis gebruik gemaakt.

2 Veranderingen in de caprock

Als de bovenzijde van een zoutstructuur in contact komt met onderverzadigd grond- of oppervlaktewater zal het goed oplosbare steenzout oplossen. Slechter oplosbare bestanddelen zoals anhydriet, kalk of klei blijven in de vorm van een kap op het nog niet opgeloste zout achter. Deze kap wordt aangeduid met de term 'caprock' of gipshoed, en wordt per definitie als onderdeel van de zoutstructuur beschouwd.

2.1 Effecten van CaSO_4 -omzetting

De accumulerende CaSO_4 -mineralen zijn niet stabiel door de veranderde temperatuur, druk en saliniteit. Afhankelijk van deze variabelen kan omzetting plaatsvinden tussen de twee mineralen anhydriet (zonder kristalwater) en gips (met kristalwater).

Door de omzetting van de ene kristalvorm in de andere verandert het gesteentevolume. Bij omzetting van anhydriet naar gips kan theoretisch een volumetoename van ca. 60% plaatsvinden. In de praktijk zal veel van de volumetoename geabsorbeerd worden door het dichtgroeien en rekristalliseren van aders.

Volumetoename betekent een extra lokaal drukveld in en om de zoutkoepel, terwijl volumevermindering kan leiden tot holtevorming in de caprock en instabiliteit in het afdekpakket boven de zoutstructuur.

Figuur 2.1 geeft de P-T condities aan voor de stabiliteit van gips en anhydriet, waaruit blijkt dat anhydriet stabiel is bij een hoge temperatuur (boven 50 °C), terwijl drukverschillen van minder belang zijn. De ontwerpen voor een berging van radioactief afval zijn geprojecteerd in een P-T bereik, waarin omzetting tussen anhydriet en gips kan plaatsvinden. Significante verschuivingen in de overgang gips-anhydriet worden veroorzaakt door grote veranderingen in de saliniteit. Dit is duidelijk in de temperatuur-saliniteit diagrammen (figuren 2.2. en 2.3). Het effect van saliniteit op de omzetting van gips naar anhydriet is groot in het dieptebereik 200 tot 600 m.

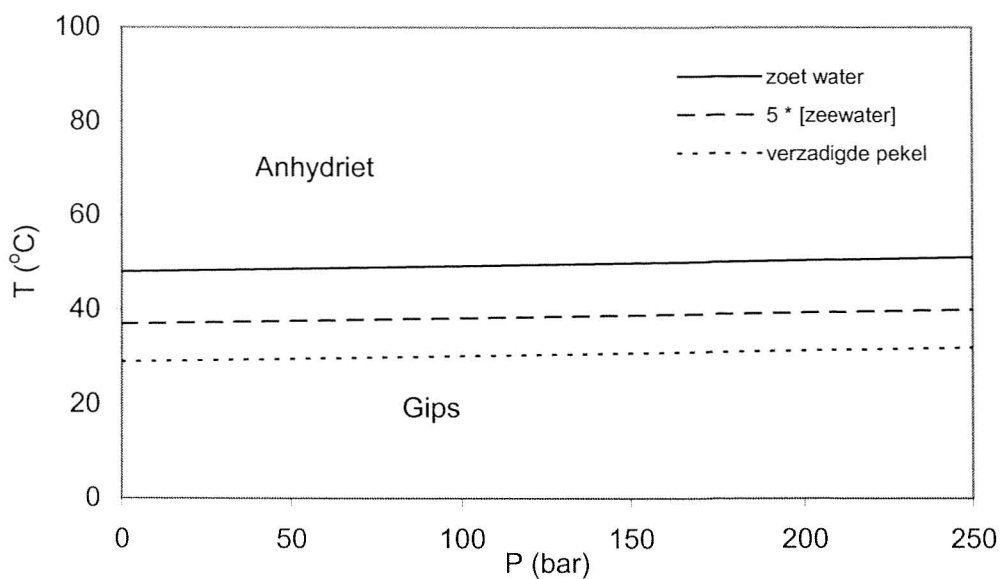
Pekelwater met hoge saliniteit kan ontstaan door subrosie langs het contact zout-caprock, de zoutspiegel. Door de verhoogde saliniteit kan dehydratie van gips plaatsvinden met neerslag van anhydriet. De daarmee gepaard gaande volumevermindering kan leiden tot het ontstaan van holtes, die op hun beurt tot instorting van de bovenliggende lagen kunnen voeren.

Door een verlaging van de saliniteit van het grondwater rondom de caprock kan gips worden gevormd ten koste van anhydriet. Toenemende druk kan leiden tot het ontstaan van barsten en aders in de caprock. Hoewel deze vrijwel onmiddellijk

zullen dichtgaan door 'annealing', zal niettemin in de periode dat ze openstaan, versneld transport door de caprock kunnen optreden.

Mochten grote temperatuurveranderingen door verval van radionucliden optreden dan is het mogelijk dat gips wordt omgezet in anhydriet.

Lokale veranderingen in de druk kunnen optreden door de stijging van de zoutstructuur en de additionele belasting van een ijskap. Het wordt niet waarschijnlijk geacht dat continentale geodynamische processen op een tijdschaal van enkele 10.000-en tot 100.000 jaar binnen Nederland tot een beduidende verandering in het temperatuur- en drukregime zullen leiden.



Figuur 2.1 De stabiliteitsvelden van gips en anhydriet als functie van de temperatuur, druk en saliniteit.

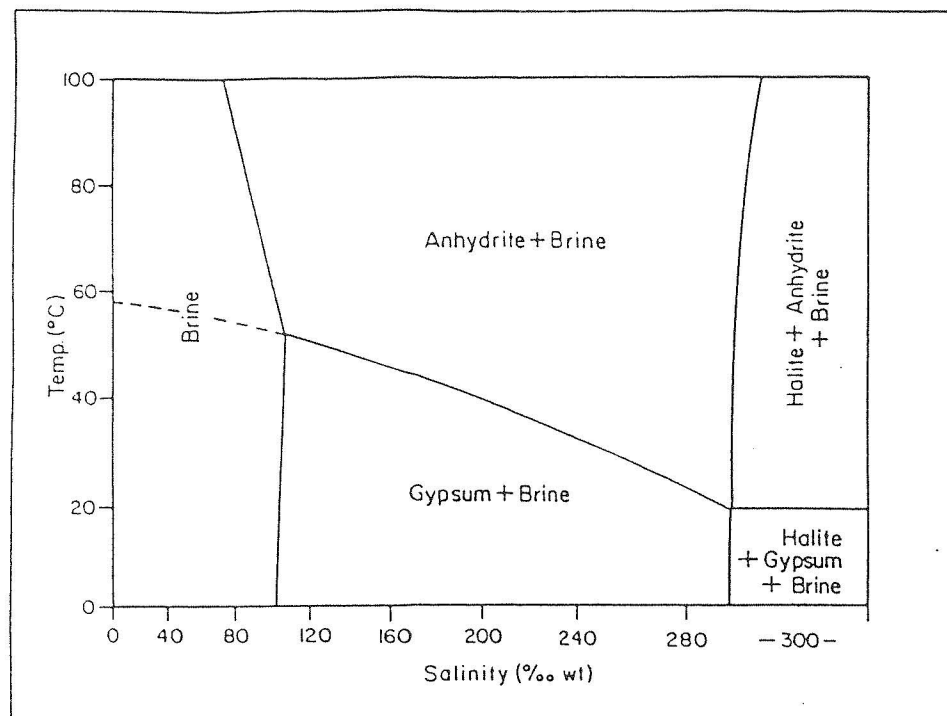
Discussiepunt

In de conclusies van het rapport van Groundcontrol (1994: p. 57, Conclusie 11) wordt gesteld dat *op. cit.*:

'Bij ijsbedekking zoals die in Nederland in het Saalien heeft plaatsgevonden, is het mogelijk dat caprocks die uit gips hebben bestaan, zijn getransformeerd naar anhydriet. In een open systeem transformeert gips onder belastingdruk immers snel tot anhydriet. Het is aannemelijk dat tijdens het ijs van het Saalien een aantal caprocks in Nederland naar anhydriet kunnen zijn getransformeerd. Omdat gips omgezet kan zijn in anhydriet, zou bij permafrostberekening van het ECN uitgegaan moeten worden van een anhydrietcaprock.

Wanneer tijdens een periode van ijsbedekking gips omgezet wordt naar anhydriet, wordt door volumevermindering de afstand verkleind tussen maaiveld en

steenzout; bodemdaling ten gevolge van dehydratie kan invloed hebben op de ontwikkeling van de geomorfologie gedurende een ijstijd. Ook deze afstandverkleining (door depressievorming) zou in de permafrostberekeningen moeten worden meegenomen. Welke voor invloed dit alles heeft op de geohydrologie is vooralsnog niet bekend.'

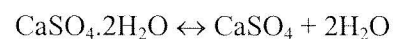


Figuur 2.2 De stabiliteitsvelden van gips, anhydriet en haliet als functie van de temperatuur en de saliniteit van het aanwezige (pek-)water (Dutton, 1987).

Evaluatie

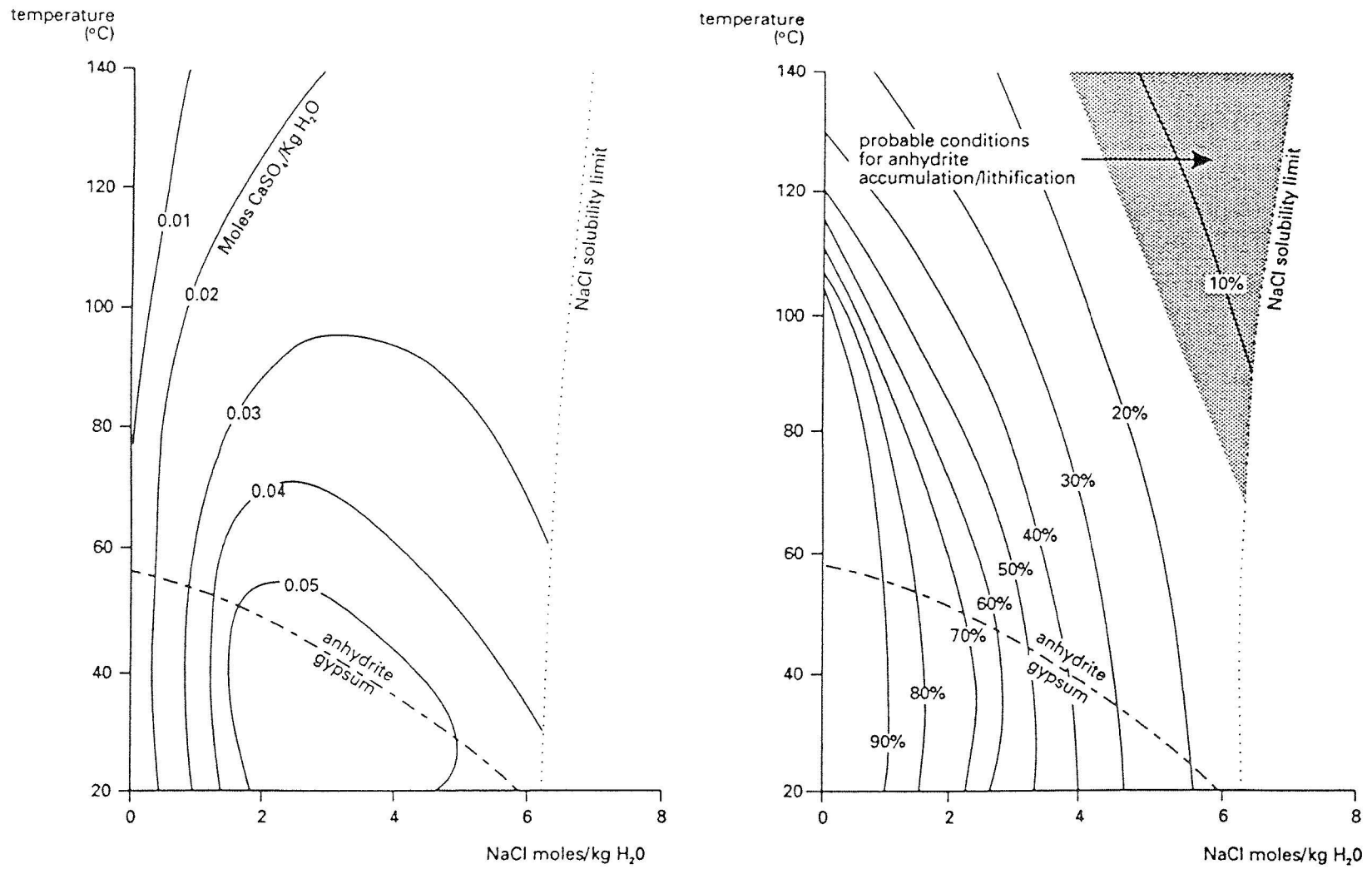
Een thermodynamische analyse van het gips-anhydriet systeem in een *gesloten* systeem laat het volgende zien (mond. meded. Schuiling, 1997):

De reactie van gips naar anhydriet luidt:



Bij 25 °C en 1 atmosfeer (standaardomstandigheden) geldt dat de Gibbs-energie van de reactie -1,2 kJ is, dus gips is stabiel t.o.v. anhydriet met water.

(Gebruikte gegevens: $G_{\text{gips}} = -1797,2$ kJ/mol, $G_{\text{anhydriet}} = -1321,7$ kJ/mol, $G_{\text{water}} = -237,15$ kJ/mol)

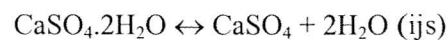


Figuur 2.3 De stabiliteitsvelden van anhydriet en gips als functie van de temperatuur en de saliniteit met de contouren van de oplosbaarheid van CaSO₄ (links) en het percentage CaSO₄ in oplossing (rechts) (Werner et al., 1988).

De verandering van de Gibbs-energie met de temperatuur is S (entropie), dus $\delta G/\delta T = -S$. De entropieën zijn: $s_{\text{gips}} = 194,14$ (J/mol·K), $s_{\text{anhydriet}} = 106,69$ en $s_{\text{water}} = 69,95$. De berekende S van de reactie is dus $+52,45$. Bij 0°C is dus de Gibbs-energie van de reactie $-1,2$ kJ - $(25 \cdot 0,05245$ kJ) = $-2,5$ kJ.

Omgekeerd, als we de temperatuur laten stijgen, zien we dat gips in evenwicht is met anhydriet en water bij ongeveer 45°C .

Bij het vriespunt van water is gips aanzienlijk stabielier dan anhydriet met water. Omdat bij 0°C water in evenwicht is met ijs, hebben ze bij die temperatuur per definitie dezelfde Gibbs-energie. Dus ook voor het evenwicht:



geldt dat de Gibbs-energie van reactie $-2,5$ kJ bedraagt.

Omdat de entropie van ijs aanzienlijk minder is dan die van water, moeten wij de verandering van de Gibbs-energie van de reactie met de temperatuur berekenen door de entropie van ijs in te vullen ($s_{\text{ijs}} = 47,95$). Als deze getallen worden ingevuld, dan is zichtbaar dat gips ook onder het vriespunt nog steeds stabielier is t.o.v. anhydriet met water. Bij -25°C is de $\delta G = -2,7$ kJ.

De conclusie is dat door afkoeling de reactie niet kan omkeren. Gips blijft stabiel.

De vraag blijft of de reactie kan omkeren door drukverhoging, veroorzaakt door landijsbedekking. De volumeverandering van de reactie is het volume van de stoffen rechts minus het volume van de stoffen links. Dat levert een volumevergroting op van $+7,39$ cm³. Daaruit kunnen wij concluderen dat drukverhoging zorgt voor een extra stabilisering van gips t.o.v. anhydriet met water. Omdat ijs een groter volume heeft dan water wordt deze volumevergroting voor de reactie gips \rightarrow anhydriet + ijs nog groter, nl. $+10,52$ cm³.

De conclusie uit de berekeningen voor een *gesloten* systeem is dat landijs geen anhydriet en water (of ijs) uit gips kan maken.

Toenemende saliniteit bij een vaste temperatuur kan leiden tot omzetting van gips in anhydriet. Bij de saliniteit rondom de meeste zoutstructuren in Nederland zal dit punt tijdens een ijstijd niet bereikt worden.

De gebruikte thermodynamische relaties gelden niet voor een *open* systeem. Het is niet uitgesloten dat gips in een open systeem door een ijsbelasting wordt omgezet in anhydriet. Anhydriet neemt een kleiner volume in dan gips. Tegelijkertijd met een ijsbelasting neemt de temperatuur af en kan de infiltratie van smeltwater tot een verlaging van de saliniteit leiden. Hoe drukverhoging in combinatie met een temperatuurverlaging uitwerkt op gips in een open systeem is niet bekend.

Groundcontrol is van mening dat caprocks in de Nederlandse ondergrond vóór het optreden van de eerste ijsbedekking in het Kwartair uit gips bestonden. Toen het ijsfront over Nederland kwam, werd gips in een open systeem in anhydriet omgezet door de drukverhoging die de ijslast in de ondergrond teweegbracht. De caprocks van de ondiepe pijlers in Nederland bevonden zich op een diepte van 200 tot 400 meter onder het maaiveld. Een ijskap van ongeveer 1300 meter dik zal zo'n 120 bar aan extra druk op een zoutstructuur hebben uitgeoefend. Omdat bij het naderen van het ijsfront de oorspronkelijke druk daarom van 20 tot 40 bar met 120 bar moest zijn opgelopen, en een grote drukgradiënt over een korte afstand was ontstaan, neemt Groundcontrol aan dat het systeem open was, en anhydriet onder deze condities dus stabiel was dan gips. Huidige gipsvoorkomens in Nederlandse caprocks, zoals bij Zuidwending zouden dan na de laatste ijsbedekking ontstaan zijn, aldus Groundcontrol.

Deze theorie onderbouwt Groundcontrol door te verwijzen naar grote anhydriet diapieren in arctische gebieden die nu niet door permanent ijs worden bedekt. Dit anhydriet was oorspronkelijk gips (Van Berkel, 1986). Groundcontrol redeneert dat op grond van de hoge soortelijke massa van anhydriet, de enige verklaring kan zijn dat deze diapieren als gips op een diepte tot 700 meter aanwezig zijn geweest en als gipsdiapieren omhooggekomen zijn. Dat nu alleen anhydriet dagzoomt, aldus Groundcontrol, is te wijten aan het feit dat hier 1000 meter ijs op heeft gelegen, zodat het gips anhydriet is geworden. Ook onderzoeken van Müller & Briegel (1978), alsmede pers. meded. van Talbot (Groundcontrol, 2000) wijzen op het feit dat onder grote druk elk mineraal tenslotte in een open systeem haar kleinste volume in zal nemen.

2.2 Vorming en sluiting van oplosloten

Zout (chloriden), anhydriet en gips (sulfaten) en kalk (carbonaten), lossen in afnemende mate op indien zij in contact komen met niet verzadigd grondwater. Hierdoor ontstaan holruimten aan de rand van of in deze gesteentevoorkomens. Groundcontrol noemt als voorbeelden van caprocks met oplosloten de zoutpijler Zuidwending in Nederland en de pijlers Benthe en Husum in Duitsland. Door het al of niet gelijktijdig instorten of inzakken van de afdeklagen boven deze holruimten kunnen uiteindelijk verzakkingen aan het maaiveld optreden. Dergelijke oppervlakteverschijnselen manifesteren zich in horizontale zin op een schaal van enkele meters tot vele honderden meters.

In de definitie van de oplosverschijnselen en gerelateerde oppervlaktefenomenen wordt hier in eerste instantie de opvatting van Herrmann en Hofrichter gevolgd, zoals deze is verwoord in Hofrichter (1967), Herrmann & Hofrichter (1973) en Hofrichter (1985). Betreffende de naamgeving en definitie van oplosprocessen is voorts gebruik gemaakt van de publicatie van Hohm (1979).

Herrmann en Hofrichter (Hofrichter, 1967; Herrmann & Hofrichter, 1973) maken een basaal onderscheid tussen twee vormen van oplossing, te weten:

- subrosie en
- verkarsting.

Subrosie

Subrosie kenmerkt zich door een min of meer gelijkmatige, niet-selectieve oplossing van gesteenten langs vlakke, bij zoutstructuren meestal sub-horizontale oppervlakken. Deze vorm van oplossing doet zich onder de huidige hydrodynamische condities vooral voor bij het gemakkelijk oplosbare steenzout. De slechte tot niet doorlatende eigenschappen en het niet of nauwelijks aanwezig zijn van spleten en diaklazen in dit gesteente maken het gewoonlijk onmogelijk dat oplossing lokaal relatief diep in het steenzout inwerken kan.

De min of meer vlakke bovenzijde waarlangs het steenzout in oplossing gaat heet zoutspiegel ("Salzspiegel") als het vlak sub-horizontaal is en wordt "Salzhang" genoemd als het vlak een helling vertoont. Een "Salzhang" wordt gewoonlijk aangetroffen in gebieden waar gelaagd steenzout aan oplossing onderhevig is.

Indien subrosie van het steenzout niet in voldoende mate gecompenseerd wordt door de aanvoer van nieuw steenzout uit de diepere ondergrond dan zal dit leiden tot de vorming van holruimten. Dit zijn doorgaans vlakke, horizontaal uitgestrekte ruimten boven de zoutspiegel die tot 1 m hoog kunnen worden (Molek, 1976). Door daaropvolgende inzakkingen worden de holruimten weer dichtgedrukt. Aan het maaiveld kunnen uiteindelijk ondiepe, brede depressies ontstaan, een subrosie-inzinking ("Subrosionssenke").

Bij zoutstructuren kunnen de horizontale afmetingen van subrosie-inzinkingen ("Subrosionssenke") oplopen tot de omvang van de structuur waarboven de depressie zich bevindt. De ligging en vorm van subrosie-inzinkingen kan gedeeltelijk bepaald zijn door reeds aanwezige slenken ("Scheitelgraben") boven de zoutstructuur (bijv. de inzinking boven de pijler Segeberg; Teichmüller, 1948; Ross, 1985).

Op basis van oppervlaktewaarnemingen boven Oost-Duitse zoutstructuren onderscheidt Hurtig (1965) binnen de subrosie-inzinkingen ("Auslaugungswanne", "Einsenkungskessel") twee typen: inzinkingen met en inzinkingen zonder randopheffing ("randlicher Aufwölbungszone"). Een voorbeeld van een subrosie-inzinking met randopheffing is aanwezig boven de pijler Rambow, de oostelijke voortzetting van de pijler Gorleben. Een voorbeeld van een subrosie-inzinking zonder randopheffing is de Arendsee boven de gelijknamige pijler.

Al of niet gesuperponeerd op de grootschalige subrosie-inzinkingen kunnen kleinere tot enkele honderden meters brede afvoerloze depressies aanwezig zijn,

die zijn ontstaan door lokaal versterkte subrosie. Deze zijn onder meer beschreven voor de pijler Benthe (Herrmann & Hofrichter, 1973) en voor de pijler Salzgitter-Lebenstedt (Preul, 1968; fig. 13). Een bijzonder voorbeeld vormt de depressie boven de pijler Bodenteich (Seewiesen; Hofrichter, 1985; pers. meded. Meyer, 1990; Brüggemann: Diplomarbeit). Alhoewel deze inzinking zich als een vlakke depressie in het huidige landschap manifesteert, blijken de bases van bepaalde Boven-Kwartaire horizons een zeer onregelmatig verloop te hebben die lijken te wijzen op lokaal versterkte inzinking. Gezien de duidelijke prononcering van deze lokale verschijnselen is verkarsting naast de optredende subrosie op voorhand niet uit te sluiten.

Zoals uit de waarnemingen van Molek blijkt, treden in de inzinkingen naast de verticale ook horizontale bewegingen op in de vorm van verschuivingen, verkortingen en uitrekkingen. Dergelijke verschijnselen zijn bekend voor de subrosie-inzinking boven de pijler Lüneburg (Anonymus, 1973). Hier is de inzinking, naast natuurlijke processen, sterk beïnvloed door de winning van pek, waardoor zeer hoge dalingssnelheden bereikt kunnen worden.

Onder natuurlijke omstandigheden lopen de dalingen boven zoutstructuren die het gevolg zijn van subrosie, uiteen van gemiddeld enkele duizendsten mm/jaar tot enkele mm/jaar. De hoge snelheden kunnen optreden als het steenzout in direct contact staat met de ondiepe aquifer. Vele van de in de literatuur beschreven subrosie-inzinkingen vertoonden duidelijke zakking in de interglaciale perioden Eemien en Holoceen.

Verkarsting

Deze vorm van oplossing ontleent zijn naam aan het Karst gebied in voormalig Joegoslavië, waar de oplossing van kalk het karakter van het landschap bepaald heeft (naakte karst). Het type verkarsting dat hier behandeld wordt, richt zich op de oplossing van gips, anhydriet of kalk onder een bedekking van niet of nagenoeg niet oplosbare gesteenten of grond (bedekte karst, onderaardse karst).

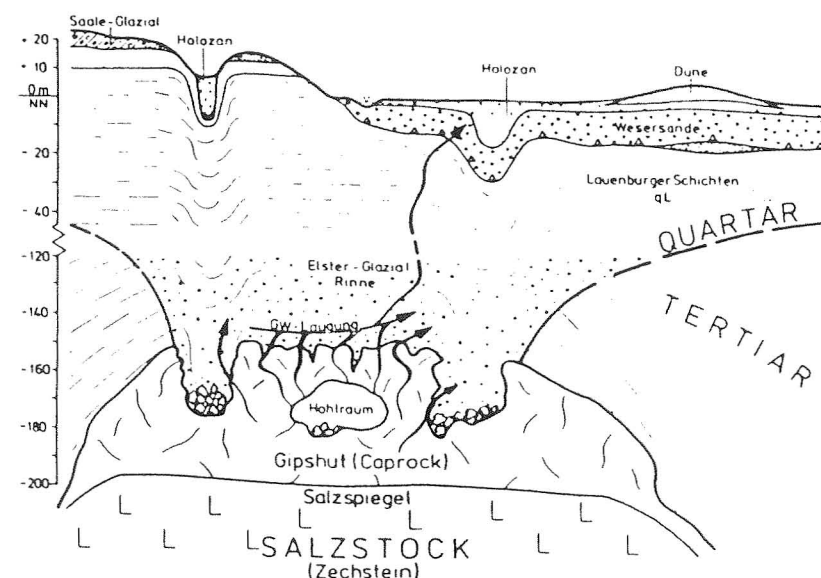
Verkarsting betreft in tegenstelling tot subrosie het lokaal, selectief oplossen van materiaal langs spleten, diaklazen en pijpen, overwegend in anhydriet, gips en kalk. De brosse eigenschappen van deze gesteenten bevorderen het ontstaan van spleten en diaklazen, waarlangs deze wijze van preferent oplossen plaatsvindt. Door verkarsting ontstaan karstholruimten die vrij beperkte horizontale afmetingen hebben. Door instorting (of inzinking afhankelijk van de mechanische eigenschappen van het afdekpakket) van de holruimten ontstaan instortingdolinen ("Erdfälle", "sinkholes"; figuur 2.4). Deze inzinkingen kunnen uiteindelijk tot aan het maaiveld doorwerken, waar ze als pijp-, trechter- of schotelvormige depressies herkenbaar zijn. Instortingdolinen kunnen, afhankelijk van de diepte van de holruimte en de aard van het afdekpakket, binnen zeer korte tijd worden gevormd

en hoeven bij een zoutstructuur niet gecorreleerd te zijn met de daling tengevolge van de subsosie van het steenzout.

De vorm van de doline wordt beïnvloed door de mechanische eigenschappen van de ondergrond en de ouderdom van de inzakking. In het algemeen ligt de diameter van instortingsdolinen tussen enkele meters en 100 m; soms wordt een diameter van enkele honderden meters bereikt.

De vorming van een instortingsdoline kan een vrij plotselinge gebeurtenis zijn indien de holruimte zich op geringe diepte bevindt en afgedekt wordt door brosse gesteenten. Bij de instorting van karstholruimten onder een relatief dik pakket van niet geconsolideerd materiaal kan de zakking aan het maaiveld meer gradueel zijn (Ortlam & Schnier, 1981).

Bij het omhoog breken dan wel instorten van de karstholruimte wordt haar volume steeds kleiner door de afname van de pakking van het materiaal dat de holruimte opvult. De verhouding tussen het volume van het opvulmateriaal en het volume van het oorspronkelijk gesteente bedraagt ongeveer 1,3 : 1 (Reuter, 1983). De primaire diameter van een instortingsdoline is afhankelijk van het volume van de primaire karstholruimte en de mechanische eigenschappen van het afdekkpakket (Reuter, 1983). De uiteindelijke diameter wordt mede bepaald door de effecten van erosie en sedimentatie. Na verloop van tijd kunnen deze processen de effecten van de instorting of inzakking volledig gecompenseerd hebben, zodat er dan sprake is van een fossiele instortingsdoline.



Figuur 2.4 Schematische geologische doorsnede van de ondergrond boven de pijler Lesum bij Bremen (Ortlam & Schnier, 1981).

Boven zoutstructuren in West-Duitsland varieert de diameter van instortingsdolinen tussen 5 en 200 m. De diepte aan het maaiveld loopt uiteen van enkele meters tot 15 m. De hellingshoek van de zijwanden kan tot 45° of meer oplopen, afhankelijk van de ouderdom van de depressie en de aard van het afdeklagen.

Bij zoutstructuren worden karstverschijnselen meestal gekoppeld aan oplossing van de caprock zelf (Herrmann & Hofrichter, 1973).

De ruimtelijke verdeling van instortingsdolinen lijkt meestal gekoppeld te zijn aan bepaalde lineamenten. Dit hoeft natuurlijk geen verbazing daar verkarsting gewoonlijk optreedt langs diaklazen en dergelijke. Karstverschijnselen komen soms geconcentreerd voor in de randzone van de gipshoed, zoals bij de pijler Lüneburg goed te zien is (Niedermayer, 1957; Herrmann & Hofrichter, 1973). Door diaklazen versneden Mesozoïsche gesteenten zouden hier in direct contact staan met de gipshoed, waardoor de toevoer van grondwater en daardoor de oplossing van de sulfaten versterkt wordt. Aan de randen van subrosie-inzinkingen kunnen in de afdekkende lagen rekspleten en breuken ontstaan waarlangs grondwater naar de gipshoed kan stromen. Dit bevordert het optreden van verkarsting in deze zone (zie ook Molek, 1976; Anonymus, 1973). Voorts blijken instortingsdolinen geconcentreerd voor te komen in zones om anhydriet-/gipslichamen die uit de top van het steenzout prikken ("Härtlinge"). Voorbeelden hiervan zijn bekend van de pijler Segeberg (Ross, 1985).

Bij de zoutpijler Stade (beïnvloeding door pekewinning) zijn instortingsdolinen het meest frequent in de gebieden waar de dikke gipshoed in direct contact staat met de ondiepe aquifer (Hofrichter, 1967). Daar waar de gipshoed afgedekt wordt door slecht doorlatende resterende gesteenten uit het Haselgebirge (Rotliegend) zijn geen instortingsdolinen aanwezig.

Hohm (1979) bestudeerde in detail de verbreiding en vorm van instortingsdolinen aan de noordwestelijke rand van de Harz, waar in de ondiepe ondergrond laagpakketten van gips, anhydriet en kalk aanwezig zijn. De diameter (ϕ) van de aldaar waargenomen dolinen varieert tussen 4 en 320 m, de diepte (D) ligt tussen 1 en 20 m en de hellingshoek van de zijwanden vertoont een spreiding tussen 5° en 90°.

Hij maakte een morfologisch onderscheid in de vorm van de dolinen met behulp van de vormfactor ϕ/D :

- < 2 pijpvormig,
- $\geq 2 \wedge < 10$ trechtvormig,
- ≥ 10 schotelvormig.

In de vorm van de omtrek van de dolinen onderscheidde hij rond, ovaal, niervormig, langgerekt en onregelmatig.

Eenduidigheid van de begrippen subrosie en verkarsting

De hiervoor gegeven beschrijving van de processen subrosie en verkarsting is enigszins gegeneraliseerd. In een zoutpijler kan de door subrosie ontstane zoutspiegel lokaal vlakke verdiepingen vertonen die zijn ontstaan door de plaatselijk versterkte toevoer van grondwater langs spleten en diaklazen in het hoedgesteente. Diep worden deze depressies in de zoutspiegel doorgaans niet, omdat de pekkel op een bepaald moment in de depressie stagneert en de oplossing van zout tot een einde komt. Lokaal voorkomende dunne lagen zeer goed oplosbare K-Mg zouten die bij de zoutspiegel worden aangesneden kunnen preferent oplossen, waardoor karstachtige verschijnselen ontstaan (Bornemann & Fischbeck, 1986; BGR, 1987). Verkarsting van steenzout is ook beschreven uit gebieden waar gelaagd steenzout aan oplossing onderhevig is (Herrmann & Hofrichter, 1973; Molek, 1976; Laemmlen et al., 1979). Omgekeerd kan gips of anhydriet aan subrosie onderhevig zijn, wat tot uiting komt in de vorming van een gipsspiegel (Hohm, 1979).

Uit onderzoek aan holruimten in kalken komt naar voren dat het ontstaan van een continue doorgang zo'n 10.000 jaar in beslag kan nemen en dat de ontwikkeling van een volledig grotsysteem nogmaals 10^4 tot 10^6 jaar duurt (Harder, internet).

Discussiepunt

In de conclusies van het rapport van Groundcontrol (1994: p. 57, Conclusie 20a) wordt gesteld dat *op. cit.*:

.... Het is aannemelijk dat de caprock onder het ijs van het Saalien uit calciumsulfaat (waarschijnlijk anhydriet) bestond en geen cavernes herbergde. Het feit dat nu cavernes aanwezig zijn en gipszand wordt afgezet zou kunnen wijzen op gipsificatie en mogelijk afvoer van calciumsulfaat. Subrosie van caprock zou derhalve moeten worden meegenomen in het model.

Mondeling deelde Groundcontrol mee (19 november 1993) dat het hoogstwaarschijnlijk is dat holtes in de caprock gedurende een ijsbedekking door de ijsdruk worden dichtgedrukt en dat verkarsting waarschijnlijker is tijdens relatief warme perioden gedurende een glaciaal.

Op pagina 30, paragraaf 6.2 van het rapport van Groundcontrol uit 1992 staat *op. cit.*:

Omstandigheden die in de geologisch nabije toekomst zouden leiden tot het op grote schaal optreden van gipskarst in caprock in Nederland lijken in eerste instantie niet aanwezig. Mogelijk zou in een toekomstige ijstijd lokaal een situatie

kunnen ontstaan die tot hoge stromingssnelheden aanleiding geven. Het ontstaan van relatief hoge stromingssnelheden op zekere diepte, onder een permafrostlichaam, is door Glasbergen (1990) beschreven.

Evaluatie

Het is evident dat sulfaten oplossen indien zij in contact staan met onderverzadigd grondwater. Daardoor kunnen holruimten ontstaan, die vervolgens weer worden dichtgedrukt.

Over de relatie van oplossing van de caprock met het optreden van glaciale en interglaciale perioden in het Kwartair is geen eenduidigheid te geven. Oplossing wordt versterkt indien zoet water met enige snelheid langs voorkomens van anhydriet, gips of steenzout stroomt. Dit treedt vooral op in situaties waarbij zoet water boven ondiepe zoutvoorkomens infiltreert. Een dergelijke situatie kan zich zowel tijdens een interglaciaal als tijdens een glaciaal met landijsbedekking voordoen. Hier zijn aanwijzingen voor, die afkomstig zijn uit zowel veldwaarnemingen als modelstudies (zie paragraaf 2.2/Subrosie; Boulton & Curle, 1997; Bornemann & Fischbeck, 1986; Oostrom et al., 1992; Wildenborg et al., 2000).

Door oplossing nemen de porositeit en de permeabiliteit van de caprock toe. Deze verhoging van de permeabiliteit is een belangrijk gegeven voor de veiligheidsstudie. Kwantificering van de verhoogde permeabiliteit is zonder uitgebreide locatiespecifieke veldgegevens en analyse lastig te geven en valt buiten het raamwerk van deze studie. Groundcontrol stelt terecht dat caprocks op de aanwezigheid van holruimten moeten worden onderzocht.

2.3 Slotbeschouwing van caprock-processen

Studies van het bureau Groundcontrol geven aanleiding om rekening te houden met tijdelijke variaties in de vorming van de caprock.

De landijsbedekking die in ons land tijdens de voorlaatste ijstijd (de zogenaamde Saalien ijstijd, die in de periode tussen 100.000 en 200.000 jaar geleden heerste) heeft het noordelijke deel van ons land, tot ongeveer de lijn Nijmegen-Haarlem onder een landijsgletsjer gebracht die in de noordelijke provincies een dikte van vele honderden meters bereikte. Bovendien was in die tijd de bodem tot vele tientallen meters, mogelijke zelfs tot meer dan 100 meter, diepte bevroren. Het ligt voor de hand te veronderstellen dat deze landijsbedekking invloed had op het grondwater-regime door productie van smeltwater, alsook door de stagnering van de waterhuishouding in de bovenste 100 meter van de watervoerende gesteentelagen door bevroering.

Wijzigingen in het grondwaterregime kunnen van invloed zijn op de caprock vorming. De caprock ontstaat doordat oplosbare zouten langs de randen van de zoutstructuur worden opgelost en afgevoerd terwijl onoplosbaar componenten achterblijven. Dit verschijnsel treedt het sterkst op aan de top van de zoutstructuur waar in de regel de grondwaterstroom het sterkst is. Wanneer door de afdekkende permafrost het grondwaterregime zich voor een betrekkelijk lange periode van een aantal tienduizenden jaren wijzigt, zowel qua stromingspatroon, stromingsintensiteit en wellicht ook qua chemische samenstelling, zal dit van invloed zijn op de aard en omvang van de caprock vorming. Daarbij gaat het weliswaar om een tijdelijk intermezzo in de ontwikkeling van de zoutstructuur op de lange termijn.

3 Stijging van zoutstructuren

3.1 Methodiek voor de berekening van de stijgsnelheid

Door de Rijks Geologische Dienst (1990; 1993) is een methode ontwikkeld om stijgsnelheden van zoutstructuren te berekenen op basis van diktevariaties in de laagpakketten die het zout afdekken. Daarbij is gebruik gemaakt van een aantal sleutelpublicaties op dit gebied (Trusheim, 1957; Seni & Jackson, 1983; Rühberg, 1976; Sørensen, 1986; Petersen, 1991).

Om de berekeningen door te voeren zijn een aantal voorwaarden en aannamen gesteld. Deze worden in de RGD-rapporten uit 1990 en 1993 uitgebreid behandeld.

De ontwikkelde berekeningsmethode is gebaseerd op het volgende concept. Door de beweging van het steenzout in de diepe ondergrond worden, afhankelijk van de intensiteit van de zoutbeweging, de erboven liggende laagpakketten vervormd. Boven de stijgende zoutwelling worden de lagen opgeheven, terwijl in de gebieden waar het steenzout wegvloeit naar de zoutstructuur toe, de afdekkende lagen juist een dalende beweging ondergaan. Sedimenten, die gelijktijdig met de beweging van het steenzout worden gevormd zullen boven de zoutstructuur als relatief dunne pakketten worden afgezet en in de zoutdepletiegebieden als relatief dikke lagen achterblijven. De ontstaansgeschiedenis van de zoutwelling en de kwantificering van de zoutbeweging zijn dus af te leiden uit de eigenschappen van het afdekkende pakket en van het steenzout.

Een belangrijke rol bij de kwantificering van stijgsnelheden speelt de volumereguleerder van Trusheim (1957). Deze houdt in dat het volume aan steenzout dat in de welling geaccumuleerd, gesubrodeerd of geërodeerd is, in elke fase van de beweging van het steenzout overeenkomt met het extra volume aan sediment in de zoutdepletiegebieden, die steenzout aan de zoutwelling hebben geleverd (excess volume, overschotvolume). Sørensen (1986) liet zien dat het berekende overschotvolume kan afwijken van het netto volume steenzout, dat naar de zoutstructuur verplaatst is.

Rühberg (1976) werkte als één van de eersten een praktisch bruikbare methode uit om zoutbeweging te kwantificeren op basis van het overschotvolume en paste deze toe op een groep zoutstructuren in Oost-Duitsland. Seni & Jackson (1983) werkten verschillende methoden uit om de stijgsnelheden van zoutstructuren te berekenen en pasten deze toe op de pijlers in de Oost-Texas diapierprovincie. Zij gaven daarbij duidelijk aan, aan welke randvoorwaarden moest zijn voldaan, voordat de berekeningen uitgevoerd konden worden.

In de methode die de Rijks geologische Dienst gebruikte, werden de volgende begrippen gehanteerd:

- Uitwendige stijgsnelheid (v_u): Stijgsnelheid van de bovenzijde van de zoutstructuur inclusief caprock ten opzichte van de steenzoutmoederlaag.
- Subrosiesnelheid (v_s): Oplossnelheid van het steenzout aan de bovenzijde van de zoutstructuur.
- Inwendige stijgsnelheid (v_i): Stijgsnelheid van een steenzoutmassa inclusief slecht-oplosbare bestanddelen in de zoutstructuur ten opzichte van de steenzoutmoederlaag.

De berekende snelheden zijn gemiddelden over geologische tijd en plaats.

In formulevorm hangen deze begrippen op de volgende eenvoudige wijze samen:

$$v_i = v_u + v_s$$

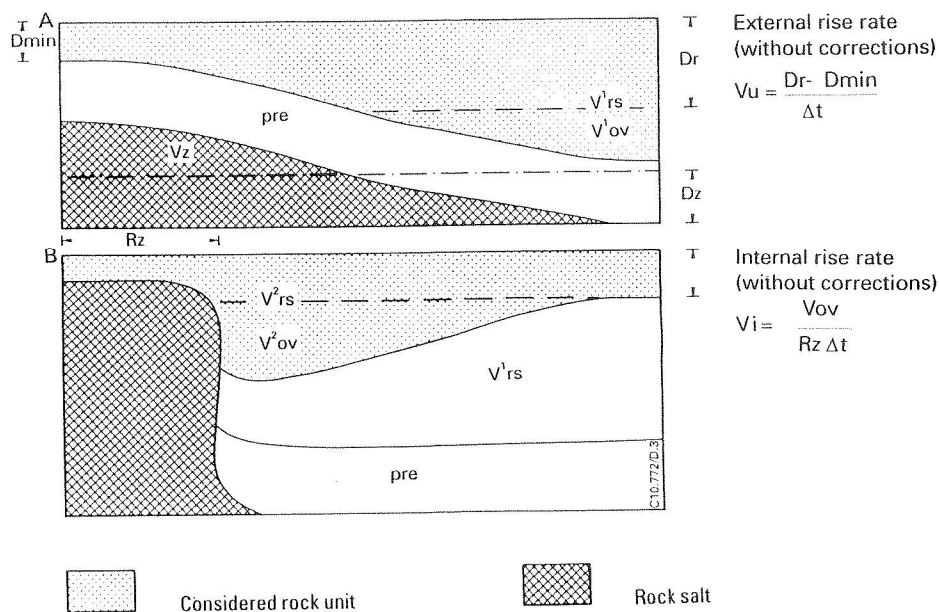
Deze formule gaat er vanuit dat de slecht-oplosbare bestanddelen in het steenzout worden opgenomen in de caprock.

Methode op basis van dikte laagpakket boven zoutstructuur

Het verschil tussen de dikte van een laagpakket boven een zoutstructuur en de corresponderende regionale dikte is een maat voor de uitwendige stijging van de betreffende structuur tijdens de afzetting van het pakket (figuur 3.1). De stijging van de top van de zoutstructuur - dit is dus inclusief caprock - wordt berekend ten opzichte van het regionale niveau van de bovenzijde van het Zechstein. Voordat de uitwendige stijgsnelheid kan worden berekend dienen correcties voor compactie-effecten plaats te vinden.

Methode op basis van dikte laagpakket in zoutdepletiegebied

Het verschil tussen de dikte van een laagpakket in een zoutdepletiegebied en de corresponderende regionale dikte is een ruwe maat voor de hoeveelheid steenzout, die naar de zoutstructuur verplaatst is (figuur 3.1). Voordat het dikteverschil kan worden bepaald dient de diktekaart van het beschouwde laagpakket gecorrigeerd te worden voor compactie-effecten.



- V_z = volume of salt structure
- R_z = size of horizontal cross-section of salt structure
- pre = sequence deposited before salt movement
- D_z = regional thickness of rock salt
- D_z = regional thickness of sedimentary sequence
- D_{min} = minimum thickness of sedimentary sequence
- V_{rs}^1 = volume of sequence in primary rim syncline
- V_{rs}^2 = volume of sequence in secondary rim syncline
- V_{ov}^1 = excess volume in primary rim syncline
- V_{ov}^2 = excess volume in secondary rim syncline
- v_u = average external rise rate
- v_i = average internal rise rate
- Δt = duration of sedimentation

Figuur 3.1 Methodiek voor de berekening van stijgsnelheden op basis van diktevariatië in het afdekpakket.

Discussiepunten

In de review van het aardwetenschappelijke onderzoek in Fase 1A van het OPLA Programma, constateerde Groundcontrol (1994) het volgende (op. cit. conclusie 3a op p. 56):

Het verband tussen GIS {lees gemiddelde inwendige stijgsnelheid}, GUS {lees gemiddelde uitwendige stijgsnelheid} en de gemiddelde snelheid waarmee het steenzout oplost (de subrosiesnelheid) wordt in de OPLA-studies uitgedrukt in de formule $GIS = GUS + SUB$. Deze formule is onvolledig, omdat de caprockvormingsnelheid wordt weggelaten....

Dit citaat grijpt terug op een rapportage van Groundcontrol uit 1989, waarin onder meer het volgende gesteld wordt (*op.cit.* Groundcontrol, 1989: p. 38):

Het weglaten van de caprockvormingsnelheid uit de bij OPLA gebruikte vergelijking (1) kan dan ook tot ernstige discrepanties leiden daar de component caprockvorming is weggelaten.... Voor een wetenschappelijke benadering moeten we dan ook de verbeterde versie laten prevaleren.

Vergelijking 2: inwendige snelh (a) = uitwendige snelh (b) + subrosiesnelheid (c) – caprockvormingsnelheid (d).

In het rapport van Groundcontrol uit 1993 wordt de bovenstaande vergelijking voor specifieke condities aangepast (*op. cit.* Groundcontrol, 1993: Appendix I, p. 41):

Wanneer subrosie sneller gaat dan opwaartse zoutvloeï plus caprockvormingsnelheid, maar de uitwendige snelheid 0 is, ontstaat een ruimte tussen het steenzout en het bovenliggend gesteente. Dan kan de volgende formule gehanteerd worden:

cavernevormingsnelheid ca = subrosiesnelheid s – caprockvormingsnelheid c – inwendige stijgsnelheid i

Op basis van deze aangepaste formulering stelt Groundcontrol (1994, *op. cit.*: p. 60, conclusie 20:

Wanneer subrosie plaatsvindt zonder compensatie door opwaartse zoutvloeï kan bij langzame subrosie, plastische deformatie aan het maaiveld plaatsvinden, bij snelle subrosie instortingen en verzakkingen. Beschrijving van dit proces is niet mogelijk met de formule van OPLA ($GIS = GUS + SUB$). De cavernevormingsformule van Groundcontrol 1993 zou bij het beschrijven van subrosie zonder compenserende zoutvloeï moeten worden gebruikt.

Over de berekening van de subrosiesnelheid stelt Groundcontrol tenslotte (*op. cit.* 1994, p. 56, conclusie 4):

Het berekenen van de gemiddelde subrosiesnelheden met behulp van het door OPLA gebruikte model behoeft aanpassing, daar subrosie van caprock en cavernevorming niet zijn meegenomen.....

Evaluatie

In de navolgende evaluatie gaan wij er vanuit dat de definities van de gebruikte parameters voor de in- en uitwendige stijgsnelheid en de subrosiesnelheid door Groundcontrol gelijk zijn aan de gebruikte definities van de Rijks Geologische Dienst.

In de formulering voor de berekening van stijgsnelheden op basis van diktevariëaties in het afdekkpakket brengt Groundcontrol twee nieuwe parameters in:

- caprock-vormingsnelheid
- holtevormingsnelheid

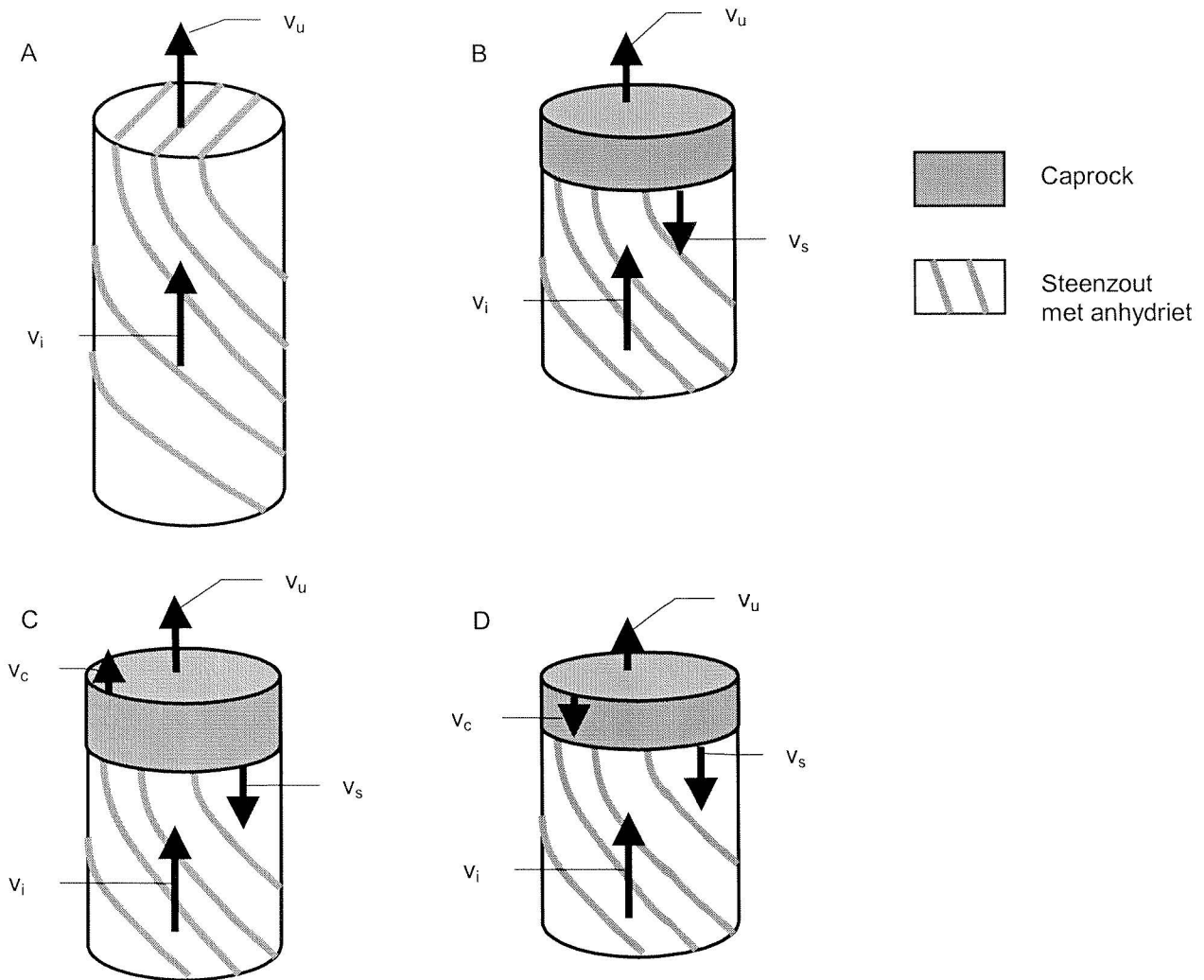
De betekenis en relevantie van deze parameters worden hier opeenvolgend besproken.

De caprock-vormingsnelheid

Het door de RGD binnen het OPLA Programma gebezigde *concept* voor de berekening van stijgsnelheden op basis van diktevariëaties in het afdekkpakket is eenvoudig, en praktisch (zie ook figuur 3.2). Zechstein-zout met daarin een percentage slecht oplosbare bestanddelen bestaande uit sulfaten, carbonaten en wat klei stijgt met een gemiddelde snelheid; deze wordt de gemiddelde inwendige stijgsnelheid genoemd. Zolang het steenzout aan de bovenzijde van de zoutstructuur niet aan oplossing onderhevig is, is de stijgsnelheid van de bovenzijde van de zoutstructuur gelijk aan de gemiddelde inwendige stijgsnelheid van het zoutlichaam. Tot zover is er geen verschil van inzicht in de gebruikte concepten.

Als het steenzout in contact komt met onverzadigd grondwater lost deze component op en de slecht-oplosbare bestanddelen, gips, anhydriet, kalk of klei, blijven achter. De uitwendige stijgsnelheid is dan gelijk aan de inwendige stijgsnelheid min de subrosiesnelheid.

De caprock-vormingsnelheid kan in de RGD-formule worden opgenomen als met caprock-vorming bedoeld wordt op volumeverandering van het reeds aanwezig oplossingsresidu door chemische en fysisch-chemische processen. Omzetting van anhydriet in gips leidt tot een vergroting van het volume van de caprock (relatieve stijging van de bovenzijde van de caprock, zie figuur 3.2C). Voortgaande oplossing van de sulfaten (zie figuur 3.2D) leidt juist tot een afname van het caprock-volume (relatieve daling van de bovenzijde van de caprock).



Figuur 3.2 Schematische weergave van de gebruikte concepten voor de berekening van de gemiddelde uitwendige stijgsnelheid (v_u) en de relatie met de gemiddelde inwendige stijgsnelheid (v_i). A en B geven de situatie weer zoals is toegepast door de RGD, respectievelijk met subsosiesnelheid (v_s) = 0 en subsosiesnelheid > 0 ; C en D geven de concepten weer met inbegrip van de 'caprock-vormingsnelheid' (v_c), als deze zou verwijzen naar respectievelijk, een relatieve stijging van de bovenzijde van de caprock als gevolg van omzetting in gips of een relatieve daling van de bovenzijde van de caprock als gevolg van sulfaatoplossing.

In vergelijking met de berekende gemiddelde stijgsnelheden zijn deze effecten gering; het percentage slecht-oplosbare bestanddelen in het Zechstein is niet hoog en bedraagt enkele procenten tot ongeveer 10% in de Nederlandse situatie. Gedurende korte tijdspannen, asynchroon met de subsosie van het steenzout, zou hydratatie of oplossing van reeds geaggregeerde sulfaten een beduidend effect kunnen hebben en de grootte van de inwendige stijgsnelheid of de subsosiesnelheid kunnen overschrijden.

Het kwantificeren van de vormingsnelheid van de caprock op basis van de caprock zelf is zeer lastig, daar er nagenoeg geen ‘time markers’ in dit gesteente beschikbaar zijn.

Het gebruik van de caprock-vormingsnelheid in de door Groundcontrol gebezigde formule voor de inwendige snelheid is niet juist (zie vergelijking (2) in citaat van Groundcontrol) als hiermee *nieuwvorming* van caprock wordt bedoeld. Caprocks boven Nederlandse zoutstructuren bestaan grotendeels uit sulfaten die oorspronkelijk in het niet-opgeloste steenzout aanwezig waren. Dit volumetrische aandeel sulfaten is impliciet in de variabele v_i (inwendige stijgsnelheid) opgenomen. Voor de Nederlandse situatie is het aannemelijk dat er, buiten de zoutstructuur zelf, geen externe bron voor de sulfaten aanwezig is. Het introduceren van een extra variabele in de vorm van de caprock-vormingsnelheid zou dan de materiaalbalans verstoren.

Invloed holtevorming

Door oplossing van steenzout of voortgaande oplossing van de caprock kunnen holruimten ontstaan (zie paragraaf 2.2). Door instorting of inzakking van het dak kunnen deze holruimten weer worden dichtgedrukt. Tengevolge hiervan ontstaan aan het maaiveld depressies, afhankelijk van de grootte en de diepte van de holruimte en de samenstelling van het afdekpakket. Holruimten op het grensvlak tussen het Zechstein-zout en de caprock kunnen door voortgaande zoutstijging worden dichtgedrukt.

Holtes worden gevormd op een schaal van enkele meters tot vele tientallen meters. Aan het maaiveld kunnen deze zich uiteten in depressies op een schaal van een tiental meters tot enkele honderden meters. Ten opzichte van de zoutstructuur met dimensies van 1 kilometer of meer zijn deze *lokale* verschijnselen. Dit geldt ook voor de resulterende diktevariëaties in het afdekpakket door de instorting of inzakking van de holruimtes. Zij vormen anomalieën in de meer grootschalige diktevariëaties die optreden door de stijging van de zoutstructuur (horizontale schaal 1 tot 10 km) en buiten de scope van de berekening van gemiddelde stijgsnelheden vallen. Het kwantificeren van holtevorming en –sluiting op basis van geologisch data vergt een meer gedetailleerde verzameling veldgegevens dan voor de berekening van stijgsnelheden beschikbaar is.

Naast dit verschil in ruimtelijke schaal tussen de verschijnselen zoutstijging en subsosie enerzijds en holtevorming en –sluiting anderzijds is er ook een verschil mogelijk in de tijdschaal waarop de processen opereren. Het proces van holtevorming en –sluiting speelt zich af op een tijdschaal van 10^4 tot 10^6 jaar. De berekende stijgsnelheden zijn gemiddelden voor perioden van enkele honderdduizenden tot vele miljoenen jaren en omvatten dus doorgaans langere perioden dan voor de vorming en sluiting van holtes benodigd is.

Voorts verloopt het proces van holtevorming en sluiting niet synchroon met elkaar. De opvullingsgeschiedenis van een instortingsdoline zegt niet direct iets over de snelheid waarmee de holte gevormd werd en weer gesloten werd. De vorming van holruimten in de caprock hoeft niet synchroon met de caprock-vorming te verlopen, m.a.w. het caprock-gesteente kan veel ouder zijn dan de holruimten die erin werden gevormd.

Conclusie

De aanpassing van de formulering voor de gemiddelde uitwendige stijgsnelheid met behulp van de caprock-vormingsnelheid is volgens TNO-NITG alleen zinvol als met caprock-vorming gerefereerd wordt aan omvorming van het reeds aanwezige oplossingsresidu. De aanpassing is niet juist als met caprock-vorming nieuwvorming bedoeld wordt. Integratie van de holtevormingsnelheid stuit op praktische en conceptuele bezwaren. Groundcontrol blijft evenwel bij haar mening dat de door Groundcontrol voorgestelde methode voor de berekening van stijgsnelheden juist is.

Het inbouwen van allerlei caprock-processen in de berekening van stijg- en subrosiesnelheden, zoals:

- oplossnelheid van de caprock (verkarsting);
- volumeverandering door (de-)hydratie etc.

is theoretisch wel juist, maar heeft met de huidige beschikbare geologische gegevens geen praktische toepassingswaarde in de berekening van stijgsnelheden op basis van diktevariaties in het afdekpakket.

De benaderingswijzen van Groundcontrol en TNO-NITG in de formulering van de stijgsnelheid zijn wezenlijk verschillend. De door de RGD en TNO-NITG gebezigde praktische formule is alleen bestemd voor de reconstructie van stijgsnelheden in het verleden op basis van diktevariaties in het afdekpakket. De formulering van de stijgsnelheid volgens Groundcontrol is gebaseerd op een meer theoretische grondslag waarmee allerlei bewegingshypotheseën voor het verleden of de toekomst kunnen worden geëvalueerd.

3.2 Compactie van het afdekpakket

Sedimenten klinken in ofwel compacteren tijdens en na afzetting, doordat zij worden belast door de bovenliggende sedimenten. Door uitdrijving van water neemt het volume af en neemt de dichtheid toe. Voor de berekening van stijgsnelheden op basis van diktevariaties in het afdekpakket is het van groot belang om voor deze compactie te corrigeren. Dit komt dan ook uitgebreid aan bod in de rapporten van de Rijks Geologische Dienst betreffende de berekening van stijgsnelheden (1990, 1993).

De kleilagen rondom een zoutstructuur kunnen extra inklinken door ijsbelasting, terwijl het zout zelf niet samendrukbaar is, zoals door Groundcontrol benadrukt is. Het kwantificeren van de compactie door ijsbelasting is heel lastig, daar onzekerheid bestaat over de grootte van mechanische parameters van de ondergrond. Bij ijsbelasting is bovendien niet precies bekend hoe hoog de waterdruk oploopt door smeltwaterproductie aan de onderzijde van de ijskap en hoe goed of hoe slecht de ondergrond wordt gedraineerd. De last van de ijskap kan deels worden opgevangen door de verhoogde waterdruk, waardoor de mate van compactie af zal nemen (RGD,1989; Boulton & Dobbie, 1993).

Discussiepunt

In paragraaf 3.3, p. 17, van het Groundcontrol-rapport uit 1994 wordt geponereerd dat het mechanisme van ‘drape compaction’ *‘te weinig betrokken wordt bij zoutpijlergroei’*. Dit ‘draperen’ van sedimenten over een zoutstructuur wordt veroorzaakt door het verschil in samendrukbaarheid tussen het zout en de boven- en naastliggende sedimenten.

In paragraaf 3.3.1, p. 18, van hetzelfde rapport wordt gesteld (*op. cit.* Groundcontrol, 1994):

Voor de Nederlandse zoutprovincie en voor andere zoutprovincies introduceert Groundcontrol ... een nieuwe theorie die in principe een zelfde uitwerking kan hebben als het in 3.3 besproken mechanisme van drape compaction, namelijk ijsbedekking.

In de conclusies van het Groundcontrol-rapport uit 1994 mondt dit uit in (*op. cit.* conclusie 15, p. 59):

Ijsbedekking leidt niet alleen mogelijk tot transformatie van gips naar anhydriet; ijsbelasting kan verder overconsolidatie van kleien bewerkstelligen. Studies duiden op een verticale vervorming van 35 - 160 meter bij 400 - 500 meter kleien onder een last van 1200 meter ijs. Steenzout en anhydriet daarentegen laten zich niet samendrukken. Het resultaat van (overconsolidatie) van kleien rondom ondiepe pijlers is niet in de OPLA fase 1a meegenomen. Daar overconsolidatie van kleien een configuratie kan veroorzaken waaruit door foutieve interpretatie schijnbaar diapirisme kan worden afgeleid, kunnen zonder het herkennen en doorrekenen van dit fenomeen geen betrouwbare uitspraken over stijgsnelheden van de laatste 500.000 jaar worden gedaan, daar er in dit tijdsbestek gedurende tweemaal sprake is geweest van een ijsbedekking op Nederlandse bodem.

Evaluatie

Correctie voor compactie-effecten, waaronder ook ‘drape compaction’ valt, neemt een centrale plaats in de berekening van stijgsnelheden (RGD, 1987; 1990; 1993). De opmerking dat ‘drape compaction te weinig betrokken wordt bij zoutpijlergroei’ (Groundcontrol, 1994) is dan ook niet terecht.

Overconsolidatie van klei door ijsbelasting is een bekend verschijnsel, zoals onder meer uit de OPLA-studie van de Rijks Geologische Dienst blijkt (RGD, 1989). Zout is daarentegen niet samendrukbaar. Groundcontrol (1994) bracht overconsolidatie van klei in verband met een mogelijke overschatting van de stijgsnelheid van een zoutpijler.

Het kwantificeren van overconsolidatie bij een bepaalde ijsbelasting is echter zeer lastig om de volgende redenen:

- onzekerheid betreffende het elastisch-plastische gedrag (RGD, 1989);
- verhoging van de waterdruk door productie van smeltwater aan de basis van de ijskap (Piotrowski & Kraus, 1997);
- de mate van drainage van het kleilichaam (Boulton & Dobbie, 1993);
- de belastingsduur versus de consolidatietijd (Kooi & de Vries, 1998).

In het project TRAKTOR, onderdeel van het CORA Onderzoekprogramma – Fase 1, zijn deze aspecten nader onderzocht (NITG-TNO, 2000). Hier is aangenomen dat een ijskap van 1000 meter dik gedurende maximaal 20.000 jaar de ondergrond belast. De ijskap produceert smeltwater dat in de ondergrond infiltreert. Uit de hydromechanische modellering van klei in het project TRAKTOR volgt dat de vervorming deels elastisch en deels plastisch is. De plastische vervorming leidt tot blijvende overconsolidatie van de klei. De ijslast wordt na verloop van tijd nagenoeg volledig overgedragen op de korrelspanning in de klei, ook onder invloed van infiltrerend smeltwater. De drainagecapaciteit van de aquifers boven en onder de klei is blijkaar voldoende om de overdruk in de klei af te bouwen in de genoemde periode van 20.000 jaar.

In de berekening van de stijgsnelheden door de Rijks Geologische Dienst is onder meer aangenomen dat de waargenomen diktevariatie in het afdekpakket het gevolg is van zoutbeweging (zie voor uitgebreide discussie RGD, 1990; 1993). De berekende stijgsnelheid is daardoor een mogelijke overschatting van de werkelijke snelheid. Deze aanpak sluit goed aan bij de conservatieve benaderingswijze in de veiligheidsstudie.

3.3 Volumeverandering van steenzout

Het volume van steenzout is temperatuurafhankelijk, het krimpt bij temperatuurverlaging en zet uit bij temperatuurverhoging. De uitzetting van

steenzout tengevolge van geborgen warmteproducerend radioactief afval is in de veiligheidsstudie onderzocht (ECN & RIVM, 1988).

Discussiepunt

In conclusie 13, p. 58, uit het Groundcontrol-rapport van 1994 wordt gesteld, *op. cit.*:

... In de aanbevelingen van Groundcontrol (1989) is gesteld dat ijs {vermoedelijk wordt steenzout bedoeld} veel sterker krimpt dan andere sedimenten (lineair uitzettingscoëfficiënt 0,00004). Wanneer een ondiepe zoutpijler (2 km hoog) tijdens de laatste ijstijd in 4000 jaar gemiddeld 10 graden Celsius in temperatuur daalt, daalt deze in de orde van grootte van 80 cm (0,5 mm/j). Wanneer de pijler 5 graden in temperatuur daalt in 6000 jaar, zakt hij met een snelheid van 0,1 mm/j. Deze cijfers vertegenwoordigen minima; op dit moment sluit Groundcontrol niet uit dat de bedragen tot drie keer zo hoog zouden kunnen liggen; nader onderzoek zou dit kunnen verifiëren {tussen 1994 en 1998}. Gezien de onnauwkeurigheid van de berekening en de onzekere factoren bij diapirisme door ijsopstuwing, kan met grote waarschijnlijkheid gesteld worden dat het in ieder geval optredende effect van inzakking van een zoutpijler door afkoeling tijdens een ijstijd groter zal zijn dan diapirisme door opstuwing. Verder treedt inzakking ook (en in sterkere mate) op wanneer er wel een ijstijd maar geen ijsbedekking is zoals in de laatste ijstijd. Krimping heeft dan ook gedurende de laatste ijstijd plaatsgevonden en opstuwing door landijs zeer beslist niet.

In conclusie 13a van hetzelfde rapport wordt, in aanvulling op het gestelde in conclusie 13, gemeld, *op. cit.*:

Overigens is het omgekeerde effect van contractie, 'thermal recovering' na een ijstijd eveneens niet meegenomen in de OPLA studies. Het herstel van de warmtehuishouding na een ijstijd is te vergelijken met het installeren van een warmtebron in het steenzout. Wanneer na een ijstijd de pijler 'verwarmd' wordt, expandeert het steenzout hetgeen leidt tot opheffing aan het maaiveld en dus opheffing van (peri)glaciale afzettingen.

Deze opheffing - begrensd in de tijd – kan verkeerd worden geïnterpreteerd als diapirisme. Thermal recovering kan gedurende enige duizenden jaren voortschrijden met een snelheid van enige tienden van mm/j.

Evaluatie

Steenzout ondergaat volumeveranderingen door schommelingen in de temperatuur. Dit leidt tot beweging van de top van de zoutpijler (Groundcontrol, 1994). Op een

tijdschaal van enkele 1.000-en tot enkele 10.000-en jaren kan dit, afhankelijk van een temperatuurdaling of –stijging, leiden tot respectievelijk een daling of stijging van de bovenzijde van de zoutstructuur.

Deze beweging is cyclisch omdat de temperatuurverandering zelf ook cyclisch is. Na gemiddeld 100.000 jaar, de duur van een glaciaal-interglaciaal cyclus, is het netto-effect nihil. Het mogelijke effect van differentiële belasting door een ijskap op de stijgsnelheid van een zoutstructuur werkt daarentegen cumulatief.

Op korte termijn, d.w.z. over perioden van enige 1.000-en tot 10.000-en jaren zijn de door Groundcontrol genoemde effecten van de temperatuurverandering op de stijgsnelheid mogelijk. Recente stijging van zoutpijlers is wellicht te wijten aan het herstellen van het thermisch evenwicht. Het positieve reliëf van het aardoppervlak boven een aantal Nederlandse en Duitse zoutpijlers zou hiermee verklaard kunnen worden. Wanneer het thermisch evenwicht geheel is hersteld, zou deze stijging daarmee tot een eind gekomen zijn. Deze verklaring van Groundcontrol draagt bij aan de verkleining van de bandbreedte van zoutstijging over korte geologische perioden.

De door de RGD uitgevoerde berekeningen van de stijgsnelheid op basis van het afdekpakket hebben vrijwel altijd betrekking op langere tijdsintervallen, waardoor het temperatuureffect geneutraliseerd wordt.

De krimp die het steenzout door afkoeling ondergaat, zou kunnen leiden tot de vorming van scheuren in het zout. Dit proces zal aan een nader onderzoek onderworpen moeten worden.

3.4 De zoutpijler Schoonlo

Van alle in de Nederlandse ondergrond aanwezige zoutstructuren is de pijler Schoonlo een van de bekendste, mede door de publicatie van Mulder uit 1950. De pijler valt ook op door zijn voor Nederlandse begrippen hoge gemiddelde uitwendige stijgsnelheid van 0,11 mm per jaar voor de laatste 400.000 jaar (RGD, 1993). In voorgaande rapportages van de RGD met een minder gedetailleerde routine voor de correctie van compactie-effecten was een gemiddelde uitwendige stijgsnelheid van maximaal 0,28 mm/jaar berekend.

In wat breder perspectief is de hoogte van deze snelheid niet zo bijzonder. Uit het aanpalende gebied in Duitsland zijn meer structuren met een snelheid van een dergelijke grootte bekend.

Discussiepunt

In de conclusies van het Groundcontrol-rapport (1994) wordt over de stijgsnelheid van de zoutpijler het volgende gemeld, *op. cit.* (conclusie 16, p. 59):

De maximale uitwendige stijgsnelheid (GUS) die verondersteld werd in de OPLA-studie fase 1 bedroeg 0,28 mm/j. Dit cijfer is in fase 1a bijgesteld tot 0,11 mm/j, komt uit de casestudie Schoonlo en heeft betrekking op de snelheid van de laatste 500.000 jaar. De berekening is gemaakt uitgaande van het verschil in niveau van 80 meter van de formatie van Urk en van niveauverschil in de formatie van Twente in recente tijd¹.

De conclusie moet luiden dat uit het onderzoek van Groundcontrol mogelijk blijkt dat de huidige configuratie door andere processen is veroorzaakt en niet als wordt gesuggereerd door zoutdiapirisme is veroorzaakt. Twee processen zouden hiervoor verantwoordelijk kunnen zijn en wel:

- a. overconsolidatie van kleien (verzet basis formatie van Urk);*
- b. thermal recovering van steenzout na de ijstijd van het Weichselien (verzet formatie van Twente en geomorfologische expressie).*

Samenvattend, stelt Groundcontrol dat de pijler Schoonlo gedurende de laatste 500.000 jaar niet heeft bewogen.

Evaluatie

In de berekeningen van de Rijks Geologische Dienst is aangenomen dat de diepte- en diktevariaties in de omgeving van een zoutpijler hun oorsprong vinden in de beweging van het Zechstein-zout in de ondergrond. Dit is een conservatieve aanpak, die goed past in de benadering van de veiligheidsstudie. Naast halokinese spelen andere processen die meegewogen moeten worden bij de reconstructie van de beweging van de zoutstructuur. Twee daarvan, overconsolidatie van de zout omringende lagen door ijsbelasting (zie paragraaf 3.2) en thermal recovering (zie paragraaf 3.3), zijn door Groundcontrol genoemd. De omzetting van anhydriet in gips is een derde proces dat de beweging van de top van de zoutstructuur beïnvloeden kan (RGD, 1990: p. 21).

Overconsolidatie

Het is goed mogelijk dat de sedimenten in de omgeving van de zoutpijler overgeconsolideerd zijn door ijsbelasting, zoals door Groundcontrol is opgeworpen. In ieder geval was het gebied tijdens een beperkte periode in het Saalien door ijs bedekt. In hydromechanische berekeningen van ijsbelasting is een zakking van 20 meter voor een representatieve situatie in Nederland berekend (TNO-NITG, 2000). In de berekening is uitgegaan van een ijsskap met een dikte van maximaal 1000 meter en een maximale belastingsduur van 20.000 jaar. Een deel van de zakking is het gevolg van elastische vervorming van de ondergrond die

¹ De berekening op basis van niveau in Formatie van Twente is in het genoemde interne tussenrapport van de RGD (1991) gemeld. Na evaluatie van deze berekening is geconcludeerd dat de gegevensbasis te zwak is. De bewuste passage is om die reden niet in het eindrapport (RGD, 1993) overgenomen.

na ontlasting weer hersteld wordt en dus niet leidt tot een blijvende vervorming van de ondergrond.

Thermal recovering

Dit proces loopt nagenoeg parallel met de temperatuurfluctuaties die aan het maaiveld optreden met typische periodiciteiten tussen 20.000 en 100.000 jaar. De berekende uitwendige stijgsnelheid voor Schoonlo is een gemiddelde over 400.000 jaar, waardoor de genoemde temperatuureffecten nagenoeg geen rol spelen in de berekening van de stijgsnelheid.

Hydratie

Een proces dat ook een significante invloed op de uitwendige stijgsnelheid hebben kan, is de omzetting van anhydriet in gips. De hiermee gepaard gaande volumetoename kan leiden tot een hoge uitwendige stijgsnelheid zonder dat daarbij sprake is van een stijging van het steenzout zelf (RGD, 1990). Ook dit proces is lastig te bewijzen, temeer omdat bruikbare locatiespecifieke veldgegevens ontbreken. Het is niet duidelijk in hoeverre de caprock van de pijler Schoonlo uit gips bestaat.

Veldgegevens

De gegevensbasis voor het Kwartair nabij de zoutpijler Schoonlo is zeer smal. Er zijn welgeteld twee boringen (17E0009 en 17E0017) waarin de basis van de Formatie van Urk, de referentiehorizon die in de berekening van de stijgsnelheid gebruikt is, herkend is. Ook een aantal ondiepe karteringsboringen zouden de basis van de Formatie van Urk hebben bereikt. De boring 17E0009 staat in de randzone van de pijler Schoonlo en is niet representatief voor de ontwikkeling van het Kwartair boven de centrale deel van de pijler. Voor boring 17E0017 zijn sediment-petrologische aanwijzingen (SP-rapport 399 van de RGD) dat de basis van de Formatie van Urk in de boring is bereikt. Een sluitend bewijs vormen deze aanwijzingen echter niet.

De berekende gemiddelde uitwendige stijgsnelheid van 0,11 mm/jaar voor de pijler Schoonlo is mogelijk te hoog geschat (maximaal 25%), doordat de afzettingen naast de pijler extra geconsolideerd zijn door ijsbelasting, terwijl het steenzout zelf niet is samengedrukt. Dit zou een belangrijke verkleining van de bandbreedte in de gemiddelde uitwendige stijgsnelheid van Nederlandse zoutpijlers zijn.

Bovendien is het niet geheel uitgesloten dat de stijging voor een deel het gevolg is van uitzetting van de caprock, doordat anhydriet in gips wordt omgezet.

3.5 Slotbeschouwing van zoutstijging

Studies van het bureau Groundcontrol en van de Rijks geologische Dienst (nu TNO-NITG) geven aanleiding om rekening te houden met tijdelijke variaties in het tempo van het diapirisme. Met andere woorden detailstudie laat zien dat kortere perioden met versnelde maar ook zelfs negatieve stijging kunnen voorkomen. Het valt aan te nemen dat het verschijnsel van de cyclische landijsbedekkingen gepaarde gaande met een langdurig diep bevroren aardoppervlak de diapiere ontwikkeling, althans voor een deel, beïnvloed.

De landijsbedekking die in ons land tijdens de voorlaatste ijstijd (de zogenaamde Saalien ijstijd, die in de periode tussen 100.000 en 200.000 jaar geleden heerste) heeft het noordelijke deel van ons land, tot ongeveer de lijn Nijmegen-Haarlem onder een landijsgletsjer gebracht die in de noordelijke provincies een dikte van vele honderden meters bereikte. Bovendien was in die tijd de bodem tot vele tientallen meters, mogelijke zelfs tot meer dan 100 meter, diepte bevroren. Het ligt voor de hand te veronderstellen dat deze landijsbedekking zowel invloed had op het belastingspatroon van de ondergrond, alsook - door de stagnering van de waterhuishouding in de bovenste 100 meter van de watervoerende gesteentelagen tengevolge van bevroering - op de diepere grondwaterhuishouding.

Omdat wij met oprukkend, vervolgens tijdelijk omstreeks stabiel en tenslotte afsmeltend landijs te maken hebben, moeten wij bovendien uitgaan van een dynamisch proces, dat wil zeggen van een relatief vrij snel wijzigend belastingspatroon. Dat de diapiere ontwikkeling van de zoutkoepels, gelet op het zogenaamde kruipgedrag, daarop gerespondeerd heeft lijkt zeer aannemelijk.

Zoals hier al eerder gesteld, heeft het bureau Groundcontrol, in samenspraak met TNO-NITG, verschijnselen met betrekking tot diapirisme en caprock vorming bestudeerd. Deze studies hebben geleid tot een aantal verfijningen wat betreft de zoutbeweging op micro-schaal. Ook studies die de caprock ontwikkeling over de relatief korte termijn van een glaciële cyclus (circa 100.000 jaar) beslaan, werden uitgevoerd.

Deze beide aspecten werden ondergebracht in een gedetailleerde formule voor berekeningen ten behoeve van de nominale stijgingen van de top van het zoutlichaam met inbegrip van het aandeel van caprock processen daarbij.

4 Conclusies en aanbevelingen

Effecten van CaSO₄-omzetting

De omzetting van gips in anhydriet onder *hoge* druk, zoals door Groundcontrol verondersteld, kan niet worden uitgesloten voor een open systeem. Bij ijsbelasting gaat de druktoename gepaard met een temperatuurafname. De gezamenlijke invloed van deze temperatuur- en drukveranderingen op de stabiliteit van gips is niet bekend.

Vorming en sluiting van oplosloten

Dit proces heeft invloed op de doorlatendheid van de caprock en is als zodanig van belang voor de transportmodellering in de veiligheidsstudie. In de veiligheidsanalyse PROSA (ECN, RIVM en RGD, 1993) is de caprock kortgesloten door de radionucliden direct vanuit het zout in de erboven liggende klei- en zandlagen te laten migreren.

Sluiting van oplosloten leidt tot het ontstaan van instortingdolines in het afdekpakket, waardoor de doorlatendheid van het afdekpakket wordt verhoogd. Instortingdolines komen voor boven ondiepe zoutstructuren met een top op maximaal 150 meter diep.

Omstandigheden voor het ontstaan van holten in de caprock, verhoogde aanvoer van zoet water, kunnen zich zowel in glaciële als interglaciële perioden voordoen.

Methodiek voor de berekening van de stijgsnelheid

De voorgestelde aanpassing van Groundcontrol voor de berekening van de gemiddelde uitwendige stijgsnelheid op basis van diktevariaties in het afdekpakket is juist als de caprock-vormingsnelheid betrekking heeft op omvorming van het oplossingsresidu (hydratie, dehydratie of oplossing) en is niet juist als de term betrekking heeft op nieuwvorming van de caprock. Groundcontrol blijft evenwel bij haar mening dat de door Groundcontrol voorgestelde methode voor de berekening van stijgsnelheden juist is.

Compactie van het afdekpakket

Extra compactie van het afdekpakket door ijsbelasting rondom een niet samendrukbare zoutpijler is zeker mogelijk, zoals Groundcontrol stelt. Een ijskap met een dikte van 1000 meter en een belastingsduur van 20.000 jaar kan een zakking van 20 meter veroorzaken in een representatieve Nederlandse situatie. In de berekening van de stijgsnelheid op basis van diktevariaties in het afdekpakket is door de RGD een conservatieve benadering gebruikt; zij nam aan dat de geobserveerde diktevariaties het gevolg zijn van zoutbeweging. Deze aanpak past in de conservatieve benadering van de veiligheidsanalyse.

Volumeverandering van steenzout

Door variatie in de temperatuur van de ondergrond verandert het volume van steenzout. Bij een temperatuurdaling resulteert dit in een daling van de top van het

steenzout en vice versa. De klimaatgebonden variatie in de temperatuur speelt vooral op een termijn van 10.000 tot 100.000 jaar. Over langere perioden wordt de temperatuurverandering uitgemiddeld en speelt zij geen rol van betekenis in de netto stijging of daling van de top van het steenzout.

Door de krimp van het steenzout bij een afname van het volume zouden scheuren in het zout kunnen ontstaan, die van invloed kunnen zijn op het transport van radionucliden in het steenzout.

De zoutpijler Schoonlo

In de veiligheidsstudie PROSA is gebruik gemaakt van berekende gemiddelde inwendige stijgsnelheid en de subrosiesnelheid voor zoutstructuren in het N.W.-Europese Zechstein Bekken. Beschikbare waarden voor de gemiddelde uitwendige stijgsnelheid zijn niet in de veiligheidsstudie PROSA gebruikt. Dit geldt dus ook voor de waarde van de gemiddelde uitwendige stijgsnelheid die berekend is voor de pijler Schoonlo.

Eindconclusie

De evaluatie van een aantal punten van kritiek op de door de RGD berekende stijgsnelheden heeft geen ingrijpende gevolgen voor de veiligheidsanalyses die tot dusverre voor de berging van radioactief afval in Nederland uitgevoerd zijn. Krimp van steenzout door een temperatuurdaling zou kunnen leiden tot het ontstaan van scheuren in het steenzout. Dit zou het transport van radionucliden in het steenzout kunnen beïnvloeden.

Aanbevelingen

De kans dat scheuren ontstaan in zout door afkoeling moet nader worden onderzocht. In de temperatuurhuishouding van de zoutstructuur zal rekening gehouden moeten worden met de aanwezigheid van een anhydriet-caprock, tenzij aangetoond kan worden dat de drukcondities bij ijsbelasting niet kunnen leiden tot omzetting van gips in anhydriet.

Omzetting tussen anhydriet en gips dient nader te worden bestudeerd door onderzoek aan caprock-kernen en daaraan gekoppeld fysisch-chemische modelstudies en laboratoriumexperimenten.

Groundcontrol beval in 1995 aan onderzoek te doen naar gasinclusies in het steenzout. Het acht de kans groot dat er zich in Nederlandse zoutpijlers gasinclusies bevinden, dit omdat er een relatie is geconstateerd tussen het voorkomen van koolwaterstoffen onder steenzoutlagen en gasinclusies in zoutpijlers die zijn ontstaan uit deze lagen. Het voorkomen van gasinclusies kan belangrijk zijn bij het bepalen van de geschiktheid van zoutpijlers voor een ondergrondse opbergmijn.

5 Slotbeschouwing

In het project AAK – Aanvullende Analyse zoutproblematiek – is een aantal resterende aardwetenschappelijke discussiepunten uit het OPLA Programma behandeld. Alle aangerode discussiepunten hebben betrekking op het gedrag van de geologische barrière op de lange termijn en de veiligheid van afvalberging. Dit is de periode na sluiting van de bergingsfaciliteit met een duur van 100.000 jaar of meer. In het project kwam de discussie over het mijnbouwontwerp (technische barrière) en de implicaties van de huidige en toekomstige geologische omstandigheden hierop niet aan de orde. De onderzochte processen rond caprock vorming en zoutstijging hebben ook gevolgen voor het mijnbouwontwerp.

De combinatie diapirisme en het huidige klimatologische regime van de cyclische landijsbedekkingen zou van betekenis kunnen zijn met betrekking tot het mijnontwerp. Dit in het bijzonder met het oog op de doorvoer van de schachten door het caprock traject.

In de eerste plaats is het van belang te zijner tijd te weten in hoeverre de bestaande caprock op een mogelijke toekomstige locatie de sporen van de hiervoor beschreven processen vertoont en in welke mate men met de schachtconstructie hiermee rekening zal moeten houden. In de tweede plaats dient, met het oog op de zeer langdurige periode van de vereiste isolatie, ook na te worden gegaan in hoeverre in de toekomst optredende processen in de caprock vorming technische aanpassingen noodzakelijk maken.

In de geologische berging van radioactief afval wordt het multi-barrière concept gehanteerd: technische en geologische barrières tezamen zullen een veilige berging moeten garanderen. Dit betekent dat het gedrag van de technische en geologische barrières integraal moet worden opgelost.

Wij bevelen aan om een integrale studie uit te voeren naar het gedrag van de technische en geologische barrières onder invloed van natuurlijke processen. De resultaten hiervan moeten leiden tot keuze-overwegingen voor locatie van een potentiële ondergrondse berging en tot aanpassingen in het ontwerp van de mijn. Een dergelijk onderzoek zou uitgevoerd kunnen worden door samenwerking tussen mijnbouwtechnische onderzoeksinstituten, Groundcontrol en TNO-NITG.

Referenties

- ANONYMUS (1973). Excursionsführer zum Symposium der Internationalen Assoziation der Ingenieurgeologie vom 10. – 15. September 1973, Hannover.
- BORNEMANN, O. & R. FISCHBECK (1986). Ablaugung und Hutgesteinsbildung am Salzstock Gorleben. Zeitschrift der Deutschen Geologischen Gesellschaft 137, p. 71-83.
- BOULTON, G.S. & DOBBIE, K.E. (1993). Consolidation of sediments by glaciers: relations between sediment geotechnics, soft-bed glacier dynamics and subglacial groundwater flow. J. of Glaciology, Vol. 39, no. 131, p. 26-44.
- BOULTON, G.S. & CURLE, F., eds. (1997). Simulation of the effects of long-term climatic changes on groundwater flow and the safety of geological disposal sites, European Commission, Nuclear Science and Technology, EUR 17793 EN.
- BRÜGGEMANN (jaartal onbekend). Die Deutung der Hohlform der Seewiesensenke. Diplomarbeit.
- BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN UND ROHSTOFFE (BGR) (1987). Tätigkeitsbericht 1985/1986.
- CORA COMMISSIE (1996). Concept-Kaderplan Onderzoekprogramma 1995-1999. Werkdocument CORA 96-13rev.1.
- DUTTON, A.R. (1987). Hydrogeologic and hydrochemical properties of salt dissolution zones. Palo Duro Basin, Texas. Panhandle – Preliminary assessment. Bureau of Economic Geology, University of Texas Austin, nr 78713.
- ECN & RIVM (1988). Aut.: J. Prij, C.T.J. Jong & P.B.J.M. Benneker. Veiligheids Evaluatie van Opbergconcepten in Steenzout (VEOS) – Deelrapport 5: Spannings- en vervormingsberekeningen
- ECN, RIVM & RGD (1993). PROSA - Probabilistic Safety Assessment. OPLA Programma Fase 1A.
- GROUNDCONTROL (1989). Aut.: P. van der Gaag. Een evaluatie van aardwetenschappelijke aspecten van belang voor OPLA Fase 1, 63 p.
- GROUNDCONTROL (1990). Een inventarisatie van de modellen en parameters van zoutvloeï en aanbevelingen voor nader geologisch onderzoek van Nederlandse zoutstructuren (OPLA Fase 1A en 2).
- GROUNDCONTROL (1992). Aut.: P. van der Gaag, M. Melkert en H. van der Poel. Caprock studies – Evaluatie van het ontstaan van caprock en de natuurlijke processen in caprock met betrekking tot de Nederlandse situatie, OPLA 92-14, 46 p.
- GROUNDCONTROL (1993). Aut.: P. van der Gaag, M. Melkert en H.M. van der Poel. Caprock studies eindrapport, OPLA 93-70, 44 p.

- GROUNDCONTROL (1994). Aut.: P. van der Gaag en E.J. Stenhuis. Discussie met betrekking tot de kwaliteit van het aardwetenschappelijk onderzoek in het kader van OPLA 1988 – 1993, 69 p.
- HERRMANN, F. & E. HOFRICHTER (1973). Subrosion, Bodensenkungen und Erdfälle am Salzstöcken NW-Deutschlands am Beispiel des Salzstockes Benthe bei Hannover. In: Proc. I.A.E.G.: Erdfälle und Bodensenkungen.
- HOFRICHTER, E. (1967). Subrosion und Bodensenkungen am Salzstock von Stade. Geol. Jb., vol. 84, p. 327-340.
- HOFRICHTER, E. (1985). Bemerkungen zur Subrosion, Denudation und Halokinese am Salzstöcken in NW-Deutschland im Hinblick auf die Sicherheit eines Endlagers. 18. Sitzung des RSK-Ausschusses Endlagerung, Bonn.
- HOHM, D. (1979). Über Erdfälle am nordwestlichen Harzrand zwischen Hahausen und Osterode am Harz (Niedersachsen). Mitt. Inst. Univ. Hannover.
- HURTIG, E. (1965). Beziehungen zwischen Oberflächenmorphologie und Salzstrukturen. Geophysik und Geologie, Folge 7, p. 42-56.
- KOOI, H. & DE VRIES, J.J. (1998). Land subsidence and hydrodynamic compaction of sedimentary basins, Hydrology and Earth System Sciences, Vol. 2, p. 159-171.
- LAEMMLEN, M., PRINZ, H. & ROTH, H. (1979). Folgeerscheinungen des tiefen Salinarkarstes.
- MEYER, K.-D. (1990). Persoonlijke mededeling.
- MINISTERIE VAN ECONOMISCHE ZAKEN (1993). Dossier kernenergie.
- MOLEK, H. (1976). Senkungs- und Bruchvorgänge im Salzkarst. Z. geol. Wiss., vol. 4-8, p. 1135-1147.
- MULDER, A.J. (1950). De zoutpijler van Schoonlo. In: Geologie en Mijnbouw, vol. 12, no. 6, p. 169-176.
- MÜLLER, W.H. & BRIEGEL, U. (1978). Rheological behaviour of polycrystalline anhydrite. Eclog. Geol. Helvetia 71, p. 397-407.
- NIEDERMAYER, J. (1957). Einfluß des Klimaablaufs auf die Erdfallbildung an norddeutschen Salzstöcken. In: Proceedings of IAEG Symposium on Sink-holes and subsidence, Hannover, p. T1-C 1-3.
- NITG-TNO (2000). Transport of radionuclides disposed of in clay of Tertiary origin (TRACTOR). Final report.
- OPLA COMMISSIE (1993). Onderzoek naar geologische opberging van radioactief afval in Nederland. Eindrapport Aanvullend onderzoek van fase 1.
- ORTLAM, D. & SCHNIER, H. (1981). Erdfälle und Salzwasseraufstieg in Bremen – Typbeispiel für Süßwasserdepressionsgebiete. Neues Jb. für Geologie u. Paläontologie, Monatsh. 4, p. 232-256.
- PETERSEN, K. (1991). The effect of gravitational compaction on estimation of vertical salt structure growth. Tectonophysics, vol. 194, p. 35-48.

- PIOTROWSKI, J.A. & KRAUS, A.M., 1997, Response of sediment to ice-sheet loading in north-western Germany: effective stresses and glacier-bed stability, *Journal of Glaciology*, Vol.43, No. 145, p. 495-502.
- PREUL, F. (1968). Die Subrosion am Salzstock von Salzgitter-Lebenstedt. *Geol. Jb.*, vol. 85, p. 809-816.
- RIJKS GEOLOGISCHE DIENST (1988). Aut.: M.C. Geluk & A.F.B. Wildenburg. Geologische inventarisatie en ontstaansgeschiedenis van zoutvoorkomens in Noord- en Oost-Nederland. Rapport van project GEO-1, OPLA-Fase 1. Rapportnr. 10568.
- RIJKS GEOLOGISCHE DIENST (1989). Aut.: F. Schokking. Gevolgen van extra belasting door landijsbedekking op diapirisme. Deelstudie 1.b van project Vervolg GEO-1, OPLA fase 1. Rapportnr. 30010C.
- RIJKS GEOLOGISCHE DIENST (1990). Aut.: Wildenburg, A.F.B., De Mulder, E.F.J., Bosch, J.H.A., Hillen, R., Schokking, F. & Van Gijssel, K. Nadere ordening van zoutstructuren ex fase 1 met de nadruk op (peri-)glaciale verschijnselen in de komende 100.000 jaar, rapportnr. 30.010.
- RIJKS GEOLOGISCHE DIENST (1991). Aut.: Ruijs, E.K. & Van Gijssel, K. Optimalisatie van bestaande (hydro-)geologische databestanden op basis van gegevens uit het onderzoeksgebied noordoost-Nederland. Intern rapport, nr. 30102/TRA2.
- RIJKS GEOLOGISCHE DIENST (1993). Evaluatie van Nederlandse zoutvoorkomens en hun nevengeesteente voor de berging van radioactief afval - Overzicht van de resultaten. Rapportnr. 30.012/ER, OPLA Programma Fase 1A.
- RIVM, RGD & TNO GG (1993). Aut.: Oostrom, M., Van Gijssel, K. & Zijl, W. Modelling subrosion and groundwater flow in the vicinity of the Zuidwending diapir on the basis of geometrical and (palaeo)hydrological boundary conditions for the Northeastern Netherlands. The SESAM project. RIVM report 715205004.
- ROSS, P.-H. (1985). Kurzfassung der Vorexkursion A2, 5. Nationale Tagung für Ingenieurgeologie.
- RÜHBERG, N. (1976). Probleme der Zechsteinsalzbewegung. *Zeitschrift für angewandte Geologie*, Bd. 22, Heft 9, p.413-420.
- SCHUILING, O. (1997). Mondelinge mededeling.
- SENI, S.J. & M.P.A. JACKSON (1983). Evolution of Salt Structures, East Texas Diapir Province, Part 2: Patterns and Rates of Halokinesis. In: *The American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, Vol. 67, no. 8, p. 1245-1274.
- SØRENSEN, K. (1986). Rim syncline volume estimation and salt diapirism. In: *Nature*, Vol. 319, p. 23-27.
- TEICHMÜLLER, R. (1948). Das Oberflächenbild des Salzdoms von Segeberg in Holstein. In: *Z. der deutschen geologischen Gesellschaft*, vol. 98, p. 7-29.
- TRUSHEIM, F. (1957). Über Halokinese und ihre Bedeutung für die strukturelle Entwicklung Norddeutschlands. In: *Zeitschrift der deutschen geologischen Gesellschaft*, Vol. 109, p. 111-151.

- VAN BERKEL, J.T. (1986). A structural study of evaporite diapirs, folds and faults, Axel Heiberg Island, Canadian Arctic Islands. GUA Papers of Geology, Series 1, no. 26-1986, PhD thesis.
- WILDENBORG, A.F.B., BREMMER, C.N. & GERARDI, J. (2000). Salt dissolution under various Quaternary climate conditions. Proceedings of Salt2000 Symposium, 7-11 May 2000, The Hague.

Referentie naar www

- HARDER, V. (1997). Surface collapse and subsidence,
<http://www.wiley.com/college/murck/KARST.HTM>: versie 24-4-97.