

**Bodemvervorming door diepe
zoutwinning en effecten op
gebouwen in de Barradeel
concessie van FRISIA Zout
definitief**

**CO400130/05 versie 1
november 2001**

**Bodemvervorming door diepe zoutwinning
en effecten op gebouwen in de Barradeel
concessie van FRISIA Zout**

definitief

CO400130/05
november 2001

Opgesteld in opdracht van:

FRISIA Zout B.V.

LANGE LIJNBAAN 15
8861 NW HARLINGEN

AFDELING STRATEGISCH ONDERZOEK

Projectleider : drs. G.A.M. Kruse

Projectbegeleider: dr.ir. P. van den Berg

GeoDelft

Stieltjesweg 2, 2628 CK DELFT

Postbus 69, 2600 AB DELFT

Telefoon (015) 269 35 00

Telefax (015) 261 08 21

Postbank 234342

Bank MeesPierson NV

Rek.nr. 25.92.35.911

rapportnr: CO400130/05		datum rapport: november 2001			
titel en subtitel: Bodemvervorming door diepe zoutwinning en effecten op gebouwen in de Barradeel concessie van FRISIA Zout		behandelende afdeling: Strategisch Onderzoek			
		projectnaam: FRISIA Bodemdaling			
projectleider(s): drs. G.A.M. Kruse		projectbegeleider(s): dr.ir. P. van den Berg			
naam en adres opdrachtgever: FRISIA Zout B.V. Lange LIJNBAAN 15 8861 NW Harlingen		referentie opdrachtgever: brief dd. 21-03-2000			
		type rapport: definitief			
<p>samenvatting rapport:</p> <p>De vervorming van de bodem bij bodemdaling als direct gevolg van zoutwinning door FRISIA is nagegaan voor een bodemdalingskom met een maximum diepte van ongeveer 35 cm, zoals die over enige jaren kan ontstaan. De vervormingen betreffen scheefstand, horizontale rek en kromming. De vervormingen zijn beschouwd aan de hand van berekeningen van bodemdaling en vervorming die zijn geijkt aan gemeten bodemdaling. Indirecte effecten van de bodemdaling zijn elders nagegaan. Behalve de daling van het maaiveld zijn de vervormingen als direct gevolg van de bodemdaling zeer gering, mede omdat de bodemdaling zich over een relatief groot gebied verdeelt. De berekende vervormingen zijn veel lager dan de schadecriteria die in de literatuur worden gegeven.</p>					
opmerkingen:					
trefwoorden: zoutwinning, bodemdaling, horizontale rekken, relatieve rotatie		verspreiding: FRISIA			
opgeslagen op: N:\ onder titel: N:\projecten.gd\400000\400130\Rekenbestanden\rapptemp\CO400130_031 fkk1 kru1.doc				aantal blz.: 34	
versie:	datum:	opgesteld door:	paraaf:	gecontroleerd door:	paraaf:
1	08-09-2001	ir. J.P. Pruiksma		drs. G.A.M. Kruse	
2	16-10-2001	ir. J.P. Pruiksma		drs. G.A.M. Kruse	
3	07-112001	ir. J.P. Pruiksma		drs. G.A.M. Kruse	

INHOUDSOPGAVE

1	Inleiding	1
1.1	Effect bodemdaling op de waterbeheersing en veiligheid zeedijk	2
1.2	Kans op schade door aardtrillingen als gevolg van zoutwinning	2
1.3	Direct effect van de bodemdaling op constructies	3
1.4	Afhandeling van de gevolgen van bodembeweging	3
2	Vervorming van de bovengrond	5
2.1	Zoutwinning en bodemdaling	5
2.2	Bodemdaling door gaswinning	5
2.3	Metingen en voorspellingen bodemdaling	5
2.4	Vervorming in de grond en in gebouwen	9
2.4.1	Helling en scheefstand	10
2.4.2	Kromming, kromtestraal en relatieve rotatie	11
2.4.3	Horizontale rek	14
3	Criteria voor schade aan gebouwen	17
4	Vergelijk van berekeningsresultaten met de criteria voor schade aan gebouwen	20
4.1	Effecten van de zoutwinning	20
4.2	Effecten gaswinning	21
5	Conclusies ten aanzien van schade aan bebouwing	22
6	Bibliografie	23

1 Inleiding

In het gebied ten noordoosten van Harlingen (Harns) wordt zout gewonnen door FRISIA zout. De zouten worden door oplosmijnbouw gewonnen, wat inhoudt dat er water onder hoge druk in de diepe zoutlagen wordt gespoten, alwaar de zouten oplossen tot een pekkel met hoge zoutconcentratie (voornamelijk natrium-chloridezout, ofwel keukenzout). Op dit moment wint FRISIA uit twee putten, BAS-1 en BAS-2, in de buurt van Sexbierum (Seisbjerrum), die zich op een diepte van ongeveer 2500 - 3000 meter onder het maaiveld bevinden. Water wordt geïnjecteerd en pekkel wordt naar boven gehaald via in deze putten afgehangen buizen.

Doordat het zout oplost ontstaan ondergrondse holtes (cavernes), die gevuld zijn met pekkel. Deze cavernes zijn 200-350 meter hoog en bereiken in de praktijk een volume van 250.000 – 300.000 m³. Bij de winning treedt bodemdaling op, die het gevolg is van de toestroming van zout in de richting van de cavernes. Als gevolg van de hoge temperatuur en drukken in de ondergrond, wordt de zoutmassa relatief vloeibaar, waardoor het zout vergelijkbaar wordt met kaarsvet of asfalt op een warme zomerdag en kan gaan vloeien. Het volume zout dat richting de cavernes stroomt wordt opgevuld door de bovenliggende gesteentes die naar de beneden zakken, wat aan het maaiveld tot bodemdaling leidt.

Op gegeven moment na het begin van het oplosproces zijn de cavernes tot een stabiele maat gegroeid, waarbij de zouttoestroom naar de cavernes vrijwel gelijk is aan de zoutonttrekking. Dit is het geval vanaf ongeveer 1998. De zouttoevloei en daarmee de bodemdalingssnelheid hebben dan een evenwicht bereikt, die alleen nog van de zoutonttrekking (en dus zoutproductie in de fabriek in Harlingen) afhangt. Het volume onttrokken zout is dan bij benadering evenveel als het volume van de bodemdalingsskom.

De bodemdaling is het grootst boven de cavernes en loopt langzaam af met de afstand tot deze punten. Deze wordt regelmatig gemeten door middel van waterpasmetingen. Men bepaalt bij zo'n meting van een groot aantal punten (betonnen paaltjes in de ondergrond of bouten aan gebouwen) de daling ten opzichte van elkaar. Hieruit kan men dan de bodemdalingsskom berekenen.

GeoDelft heeft met een aan deze waterpasmetingen gekijkt berekeningsmodel de bodemdalingsskom berekend bij een zakking in het diepste punt van 35 cm bodemdaling. De waterpasmetingen zijn uitgevoerd door het bureau Oranjewoud, dat hiertoe een dicht net waterpaspunten heeft aangebracht in de omgeving van de winninglocatie. Algehele conclusie is dat de bodemdaling een zeer gelijkmatig verloop heeft en goed te correleren is aan de productie van zout. Er blijkt een direct verband te zijn tussen de bodemdaling en de ondergrondse convergentie (het volume zout dat naar de caveerne geperst is)

Met deze gegevens zijn vervolgens studies gedaan naar:

- Effect van de bodemdaling op de waterbeheersing (ten behoeve van waterschappen)
- Direct effect van de bodemdaling op gebouwen (deze studie)

1.1 Effect bodemdaling op de waterbeheersing en veiligheid zeedijk

Het effect van bodemdaling op de waterbeheersing en de veiligheid van de zeedijk is, met de bodemdalingprognoses van GeoDelft, nagegaan door het bureau Oranjewoud, in samenwerking met het waterschap. TNO NITG heeft een studie verricht naar de opbouw van de ondiepe ondergrond in het gebied die voor het evalueren van de effecten van de bodemdaling van belang is [TNO 1999b].

De studie van Oranjewoud is opgezet om een aanzet te geven voor de (aanvulling op) waterbeheersingsplannen voor de waterschappen. Uitgangspunt van dit plan is dat de sloot- en grondwaterstand in het gebied dient mee te veranderen met de bodemdaling. Bij te grote daling van de grondwaterspiegel kunnen funderingen van huizen en andere bebouwing ongelijkmatig gaan zakken door klink van klei of veen en bij een te grote stijging kunnen kelders onderlopen, kruipruimtes te vochtig worden en kunnen funderingen minder stabiel worden. Ook de landbouw kan nadelige gevolgen ondervinden van grondwaterwijzigingen als de bovengrond natter of droger wordt. Er zijn studies naar de gevoeligheid van bebouwing voor grondwaterwijzigingen voor verschillende gebieden in Nederland. Schade door waterspiegelverandering kan optreden op indien de (grond)waterstand om een of andere reden wijzigt (bijvoorbeeld om landbouwtechnische redenen, door aanpassing aan klink van de ondergrond, of bijvoorbeeld door verandering van de riolering).

Omdat de bodemdaling door de zoutwinning wijziging van de (grond)waterstand kan veroorzaken, is eventuele schade door waterspiegelwijzigingen een indirect gevolg van de zoutwinning. Zulke schade treedt niet op als de (grond)waterstand voldoende mee verandert met de direct door de zoutwinning veroorzaakte bodemdaling.

Het waterschap heeft reeds plannen gemaakt om de waterstanden in het bodemdalingsgebied aan te passen aan de bodemdaling.

De zeedijk zakt een klein beetje door de zoutwinning (minder dan 10 cm). De kans op overstroming van de dijk wordt door de daling niet of verwaarsloosbaar groter omdat bij aanleg van de dijk al met niet goed te voorziene daling van de kruin van de dijk door verschillende oorzaken rekening is gehouden, met name daling door klink van de aangelegde dijk en de ondergrond. Wel zal bij gepland algemeen ophoogwerk, verband houdend met zeespiegelrijzing en een streven naar lagere overstromingskansen, de dijk ter hoogte van de dalingskom enige centimeters extra worden opgehoogd op kosten van FRISIA ter compensatie van de bodemdaling.

1.2 Kans op schade door aardtrillingen als gevolg van zoutwinning

Het zich voordoen van voelbare bevingen bij oplosmijnbouw is heel ongebruikelijk, waarschijnlijk omdat het zout waar de cavernes door omringd zijn zodanig plastisch is dat er geen schokken optreden bij de vervorming en omdat zulke zoutwinning niet vaak plaatsvindt bij grotere breuken. Gas- en oliewinning is juist wel vaak bij grotere breuken, omdat bij onder andere zulke breuken zich juist aardgas ophoopt. Er is tot op heden geen enkele trilling in het gebied van de zoutwinning gerapporteerd.

Opgemerkt wordt dat de schadeveroorzakende bevingen die bij mijnbouw kunnen optreden (bij de winning van gas, olie, kolen, en dergelijke) vaak voorafgegaan worden door lichtere aardbevingen (zoals bevingen waarbij kopjes op tafel kunnen gaan trillen).

1.3 Direct effect van de bodemdaling op constructies

Behalve schade door wijziging van de grondwaterstand, is het mogelijk dat er directe schade optreedt door bodemdaling, die niet door een goed grondwaterbeheer voorkomen kan worden.

De bodemdaling in het gebied heeft een zeer gelijkmatig verloop in tegenstelling tot de ongelijkmatige bodemdaling, zoals bijvoorbeeld bij instortingskraters, die bij ondiepe mijnbouw wel voor kan komen. Bij zulke ongelijkmatige bodemdaling kan schade ontstaan door grote relatieve verplaatsingen in de grond onder een constructie waarbij gemakkelijk scheuren ontstaan.

Dit rapport vergelijkt de bodemvervorming, zoals deze berekend is voor de maximale bodemdaling, met vergelijkingsmateriaal uit velerlei bronnen om te kunnen bepalen wat de kans op schade is. Deze bronnen komen niet allemaal uit de mijnbouw, maar ook uit de normale bouw. Vergelijkbare of veel ernstiger bodemvervormingen komen namelijk veel voor bij het graven van tunnels, het graven van bouwputten en bij klink door grondwaterstandswijzigingen.

Het is de algemene conclusie van dit rapport dat er weinig schade aan bebouwing te verwachten is als direct gevolg van 0,35 m bodemdaling in het centrum van een bodemdalingsskom. Dit is echter geen garantie dat hierdoor nergens schade zou kunnen optreden, omdat er speciale omstandigheden kunnen bestaan bijvoorbeeld met betrekking tot de toestand van een huis en de ondergrond. In voorkomende gevallen zal een nader onderzoek van een specifiek huis of gebouw en zijn specifieke ondergrond moeten gaan uitwijzen of de directe bodemdaling invloed heeft gehad en of de geconstateerde scheuren hiertoe te herleiden zijn.

1.4 Afhandeling van de gevolgen van bodembeweging

De afhandeling van schade door de zoutwinning is geen onderdeel van de hier gerapporteerde studie en is een kwestie tussen de schadehebbende en schadeveroorzaker. Voor de volledigheid wordt hier een overzicht van de betrokkenen gegeven.

Belangrijke betrokkenen bij de mijnbouwactiviteiten en bij mogelijke schade daardoor zijn, naast FRISIA, het waterschap, Staatstoezicht op de Mijnen, de gemeenten en de provincie Fryslân.

Het waterschap in het betrokken gebied is de verantwoordelijke instantie voor het waterbeheer, inclusief invloeden op de grondwaterstanden. FRISIA is niet bevoegd waterstanden te wijzigen. Klachten over een te hoge of lage grondwaterstand moeten dan ook in eerste instantie bij het waterschap gedeponereerd worden.

De controle op de mijnbouwactiviteiten geschiedt door de Dienst Staatstoezicht op de Mijnen (SodM) te Voorburg. Deze dienst valt onder het Ministerie van Economische Zaken. Het SodM controleert de mijnondernemingen op (onder andere) het naleven van de voorschriften, zoals die in de Mijnwet, de concessie en andere wetten en voorschriften staan. Deze dienst controleert ook of de bodemdalings-

metingen met voldoende precisie wordt uitgevoerd door een onafhankelijke en kundige firma. Het SodM beoordeelt ook de bodemdalingvoorspellingen en de rapporten die geschreven worden rondom mijnbouwkundige aspecten. De dienst voert ook het voorwerk uit met betrekking tot verlening van de vergunningen en concessies voor het Ministerie van Economische Zaken.

Het ministerie van Economische Zaken heeft verder een Technische Commissie Bodem Beweging (TCBB) opgericht, die de minister adviseert op gebied van bodembeweging en schadeafhandeling. De commissie kan ook claims van derden tegen een mijnbouwmaatschappij afhandelen, mits de indiener van de claim eerst (tevergeefs) geprobeerd heeft de claim met de mijnbouwmaatschappij zelf te regelen.

De provincie, de gemeenten en het waterschap zijn ook op de hoogte van de aspecten rond de bodemdaling, maar zijn geen wettelijk verantwoordelijke instanties voor de mijnbouw en de bodemdaling. Omdat zij wel een belangrijke rol hebben als beheerder van het gebied waar de bodemdaling door zoutwinning optreedt en omdat zij een verantwoordelijkheid hebben naar de burger, volgen zij de gevolgen en de te treffen maatregelen kritisch.

FRISIA heeft eenzijdig een protocol opgesteld en gedeponerd, waarin de procedure is beschreven inzake de vergoeding van kosten die veroorzaakt worden door zoutwinning door FRISIA in de provincie Fryslân.

2 Vervorming van de bovengrond

2.1 Zoutwinning en bodemdaling

Alle mijnbouw (en andere ondergrondse bouw) heeft te maken met bodemdaling. Door een gat in de diepe ondergrond te maken wordt het natuurlijke krachtenspel in de gesteentes verstoord met meestal als gevolg dat de bodem gaat dalen. Het gewicht van alle boven het gat liggende grond en gesteente moet herverdeeld worden rondom dat gat. Nu heeft zout een zeer speciale eigenschap ten opzichte van vrijwel alle andere gesteentes: het kan vervormen bij relatief lage spanningen en binnen relatief korte tijd. Zout kan vergeleken worden met materialen als asfalt of kaarsvet, waarvan het gedrag ergens tussen een vast en een vloeibaar materiaal zitten. Hoe hoger de druk op het materiaal, hoe hoger de temperatuur en hoe langer men wacht, des te meer kan zout vervormen (zonder te breken of te scheuren).

Indien de drukken binnenin de zoutcaverne aanzienlijk lager zijn dan de druk (gemiddelde spanning) in de zoutlagen, stroomt het zout naar de caverne toe. Dicht bij de cavernes stroomt het zout het snelst en wordt de zoutlaag iets dunner. De gesteentes boven de zoutlaag zakken mee naar beneden, waardoor een bodemdalingskom ontstaat.

De meeste zoutcavernes in steenzout (keukenzout) op 1000 tot 1500 diepte, waarin geen zout meer wordt opgelost, worden 1- 2% per jaar kleiner door dit toevloeien van zout. Het toevloeien wordt caverne-convergentie genoemd. De bodemdaling bedraagt in die gevallen meestal niet meer dan enkele millimeters per jaar en gaat lange tijd door.

De winning door FRISIA volgt een andere strategie. Hierbij convergeren de zoutcavernes wel 70-100% per jaar: ondanks de voortdurende zoutwinning worden de cavernes niet of nauwelijks groter vanwege deze winningstrategie. De bodemdaling volgt daarbij direct de zoutwinning en er resteert daardoor slechts een geringe daling na het beëindigen van de winning.

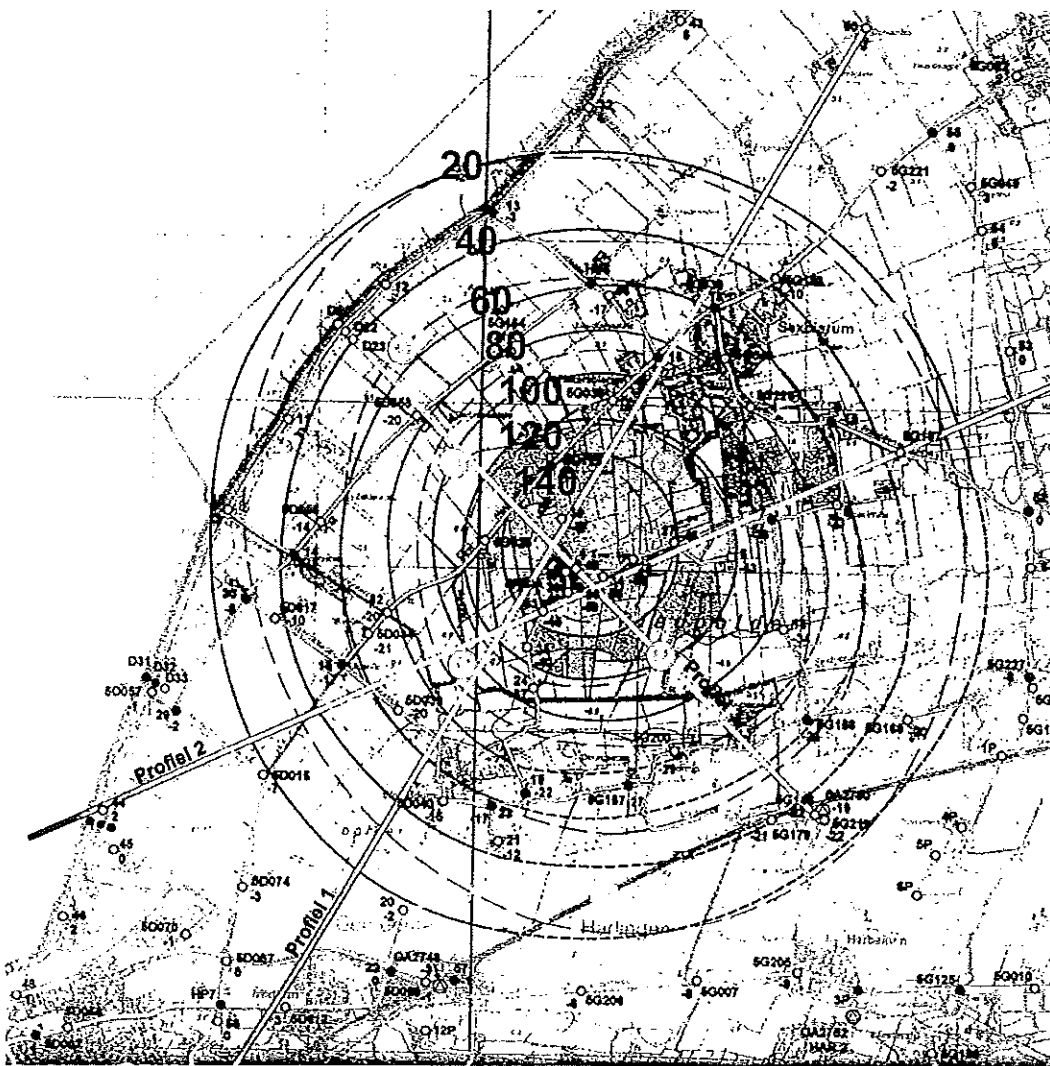
2.2 Bodemdaling door gaswinning

In de regio wordt gas uit de diepe ondergrond gewonnen. Ook deze mijnbouw gaat gepaard met bodemdaling doordat het gesteente waar het gas uit gewonnen wordt enigszins wordt samengedrukt. De gasvelden waaruit het gas wordt gewonnen beslaan echter een groter gebied dan de cavernes bij zoutwinning en de bodemdaling door gaswinning bedraagt maximaal enige centimeters in het zoutwinningsgebied aan de zuidoostkant van de dalingsschotel. Bij cavernes en in de richting van de zeedijk zal er geen invloed van gaswinning meer meetbaar zijn.

2.3 Metingen en voorspellingen bodemdaling

Het bedrijf Oranjewoud heeft een netwerk van bodemdalingpunten in het gebied geplaatst. Via een zogeheten "waterpassing" wordt van een zeer groot aantal punten bepaald hoeveel deze gezakt zijn. De punten zijn meestal aan goed gefundeerde gebouwen of speciaal geplaatste betonnen palen bevestigd. Zou men dit niet doen, dan zou men ook de wisselende effecten van zomer en winter, inclusief wisselende grondwaterstanden, op de bovengrond meten. Bovendien zouden de meetpunten

verstoord kunnen worden door bijvoorbeeld passerende zware voertuigen. Zonder goede fundering van de meetpunten zou de meting van de directe bodemdaling door zoutwinning erg onnauwkeurig door zulke invloeden. Door de daling van alle punten te meten kan een plaatje gemaakt worden met contouren. Contouren zijn in dit geval lijnen met gelijke dalingen. Figuur 2.1 is zo'n meting (waterpassing) uit 2000. Het geheel van lijnen maakt de bodemdaling inzichtelijk op een plattegrond. Het diepste deel van de kom is hier ongeveer 14 cm gedaald.



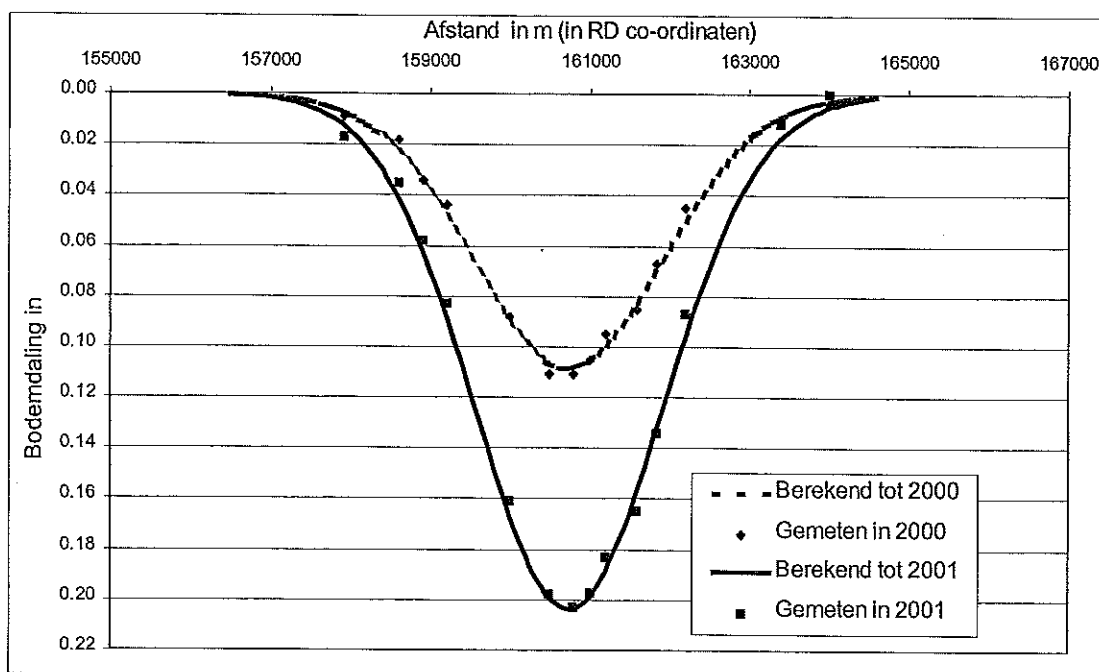
Figuur 2.1: Contourlijnen van de bodemdaling volgens de waterpassing meting in 2000, (zakking in millimeters aangegeven) [Oranjewoud 2000].

Een waterpassing geeft overigens geen perfect beeld van de zakking door zoutwinning:

- De meting maakt geen verschil maken tussen zakking door zoutwinning en zakking (of stijging) door andere oorzaken (gaswinning, klink van toplagen door waterstandverlaging of graafwerkzaamheden et cetera, en natuurlijke processen)
- Er kan niet overal gemeten worden

Om deze nadelen te compenseren en om bodemdaling te voorspellen is een bodemdalingmodel opgesteld, dat een verband legt tussen de bodemdaling door zoutwinning en de zoutwinning zelf (het toevloeien van zout in de caveerne). Het model [Fokker et al. 2000] is gebleken zeer goed de gemeten bodemdaling te kunnen voorspellen voor de zoutwinning bij Veendam [GD 1997], [GD 1999a]. Met dit model kan ook de bodemdaling van de zoutwinning op de FRISIA locatie goed worden gemodelleerd. In de Figuur 2.2 worden de op de FRISIA winlocatie gemeten bodemdaling en de met genoemd model berekende bodemdaling vergeleken.

De bodemdaling is, zoals de Figuur 2.1 laat zien, zeer regelmatig van vorm. Dit wijst erop dat de daling door het verdwijnen van zout in de ondergrond geheel door elastische vervorming van de gesteentes boven het zout wordt doorgegeven. De gesteentelagen buigen gewoon ietsje door.



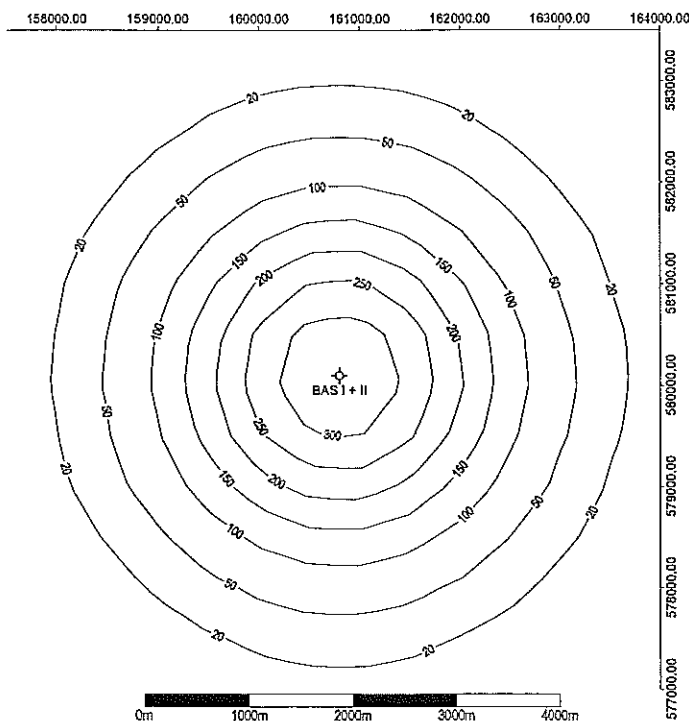
Figuur 2.2: Vergelijking van de berekende met de gemeten bodemdaling voor een west – oostprofiel over het centrum van de bodemdalingsskom voor metingen in 2000 en 2001. Voor de berekening is uitgegaan van de productie van zout uit de onderliggende cavernes BAS I en BAS II tot de genoemde jaren.

Met de huidige kennis van zaken is de bodemdaling betrekkelijk eenvoudig te bepalen. We weten dat de cavernes niet veel groter worden en de hoeveelheid zout die naar de cavernes toestroomt is te berekenen uit de productiecijfers van de winning. De bodemdalingssnelheid zal dan ook vrijwel samenhangen met het afnemen van pekkel door FRISIA. Dit laatste is meteen de grootste onzekerheid in het voorspellen van de bodemdalingssnelheid over langere termijn: de afname van FRISIA is natuurlijk van de marktomstandigheden (verkoop) in de toekomst afhankelijk.

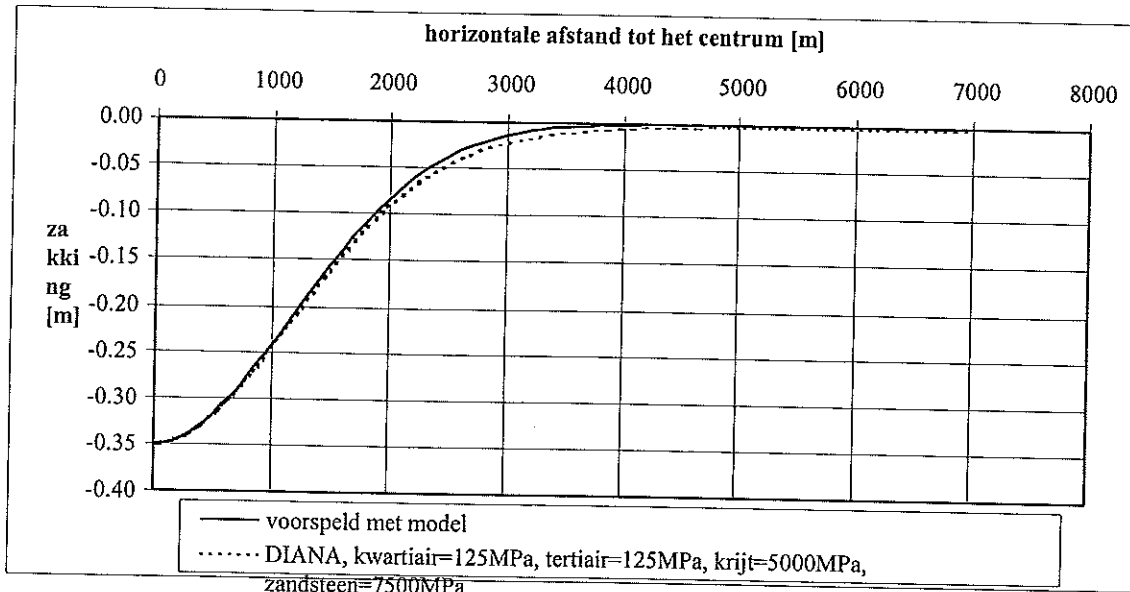
Absolute bodemdaling levert echter geen schade op. Als alles zakt of stijgt, dus ook het huis en de waterstand, treedt er geen schade op. Schade kan optreden doordat de bodemdaling varieert in de dalingskom.

De vorm van de bodemdalingskom kan echter goed berekend worden voor een geplande productie van zout voor een caveerne of een groep cavernes. De vorm van de bodemdalingskom is vrijwel niet afhankelijk van de bodemdalingsnelheid en kan daarom min of meer los worden gezien van het tijdstip dat deze daadwerkelijk is opgetreden. Ook geldt voor vervorming van de grond, zoals de helling van de kom, horizontale rek, kromming en dergelijke, dat deze vrijwel met een constante verhouding verandert met de maximale bodemdaling. Bij 30 cm bodemdaling is de helling tweemaal zo steil, de kom twee maal zo diep, de kromming twee maal zo groot enzovoorts, als bij 15 cm bodemdaling.

Als de onttrekkingspunten gelijk blijven (dus geen nieuwe cavernes op andere locaties) zakken alle punten in een vaste verhouding met de maximale zakking. Als de maximale zakking in het midden van de kom verdubbelt (van 10 naar 20 cm), verdubbelen ook alle andere waarden verder weg ook, bijvoorbeeld van 5 naar 10 cm. Hiervan zijn dan bodemdalings-kaarten te maken, die dienen voor bijvoorbeeld het waterschap. Deze willen graag jaren van tevoren weten hoe de situatie gaat worden, omdat het maken en uitvoeren van waterbeheersingsplannen ook jaren kost. Figuur 2.3 geeft de voorspelling van de bodemdaling door zoutwinning waarbij 35 cm bodemdaling is opgetreden in het centrum van de kom. In Bijlage III is deze bodemdaling op een topografische kaart van de omgeving van Harlingen geprojecteerd. De kaartcoördinaten op de bijlage zijn die van het Rijksdriehoeknet met onderlinge afstand van 1 km.



Figuur 2.3: Bodemdalingprojectie in millimeters door zoutwinning zoals voorspeld met het analytische model voor een maximum daling in het centrum van de kom van 35 cm. De assen geven de Rijksdriehoeksnet co-ordinaten (ongeveer in meters).



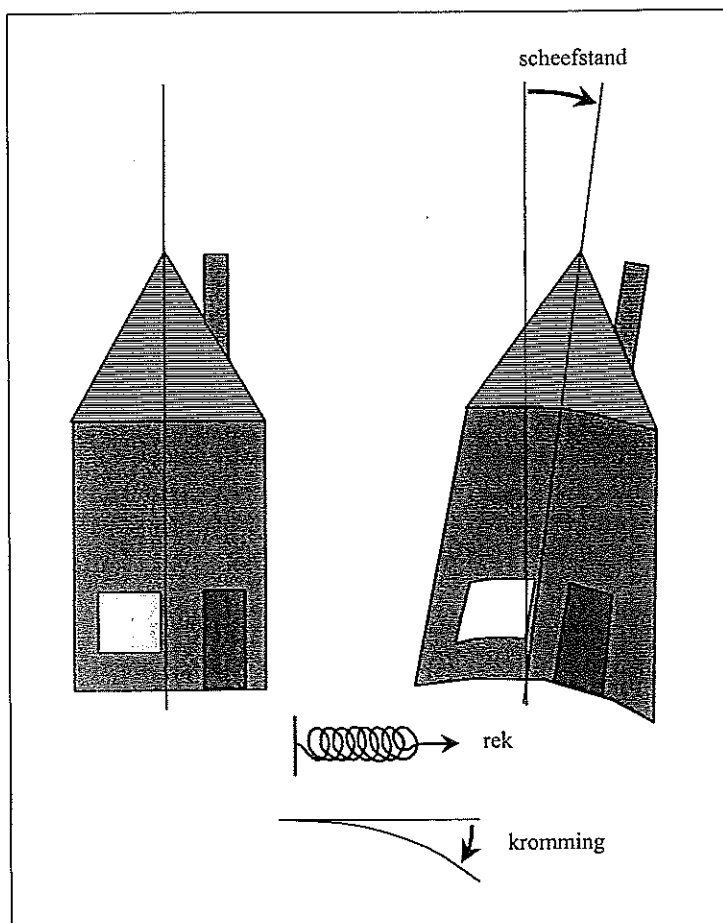
Figuur 2.4: Noord-Zuid dwarsdoorsnede van de bodemdalingskom. Zowel het analytische voorspellingsmodel (volgens formule) als de computersimulatie van de bodemdalingskom zijn weergegeven voor de dwarsdoorsnede (zie Bijlage II voor beschrijving computersimulatie). De significante bodemdaling van 2 cm treedt op 2800 m uit het centrum van de kom op.

2.4 Vervorming in de grond en in gebouwen

De vervorming in de bodem ten gevolge van de geleidelijke variatie in bodemdaling kan worden onderverdeeld in (zie Figuur 2.5):

- Helling
- kromming
- Rek (trek – stuik)

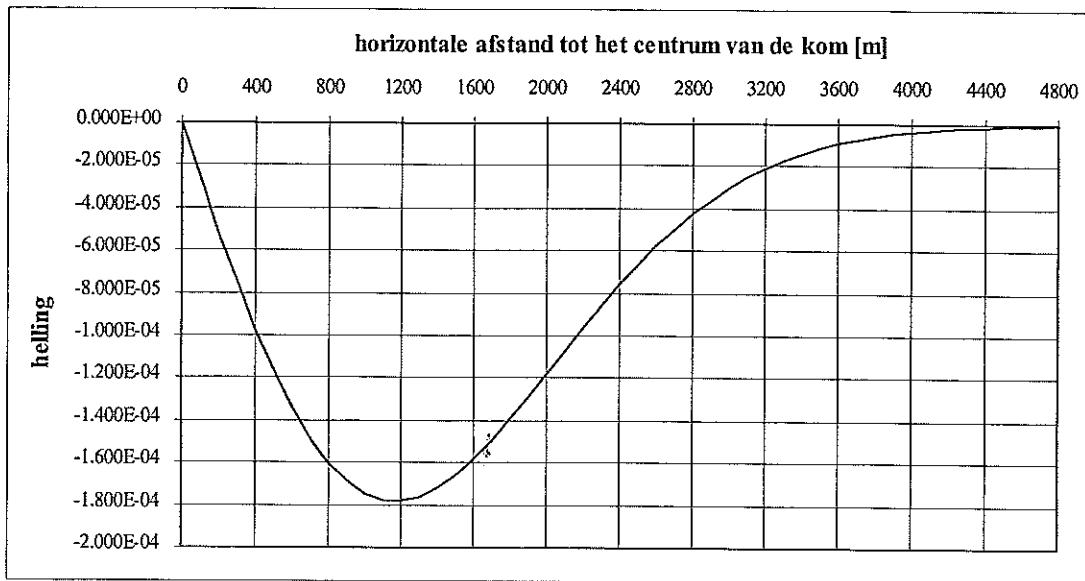
Een gebouw zal de vervorming in de bodem deels volgen, maar doordat de fundering van een gebouw over het algemeen veel stijver is dan de bodem zullen met name de kromming en horizontale rek in het gebouw significant kleiner zijn dan de kromming en rek in de bodem. Met de berekeningen van de bodemdaling kan de vervorming van de bodem worden bepaald en de totale vervorming van de gebouwen is dan altijd kleiner.



Figuur 2.5: Schets van scheefstand, kromming en rek van een gebouw.

2.4.1 Helling en scheefstand

De helling van de bodem ten gevolge van variatie in bodemdaling heeft scheefstand van een constructie tot gevolg. Wanneer een gehele constructie een klein beetje scheef komt te staan, zal er in het algemeen geen sprake zijn van constructieve schade. Wel kan bij wat verdergaande scheefstand het woongenot van het huis verminderen. De scheefstand kan voor een specifieke locatie berekend worden door het verschil in zakking tussen twee dalingscontouren te delen door de afstand tussen de twee contouren. De helling in de bodem behorende bij een maximale bodemdaling van 35 cm in het centrum van de kom is weergegeven in Figuur 2.6. De maximale helling in het FRISIA bodemdalinggebied bij 35 cm daling bedraagt 0.00018, overeenkomend met 1:5556, ofwel 1 cm hoogteverschil over 55.6 meter lengte, waarmee het effect ervan voor een woning kan worden beoordeeld.

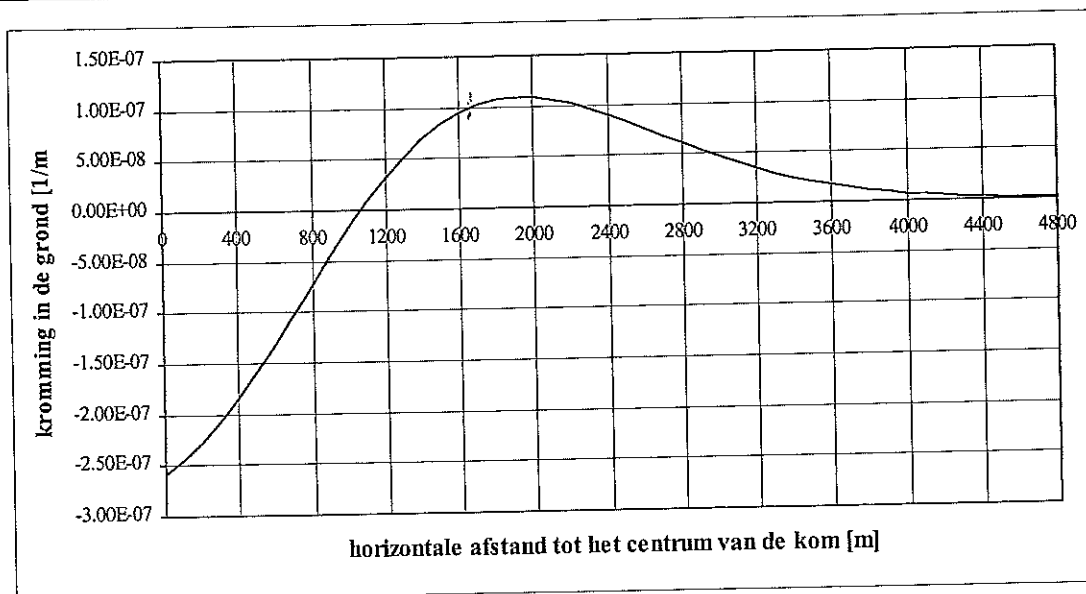


Figuur 2.6: Helling in de bodem als functie van de afstand tot het centrum van de kom.

2.4.2 Kromming, kromtestraal en relatieve rotatie

Bij kromming kantelt het oppervlak onder een constructie niet gelijkmatig, maar varieert de scheefstand over de lengte van het gebouw. Kromming kan zowel bol als hol zijn. De kromming van de bodem zal voor een deel worden doorgegeven aan het gebouw. De mate waarin is afhankelijk van de stijfheid van het gebouw. Gemetselde schuren van oude boerderijen zullen bijvoorbeeld makkelijker meebewegen met de grond dan de muren van op beton gefundeerde woningen. De kromming die een gebouw ondergaat kan aanleiding geven tot scheurvorming. Bij een lang en hoog gebouw zal dit eerder het geval zijn dan bij een kort en laag gebouw. Als er schade optreedt, zullen bij een bolle kromming scheuren bovenaan het gebouw ontstaan. Bij een holle kromming zal de constructie juist de andere kant opbuigen. Scheuren zullen dan onderin optreden.

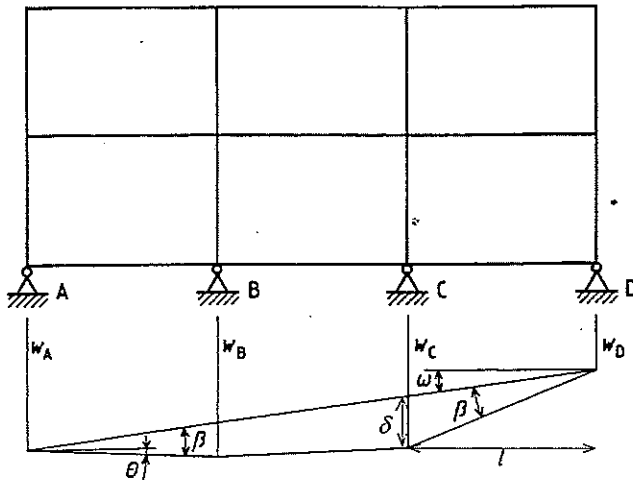
De kromming van de bodem kan berekend worden uit de helling (Figuur 2.6) door de zogenaamde afgeleide van deze helling te nemen. De kromming behorend bij de voorspelde zakkingskom met maximale bodemdaling van 35 cm is weergegeven in Figuur 2.7. De maximale kromming bedraagt $2.6 \cdot 10^{-7} \text{ m}^{-1}$ ($=0.00000026 \text{ m}^{-1}$) voor holle kromming en $1.1 \cdot 10^{-7} \text{ m}^{-1}$ ($=0.00000011 \text{ m}^{-1}$) voor bolle kromming.



Figuur 2.7: kromming van de bovengrond als functie van de afstand tot het centrum van de bodemdalingssom berekend voor de maximale bodemdaling van 35 cm.

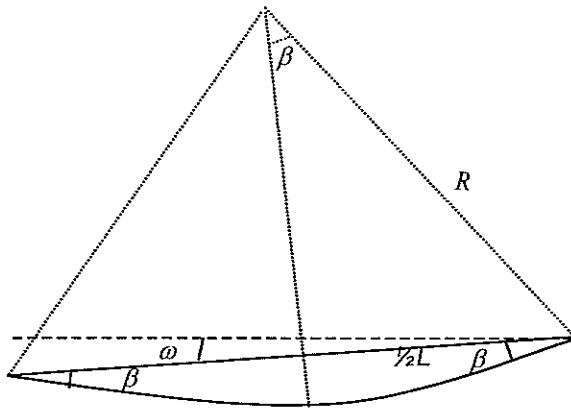
De kromming wordt hier aangeduid met het symbool κ . Een met de kromming samenhangende grootte is de kromtestraal R (dit is de inverse van de kromming, namelijk $R=1/\kappa$). De kleinste kromtestraal is maatgevend voor schade. De kleinste kromtestraal in de bodem bij maximale bodemdaling van 35 cm is voor holle kromming ongeveer 3846 km en voor bolle kromming ongeveer 9091 km.

Met betrekking tot schade aan constructies wordt vaak over de relatieve rotatie β gesproken (in de Engelstalige literatuur wordt voor β de term *angular distortion* gehanteerd). Dit is eveneens een grootte die samenhangt met de kromming. In Figuur 2.8 is de definitie van relatieve rotatie gegeven volgens [NEN 6740]. Het gaat hier om een gebouw met verscheidene funderingssegmenten. De verschilzakking tussen begin en einde van het gebouw bepaalt de scheefstand ω . De relatieve rotatie β is de hoek die een funderingssegment maakt ten opzichte van de scheefstand ω . Figuur 2.8 laat zien dat wanneer een funderingssegment een lengte l heeft en een verschilzakking δ (ten opzichte van de scheefstand), de relatieve rotatie geschreven kan worden als $\beta=\delta/l$. Deze definitie wordt veelvuldig gebruikt om de opgetreden relatieve rotatie in gebouwen te bepalen (zie [Bjerrum 1963], [Skempton 1956] en [Bell 1987]).



Figuur 2.8: Definitie van relatieve rotatie β en scheefstand ω volgens [NEN 6740].

De berekeningen in dit rapport hebben betrekking op de bodem en niet op gebouwen. Er zijn in dat geval geen funderingselementen aanwezig, en een segmentlengte l kan niet gedefinieerd worden. In plaats van “geknikt” is er een vloeiende berekende kromming. Wanneer men ervan uitgaat dat een gebouw met lengte L net zo slap is als de bodem en volledig meevervormt met de bodem, kan voor zo’n geleidelijke kromming ook een definitie gegeven worden van relatieve rotatie, zie Figuur 2.9:



Figuur 2.9: Weergave van de relatieve rotatie β .

De definitie is feitelijk dezelfde als voor een gebouw met funderingssegmenten, namelijk dat de relatieve rotatie de hoek is ten opzichte van de schuinstand ω . De maximale waarde van deze hoek is maatgevend voor schade en is de β zoals weergegeven in Figuur 2.9. De lengte van de constructie is L en de kromtestraal van de kromming R . Uit de figuur is af te lezen dat geldt:

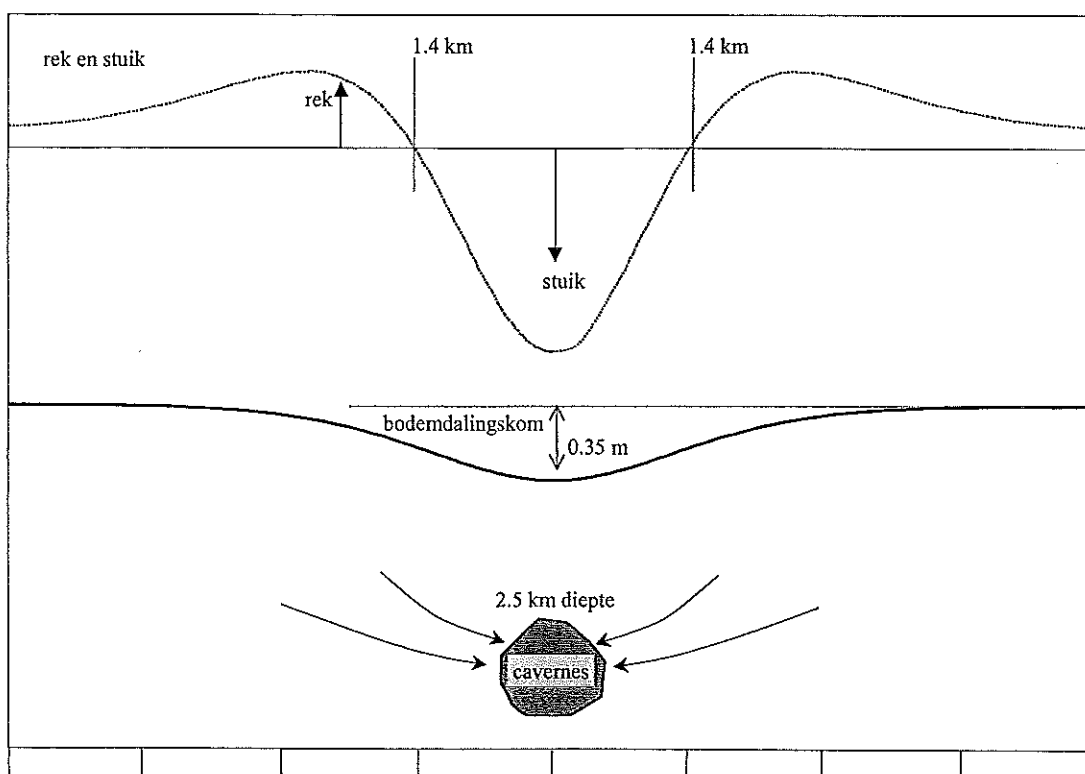
$$\sin \beta = \frac{1}{2} \frac{L}{R} \quad (2.1)$$

Algemeen geldt dat de kromtestraal R zeer groot is ten opzichte van L . Dan is de hoek β klein en kan het bovenstaande benaderd worden met $\beta = L/2R$, of uitgedrukt in kromming $\beta = \frac{1}{2} \kappa L$.

Zoals eerder vermeld is hier de kromming in de bodem berekend en niet die in het gebouw. De kromming in het gebouw zal altijd kleiner zijn vanwege de grotere stijfheid van de fundering. De kromtestraal in het gebouw is in werkelijkheid dus altijd groter en de waarde van de relatieve rotatie β zal voor een gebouw kleiner zijn dan hier berekend aan de hand van de vervorming in de bodem.

2.4.3 Horizontale rek

Behalve hellen en buigen rekt het grondoppervlak in de richting van het midden van de kom (in radiale richting, d.w.z. loodrecht op de dalingscontouren, in de richting van het midden van de kom). Op grotere afstand van het centrum van de kom wordt de grond uiteengerekt en dichterbij het centrum van de kom wordt het maaiveld ineengedrukt, stuikt (Figuur 2.10). In de zogenaamde tangentele- of omtreksrichting (in de richting van de zakkings-contourlijnen) stuikt (verkort) alle grond. Men kan zich dit voorstellen als men bedenkt dat alle grond een klein beetje naar de caveerne wordt toegezogen, dus niet alleen naar beneden, maar ook naar het middelpunt van de kom toe. Als alle grond naar het middelpunt beweegt (centrum van de kom) wordt alles een klein beetje in elkaar gedrukt. Verder van de kom vandaan wordt het verkorten van het oppervlak in het centrum weer opgevangen doordat de grond een beetje uitrekt, en wel op meer dan 1.4 km afstand waar dan trekrek (verlenging) optreedt.



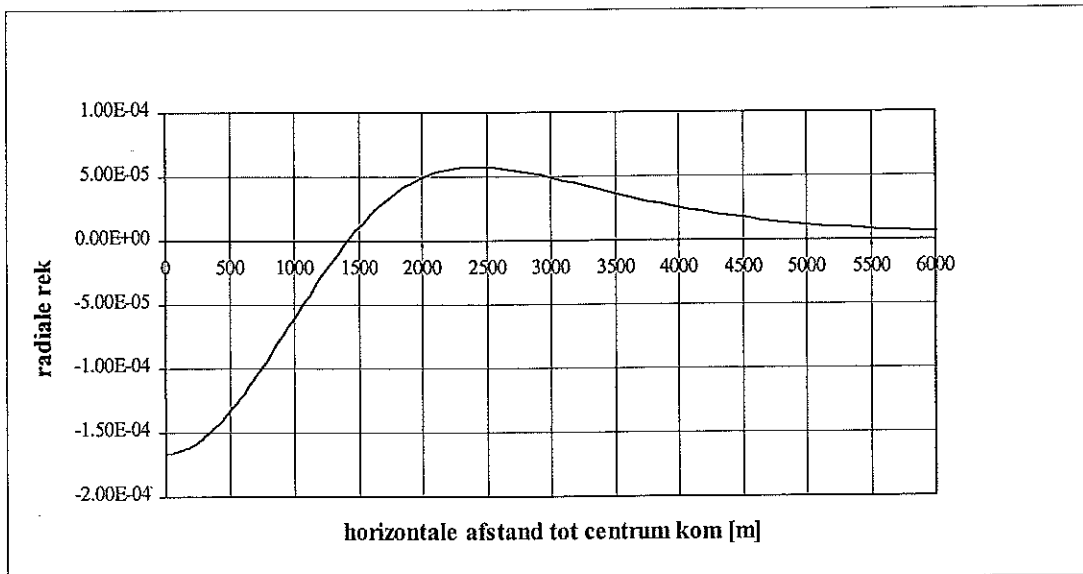
Figuur 2.10: Visualisatie van de zones van trekrek en stuikrek van de bovengrond door zoutwinning voor een kom van maximaal 35 cm diep.

De horizontale rek in de bodem zal voor een deel worden doorgegeven aan het gebouw. Bij (trek)rek wordt de grond licht uitgerekt, waardoor gebouwen mee kunnen rekken (langer worden), bij stuik wordt het grondoppervlak korter en kunnen gebouwen een beetje ingedrukt worden. De mate waarin een gebouw met de grond meerekt is, net als voor kromming, afhankelijk van de stijfheid van het gebouw. Muren van los metselwerk, zoals van schuren van oude boerderijen, zullen bijvoorbeeld gemakkelijker meebewegen met de grond dan de muren van woningen die op betonnen balken of platen staan.

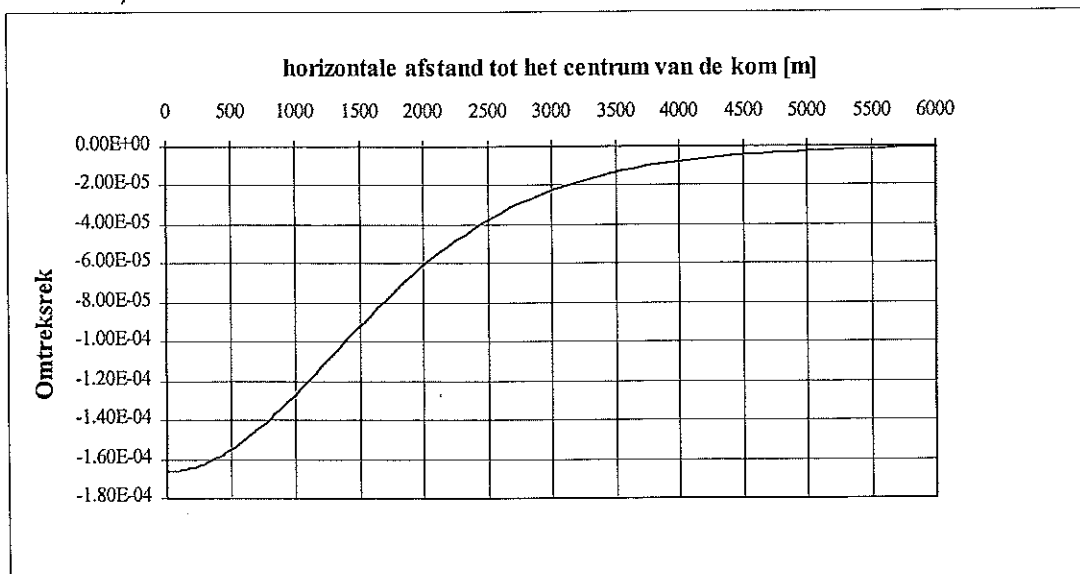
Nu kan steen en beton heel veel stuik en druk aan. Trek is echter kritischer: het is veel makkelijker steen te breken door hem te buigen, plaatselijk te rekken, dan steen kapot te drukken. Een lange muur die in de richting van het diepste punt van de kom staat (radiaal) en die meer dan 1.4 kilometer uit het midden van de kom staat, kan op trek belast worden. Bouwwerken in de buitenste ringen van de kom (20-50% van de maximale daling) ondervinden daarom meer horizontale rek dan bouwwerken in het hart van de kom.

De rek van de grond valt niet direct af te leiden uit de bodemdalingskom, maar moet berekend worden. Via een computersimulatie van het gedrag van de ondergrond kan hier een goed inzicht in verkregen worden. In Bijlage II zijn de technische details van de simulatie weergegeven, waarbij een model is opgezet waarin de kruip van zout en de elastische vervorming van de bovengrond is beschreven. De stijfheid van de gesteentelagen is zo gekozen dat de voorspelde bodemdalingskom, zoals in Figuur 2.4 is weergegeven, door het model gesimuleerd wordt. Met deze computersimulatie kunnen de horizontale rekken worden vastgesteld. Dit zijn de radiale rek en de omtreksrek aan het maaiveld als functie van de afstand tot het centrum van de kom, zie Figuur 2.11 en Figuur 2.12. De maximale trekrek in de bodem volgend uit deze studie ligt rond de 0.06‰, ofwel 0.6 mm op 10 meter. De maximale stuikrek in de bodem bedraagt circa 0.17‰, ofwel 1.7 mm op 10 meter. Deze vervorming zou optreden in de bodem als er een dergelijke bodemdaling, van 35 cm, zou optreden waarvoor een tijdsperiode van meer dan 10 jaar wordt aangenomen.

Zoals eerder vermeld wordt over het algemeen de rek van de bovengrond maar voor een klein gedeelte door een bouwwerk opgenomen, tenzij de fundering zeer slap is (zoals gemetselde schuren van oude boerderijen), zodat het effect van de grondvervorming op de constructie over het algemeen kleiner is.



Figuur 2.11: Radiale rek in de bodem als functie van de afstand tot het middelpunt van de kom. In het diepste deel de rek negatief, wat inhoudt dat de grond verkort (stuik). Op een afstand van 1,4 km of meer van het centrum van de kom treedt trekrek op in richting van het diepste deel van de kom.



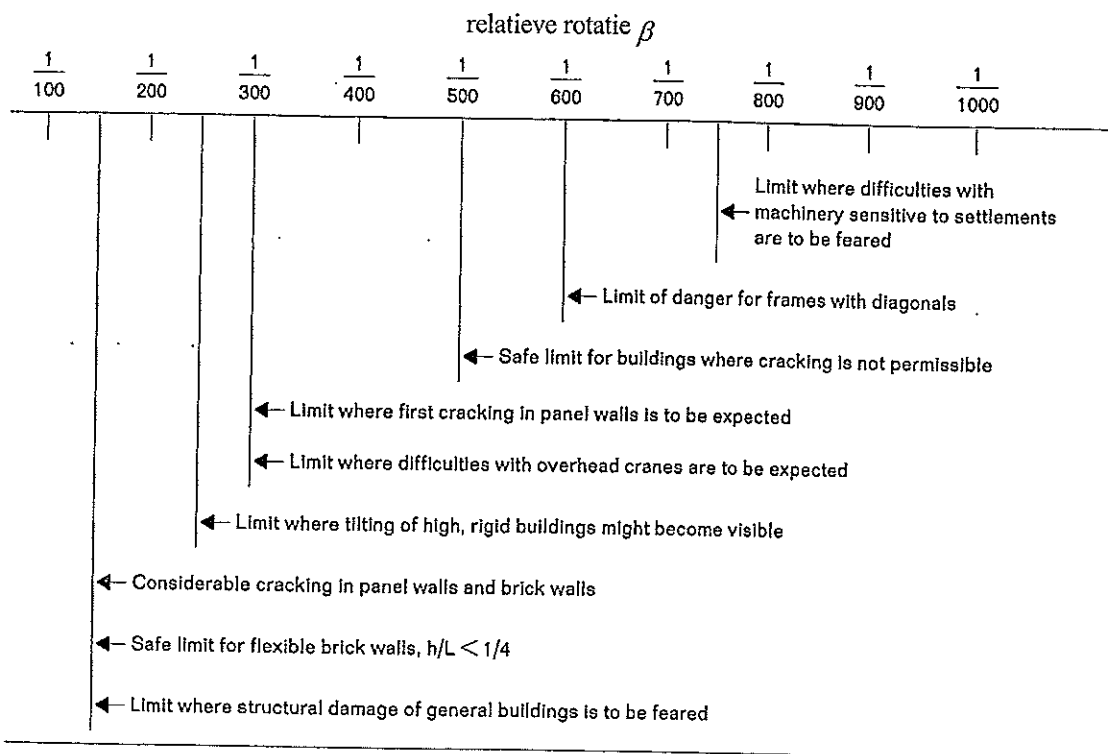
Figuur 2.12: Tangentiële of omtreksrek in de bodemdaling, in de richting van de lijnen van gelijke bodemdaling (loodrecht op de richting naar het diepste punt van de kom). Alle rekken zijn negatief, wat inhoudt dat de grond altijd verkort (stuikt).

3 Criteria voor schade aan gebouwen

Voor het mogelijk optreden van schade aan gebouwen door bodemdaling ten gevolge van mijnbouw of tunnelbouw bestaat in Nederland geen norm. Dit is ook het geval in landen als Duitsland en Engeland. In de literatuur zijn wel richtlijnen te vinden waar horizontale rekken en relatieve rotatie (kromming) ten gevolge van mijnbouw binnen moeten blijven om schade aan gebouwen te voorkomen [Boscardin 1989], [NCB 1975], [Bell 1987] en [Sambeek 2000]. De daarin gevonden waarden voor vervormingen en schade zijn in overeenstemming met niet gepubliceerd onderzoek van TNO Bouw in Nederland betreffende vervorming van metselwerk.

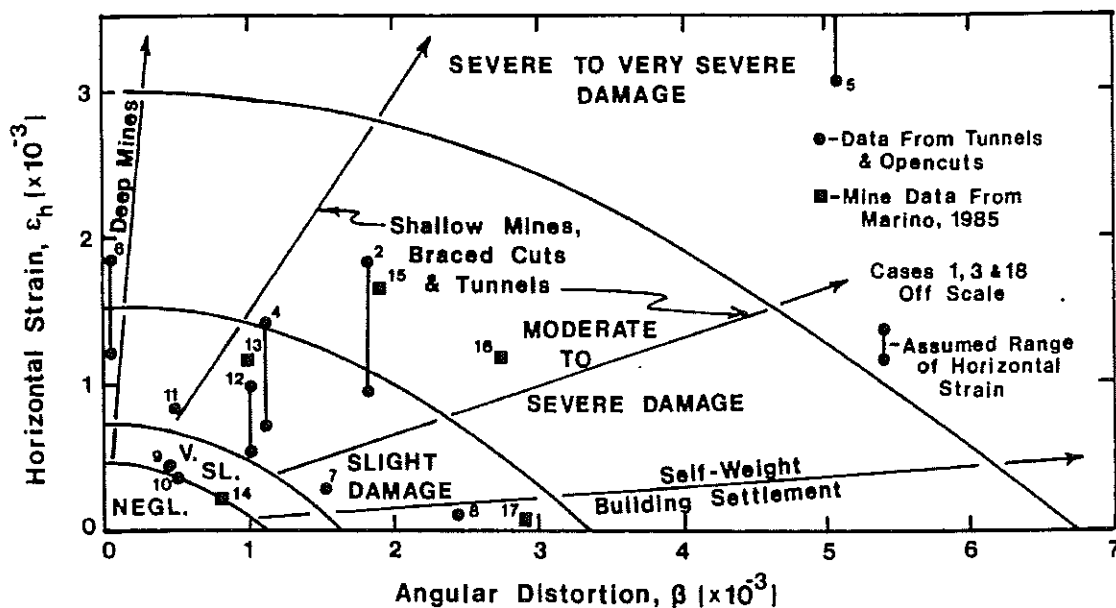
De Nederlandse [NEN 6740] norm geeft aan dat een gebouw een relatieve rotatie β (grootheid gerelateerd aan kromming, zie hoofdstuk 2) van 1:300 mag hebben. Het gaat daarbij om de totale toelaatbare waarde. Niet bekend is de huidige relatieve rotatie van een gebouw ten gevolge van inhomogeniteiten in de bodem of belastingsverschillen en dergelijke. De nog toelaatbaar geachte relatieve rotatie ten gevolge van ondergronds bouwen of mijnbouw is daarom niet gespecificeerd.

[Bjerrum 1963] beschrijft in detail welke schade te verwachten is bij welke waarde van de relatieve rotatie β , zie Figuur 3.1. Hierbij maakt hij gebruik van de resultaten van [Skempton 1956] die een uitgebreid onderzoek beschrijft van waargenomen schade aan gebouwen. Het gaat hier eveneens om totale vervorming, niet slechts die tengevolge van mijnbouw.



Figuur 3.1: Schadecriteria voor relatieve rotatie β van [Bjerrum 1963].

De resultaten van de studie van [Boscardin 1989] hebben wel rechtstreeks betrekking op schade aan gebouwen door relatieve rotatie β ("angular distortion") en horizontale rek (bij trek) ten gevolge van mijnbouw en ondergronds bouwen, zie Figuur 3.2. Wanneer rek en relatieve rotatie berekend zijn, correspondeert dit met een punt in de figuur. Het gebied waarin dit punt ligt geeft dan de mate van schade aan, van verwaarloosbaar ("Negl." in de figuur) tot ernstige of zeer ernstige schade (gebied "Severe to very severe damage" in de figuur).



Figuur 3.2: Relatie tussen schade en horizontale (trek) rekken en relatieve rotatie β ("angular distortion") uit [Boscardin 1989].

In het boek "Bergschadenkunde" [Kratzsch 1974], wordt ingegaan op schadecriteria gehanteerd in Engeland, Polen en de Sovjetunie, zie Figuur 3.3. Er zijn diverse schadeklassen aangegeven.

Vergelijk zal gemaakt worden voor klasse I, de klasse met het strengste schadecriterium. De eerste kolom van de tabel geeft de criteria voor horizontale vervorming van de British National Coal Board, zoals opgenomen in het Subsidence Engineer's Handbook [NCB 1975]. Hier wordt als criterium voor de horizontale (trek-) rek 0.5 mm/m gehanteerd, ofwel 0.5 ‰. De tweede kolom geeft criteria gehanteerd in Polen. Hier wordt voor klasse I voor de horizontale (trek)rek 1.5 mm/m gehanteerd, ofwel 1.5 ‰. Ook staat er een criterium voor scheefstand van 2.5 mm/m. Kolom drie geeft de strengste criteria weer voor de Sovjetunie, een horizontale (trek)rek van 2.0 mm/m, een scheefstand van 4 mm/m (1:250) en een minimum kromtestraal van 20 km.

Figuur:
0.6 mm/m

Klasse	Großbritannien	Polen	Sowjetunion	
			Donezgebiet	Karagandagebiet
I	Kleine Putzrisse Längenänderung des Bauwerks $\Delta s = 3$ cm; für 60 m Länge 0,5 mm/m	nur Haarrisse im Putz zuge- lassen zul. Schiefl. 2,5 mm/m; zul. Längenänd. 1,5 mm/m	Zugelassen: Schiefl. 4 mm/m Krümmungsradius 20 km Längenänderung 2 mm/m	Zugelassen: Schieflage 6 mm/m Krümmungsradius 3 km Längenänderung 4 mm/m
II	Mehrere leichte Innenwandrisse $\Delta s = 3 - 6$ cm $\epsilon = 0,5 - 1$ mm/m	Schäden müs- sen reparier- bar sein $v'_z = 5$ mm/m $\epsilon = 3$ mm/m	über 5 Stockw. $v'_z = 4,5$ mm/m $\rho_z = 18$ km $\epsilon = 2,5$ mm/m	$v'_z = 11$ mm/m $\rho_z = 1,5$ km $\epsilon = 7$ mm/m
III	Kleine Außen- wandrisse, Türen klemmen $\Delta s = 6 - 12$ cm $\epsilon = 1 - 2$ mm/m	Schäden dürfen Funktion des Bauwerks nicht beeinträchtigen. $v'_z = 10$ mm/m $\epsilon = 6$ mm/m	3 u. 4 Stockw. $v'_z = 5$ mm/m $\rho_z = 12$ km $\epsilon = 3,5$ mm/m	$v'_z = 16$ mm/m $\rho_z = 1$ km $\epsilon = 10$ mm/m
IV	Schwere Schäden Offene Risse $\Delta s = 12 - 20$ cm $\epsilon = 2 - 3$ mm/m	Bauwerke müs- sen genügend Widerstand leisten $v'_z = 15$ mm/m $\epsilon = 9$ mm/m	2 Stockwerke $v'_z = 8$ mm/m $\rho_z = 5,5$ km $\epsilon = 6$ mm/m	—
V	Sehr schwere Schäden teilweiser Neu- bau erforderl. Δs über 20 cm $\epsilon > 3$ mm/m	—	1 Stockwerk $v'_z = 10$ mm/m $\rho_z = 3$ km $\epsilon = 7,5$ mm/m	—
VI	—	—	1 Stockwerk $v'_z = 25$ mm/m $\rho_z = 1$ km $\epsilon = 14$ mm/m	—

Figuur 3.3: Tabel voor schadecriteria uit [Kratzsch 1974]. Eerste kolom is zijn de criteria uit het Subsidence Engineer's Handbook van de British National Coal Board.

In [Sambeek 2000] wordt als schadecriterium voor horizontale rekken ten gevolge van mijnbouw gehanteerd dat de rek (bij trek) beneden 5.0 ‰ (5 mm op 1 m) moet liggen om geen schade te veroorzaken aan gebouwen met stalen frame en dat de horizontale rek kleiner moet zijn dan 0.5 ‰ (5 mm op 10 meter) om geen scheuren te veroorzaken in pleister of mortel, een beeld dat overeenstemt met de eerste kolom in Figuur 3.3 van [Kratzsch 1974]. Verder hanteert [Sambeek 2000] als criterium voor de relatieve rotatie 0.0081 in trek en -0.002 voor druk. Dit beeld correspondeert ook goed met de resultaten van [Boscardin 1989] in Figuur 3.2.

4 Vergelijk van berekeningsresultaten met de criteria voor schade aan gebouwen

4.1 Effecten van de zoutwinning

Bijlage I geeft een overzicht van de vervormingen. In hoofdstuk 2 is bepaald dat de maximaal optredende horizontale rek in de bodem bij trek 0.06 ‰ ($0.6 \cdot 10^{-4}$) is en de maximaal optredende scheefstand 1:5556 (1 cm hoogteverschil over 55.6 m lengte). Eveneens werd berekend dat de maximale kromming in de bodem 0.00000026 ($2.6 \cdot 10^{-7}$) m^{-1} bedraagt voor holle kromming en -0.00000011 ($-1.1 \cdot 10^{-7}$) m^{-1} voor bolle kromming. Dit correspondeert met een kromtestraal van 9091 km voor bolle kromming en een kromtestraal van 3846 km voor holle kromming. Met de in hoofdstuk 2 besproken methode ($\beta = \frac{1}{2}kL$) wordt voor een gebouwlengte $L=20$ m een maximale relatieve rotatie β van $2.6 \cdot 10^{-6}$ gevonden voor holle kromming en $-1.1 \cdot 10^{-6}$ voor bolle kromming. De maximale waarde in absolute zin voor een dergelijke gebouwlengte is dus $2.6 \cdot 10^{-6}$.

Hier wordt opgemerkt dat al deze grootheden betrekking hebben op vervorming van de bodem. Door de grotere stijfheid van gebouwen zijn de werkelijke vervormingen in gebouwen altijd kleiner dan de hier berekende waarden geldig voor de bodem. Wel zullen de hier berekende waarden vergeleken worden met de schadecriteria gegeven hoofdstuk 3.

Met de berekende maximum relatieve rotatie voor 20 m gebouwlengte van $2.6 \cdot 10^{-6}$ en met de maximaal optredende horizontale rek van $0.6 \cdot 10^{-4}$, kan in Figuur 3.2 [Boscardin 1989] afgelezen worden dat dit punt in het gebied ligt met verwaarloosbare schade ("NEGL." in de figuur).

Het strengste criterium voor de horizontale rek in Figuur 3.3 van [Kratzsch 1974] is 0.5 mm/m ($0.5 \cdot 10^{-3}$). De berekende maximaal optredende horizontale (trek)rek in de bodem van $0.6 \cdot 10^{-4}$ zit hier ruim onder. Het strengste criterium voor scheefstand in Figuur 3.3 is 2.5 mm/m ofwel 1:400. De maximale scheefstand volgend uit de berekening is 1:5556 en zit ver onder dit criterium. Voor de kromtestraal wordt als strengste waarde 20 km gehanteerd in Figuur 3.3. De berekende minimum kromtestraal in de bodem is 3846 km. Deze straal is veel groter en derhalve is de kromming zeer veel kleiner en minder ernstig dan het gegeven criterium.

De gevonden maximale horizontale rek van $0.6 \cdot 10^{-4}$ blijft eveneens ruim onder het criterium voor de horizontale rek van [Sambeek 2000], die stelt dat de horizontale rek (bij trek) kleiner moet zijn dan $5.0 \cdot 10^{-4}$ om geen scheuren te veroorzaken in pleister of mortel. Verder hanteert [Sambeek 2000] als criterium voor de relatieve rotatie 0.0081 in trek en -0.002 voor druk. De berekende waarden van de maximale relatieve rotatie (voor een gebouw van 20m) van $2.6 \cdot 10^{-6}$ en $-1.1 \cdot 10^{-6}$ liggen ruimschoots onder deze grens.

De berekende waarden van de relatieve rotatie liggen ook ver buiten het schadegebied aangegeven door [Bjerrum 1963] en [Skempton 1956], Figuur 3.1, aangezien een relatieve rotatie van $2.6 \cdot 10^{-6}$ gelijk is aan 1:384615. Dit is factoren kleiner, zelfs wanneer een langer gebouw beschouwd wordt.

Een vergelijkend overzicht van de berekende waarden voor de vervorming in de bodem en de criteria verzameld uit diverse bronnen is gegeven in Tabel 4.1.

berekend voor FRISIA	kromtestraal [km]	relatieve rotatie β (* 0.001)	horizontale rek [%] ofwel [mm/m]
maximale waarden FRISIA bij ongeveer 35 cm bodemdaling	3846 (hol) 9091 (bol)	0.0026 (bij 20 m gebouwlengte)	0.06 (trek) 0.17 (druk)
Referenties			
Bjerrum		1.2	
Boscardin		1.0 (bij horiz. rek=0)	0.5 (trek) (bij $\beta=0$)
v Sambeek		2.0	0.5 (trek)
Kratzsch	20		0.5 (trek)
NEN (nieuwbouw) 1:300		3.3	
aardgaswinning Groningen			0.25 (trek); bakst.

Tabel 4.1: Vergelijk resultaten berekening met schadecriteria uit de literatuur.

Voor de hier beschouwde bodemdalingssom met een maximale bodemdaling van ongeveer 35 cm liggen de berekende maximale horizontale rek en relatieve rotatie in het gebied van verwaarloosbare schade voor al de in hoofdstuk 3 genoemde criteria. Zoals gezegd is de werkelijk optredende rek van een gebouw veelal kleiner dan de hier berekende rek voor de bodem in de bodemdalingssom, een ander als gevolg van de grotere stijfheid van het gebouw. De verwachting is daarom dat er geen of nagenoeg geen schade zal optreden als direct gevolg van de bodemdaling.

4.2 Effecten gaswinning

In de regio wordt gas gewonnen uit de diepe ondergrond. In het gebied van de bodemdalingssom door zoutwinning zijn, of worden, effecten daarvan meetbaar. De extra bodemdaling door gaswinning in het gebied dat hier besproken wordt, is zeer beperkt. De scheefstand en rek die door de gaswinning in de bovengrond optreden zijn verwaarloosbaar ten opzichte van de effecten van zoutwinning. Effecten van de bodemdaling door gaswinning binnen het meetnet van waterpassing van FRISIA zullen herkenbaar worden in de regelmatig uitgevoerde metingen van de bodemdaling door FRISIA en door TotalfinaElf. Ook eventuele afwijkingen in de aard van de bodemdaling, zoals onregelmatige zakkingen, zijn daarin te zien als ze op zouden treden.

5 Conclusies ten aanzien van schade aan bebouwing

GeoDelft heeft de vervorming van de bovengrond door zoutwinning uitgerekend voor een bodemdalingkom met een diepte van maximaal 35 cm. Daarbij zijn de aspecten scheefstand, relatieve rotatie (kromming) en horizontale rekken nagegaan. Deze berekende waarden zijn vervolgens vergeleken met schadecriteria, zoals deze in de literatuur zijn beschreven. Wanneer de berekende vervormingen worden vergeleken met de schadecriteria blijkt dat de vervormingen van de bovengrond als direct gevolg van de zoutwinning veel lager zijn dan de waarde voor de schadecriteria.

Algemeen kan geconcludeerd worden, de ervaringen van elders beschouwend, dat de kans op schade aan bebouwing (inclusief huizen) als direct gevolg van de bodemdaling zeer gering is bij een bodemdaling van 35 centimeter. Hierbij is de meest ongunstige ligging van de bebouwing ten opzichte van de vervorming beschouwd.

Het dient echter duidelijk te zijn dat een kleine kans geen absolute zekerheid betreft. Waar andere oorzaken mede een rol spelen, kan de bodemdaling mogelijk de bekende druppel zijn, die de emmer doet overlopen. Een huis met een reeds zwakke constructie en dat mogelijk reeds te lijden heeft gehad van grondwaterwisselingen, natuurlijke klink, graafwerkzaamheden, verbouwingen, ouderdom, enzovoorts, kan -mede- door toedoen van de bodemdaling schade oplopen.

Voor specifieke gevallen geldt dat alleen een schade-expert, mogelijk geholpen met grondonderzoek, de oorzaak van de schade kan vaststellen (vaak alleen met redelijke maar geen volledige zekerheid). In overleg zal moeten worden bepaald welk deel van de schade redelijkerwijze door bodemdaling als direct gevolg van de zoutwinning is veroorzaakt en welk gedeelte andere oorzaken heeft.

6 Bibliografie

[Bell 1987]

Bell, F.G. 1987: "Ground Engineers Reference Book", Chapter 15 Subsidence

[Bjerrum 1963]

Bjerrum, L., 1963: "Allowable settlement of structures"

Vol. 2 of Proceedings from the European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering
Wiesbaden 1963

[Boscardin 1989]

Boscarding, M.D., Edward J. Cording 1989: "Building response to excavation-induced settlement"
Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 115, No. 1, Januari 1989

[Fokker et al. 2000]

Fokker, P.A. Steeneken, P.V. Kruse, G.A.M. 2000: Predictable and manageable subsidence above
deep salt caverns. SMRI, San Antonio 2000

[GD1997]

"Prediction of surface subsidence resulting from squeeze in the NEDMAG caverns. GeoDelft rapport
CO-352470/82, April 1997, 27 pp.

[GD 1999]

"NEDMAG Veendam location: comparison of observed and calculated subsidence"
GeoDelft report, CO-352470, 1999-11-12

[KBB 1995]

"Kaverne BAS#1 Gebirgsmechanik"

Kavernen Bau- und Betriebs-GmbH (Dipl.-Ing. Uwe Schmidt)

[Kratzsch 1974]

Kratzsch, H., 1974: "Bergschadenkunde"

In het Engels vertaald: H. Kratzsch: "Mining Subsidence Engineering", 1983
ISBN 3-540-11930-2

[NCB 1975]

"Subsidence Engineer's Handbook"

National British Coal Board

London, 1975

[NEN 6740]

"Geotechniek TGB 1990, Basiseisen en belastingen"

1e druk december 1991, met verwerking correctieblad sept. 1993

Nederlands Normalisatie-instituut

[NITG 1999a]

“Bodemdaling door zoutwinning in de concessie Barradeel”

TNO-rapport 98-213-A, 29 april 1999

[NITG-TNO 1999b]

“ Holocene laagopbouw rond de FRIMA locatie”

TNO rapport NITG 99-161-B, aug 1999.

[NITG 2000]

“Transport of radionuclides disposed of in clay of Tertiary origin (TRACTOR). TNO-rapport NITG 00-223-B, Utrecht, 176 pp.

[Oranjewoud 2000]

“Deformatiemetingen 2000 Steenzoutconcessie Barradeel, FRISIA Zout B.V. Oranjewoud Document 17690-78137-03.rap voor FRISIA Zout B.V., Harlingen, 9 pp.

[Oranjewoud 2001]

“Deformatiemetingen 2000 Steenzoutconcessie Barradeel, FRISIA Zout B.V. Oranjewoud Document voor FRISIA Zout B.V., Harlingen, draft.

[Sambeek 2000]

Sambeek, L. van, 2000: “An introduction to subsidence over salt and potash mining facilities”

Solution Mining Research Institute Fall 2000 meeting

San Antonio, Texas, USA, 15-18 October 2000

[Skempton 1956]

Skempton, A.W., D.H. MacDonald 1956: “The allowable settlements of buildings”

Proc. Institute of Civil Engineering, 5, 3, 1956, pag. 727-768

[Polshin 1957]

Polshin, D.E., R.A. Tokar 1957: “Maximum allowable non-uniform settlement of structures”

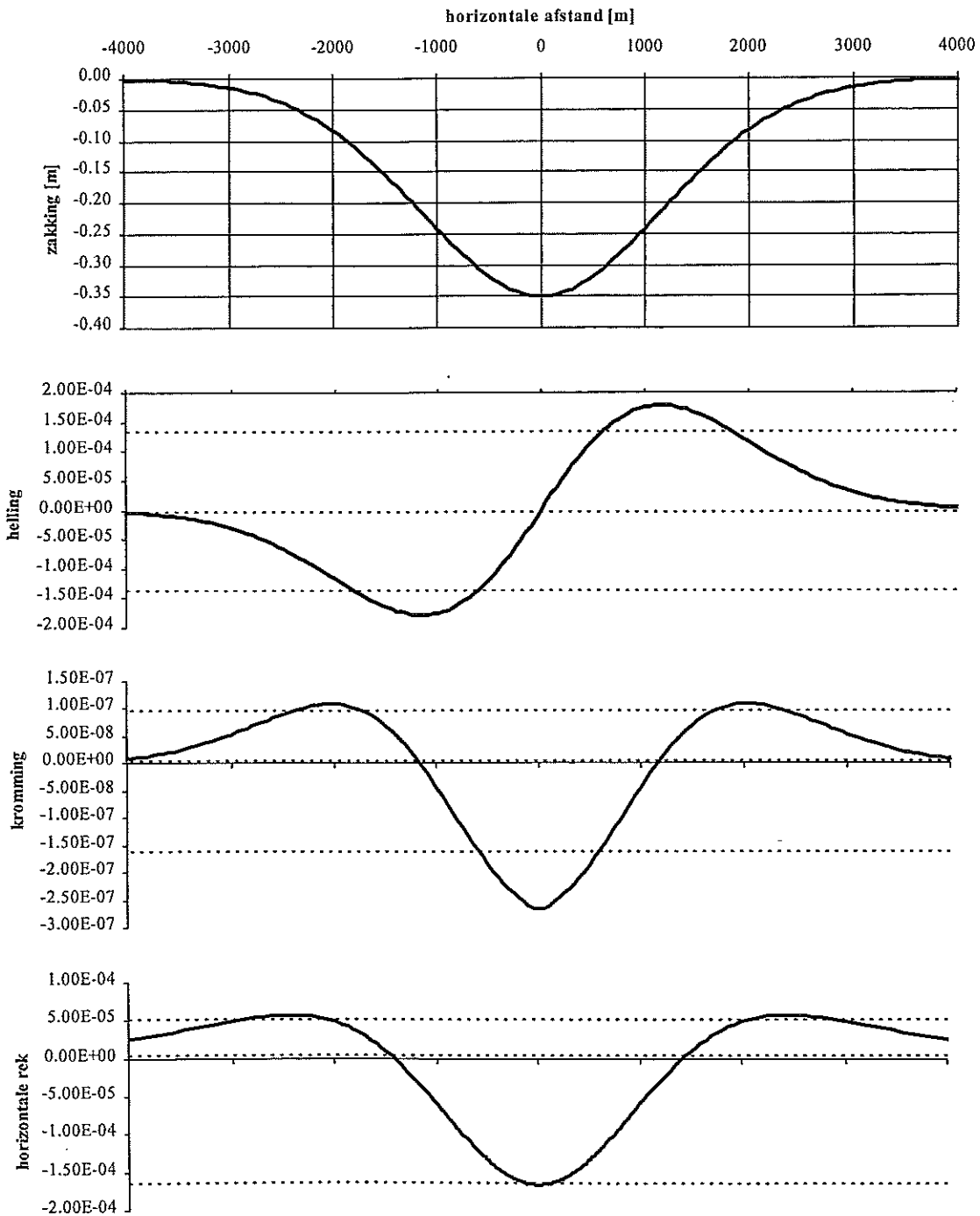
Proc. 4th International Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering

London, 1, 1957, pag. 402-406

BIJLAGEN

Bijlage I

Bodemdalingkom met een maximum diepte van ongeveer 35 cm en de vervormingen daarbij. Op 2800 m uit het centrum van de kom treedt 2 cm bodemdaling op.



Bijlage II

Opzet eindige elementen berekening

Met het programma DIANA is een 2D axiaalsymmetrische berekening gemaakt, waarbij kruip optreedt in de zoutlagen. Het doel van de berekening is het bepalen van de horizontale rekken aan het maaiveld bij een maximum bodemdaling van 35 cm in het centrum van de kom. De vorm van de bodemdalingsskom bij een zinking in het centrum van 35 cm is voorspeld met een analytische model [Fokker et al. 2000], dat is gebaseerd op de gemeten bodemdaling bij de huidige zoutwinning. De aldus voorspelde vorm van de bodemdalingsskom wordt nagenoeg precies benaderd door de eindige elementen berekening door te variëren met de stijfheid en de dwarscontractie van de bovenste grondlagen en de beste waarden voor de parameters te kiezen. Na het verkrijgen van de juiste vorm van de berekende bodemdalingsskom, worden de horizontale rekken die daarbij zijn berekend nagegaan.

De opzet van de som is gelijk aan die van [NITG 1999a] en [KBB 1995] en gaat uit van de diepte van de caverne zoals gebruikelijk bij de zoutwinning in het gebied door FRISIA.. Wel is de laag carnalliet die in het gebied boven de cavernes voorkomt in de berekening toegevoegd. Het rapport [NITG 1999a] gaf aan dat de convergentiesnelheid in de berekeningen van [KBB 1995] aan de lage kant was en gaf hiervoor een aantal oorzaken. De kruipsnelheid in de huidige berekening is niet direct relevant (de berekening simuleert de tijdsduur waarbij een daling van 35 cm wordt bereikt). Toch is de suggestie van [NITG 1999a] aangenomen om de temperatuur in caverne een temperatuur van 104°C te laten heersen en is er eveneens een lagere overdruk gekozen van 10 bar (ten opzichte van de 80 bar uit [KBB 1995] en ten opzichte van de druk in [NITG 1999a]). Deze keuzes maken de kruipsnelheid groter.

Geometrie en laagopbouw

De ondergrond is nagenoeg hetzelfde gemodelleerd als in de berekeningen van KBB en NITG, met uitzondering van het toevoegen van de 38 meter dikke laag carnalliet boven de caverne.

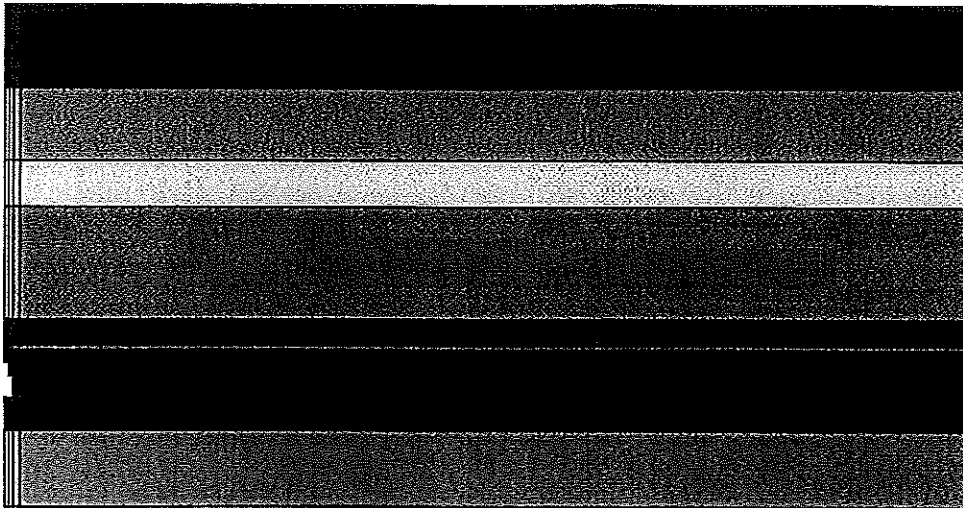
materiaal	diepte [m]	dichtheid [kg/m ³]	Young's modulus [MPa]		dwarscontractie coëfficiënt	
			KBB/NITG	Beste fit	KBB/NITG	Beste fit
kwartiar	0000-0597	1950	2000	125	0.38	0.25
tertiair	0597-1113	2300	8000	125	0.35	0.25
krijt	1113-1434	2250	10000	5000	0.35	0.25
zandsteen	1434-2240	2230	15000	7500	0.30	0.30
steenzout	2240-2432	2185	11000	11000	0.35	0.35
anhydriet	2432-2462	2900	30000	30000	0.35	0.35
carnalliet	2462-2500	1600	-	5500	0.35	0.35
steenzout	2500-3042	2185	11000	11000	0.35	0.35
dolomiet	3042-3600	2700	25000	25000	0.30	0.30

Tabel 6.1 : Laagopbouw van de ondergrond.

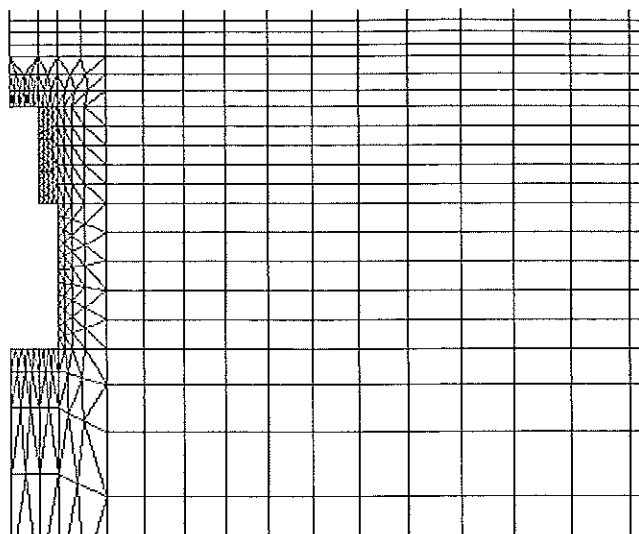
De stijfheden en dwarscontractiecoëfficiënten van de bovenste vier lagen zijn gevarieerd om tot een berekende zakkingskom te komen die past op de zakkingskom uit het analytisch model. De opbouw van de ondergrond is weergegeven in Tabel 6.1, waarin zowel de door KBB en NITG gebruikte waarden voor de Young's modulus en dwarscontractie zijn gegeven, alsook de waarden die de beste fit opleverden. Deze waarden komen overeen met waarden die in [NITG 2000] worden toegepast in eindige elementenberekeningen betreffende de diepe ondergrond.

Het dak van de caveerne bevindt zich 50 m onder het carnalliet op een diepte van 2550 m. Het bovenste deel van de caveerne is 100 meter hoog en heeft een straal van 30 m, en het onderste deel is 150 m hoog met een straal van 50 m.

Figuur 6.1 en Figuur 6.2 laten respectievelijk de geometrie en het mesh rond de caveerne zien zoals gebruikt in de berekening. De caveerne is gemodelleerd als een lege holte. In werkelijkheid is deze gevuld met pekkel, waarbij de pekkel een zekere druk op de cavernewand uitoefent. Deze druk is hier direct op de caveerne wanden gelegd, zodat de pekkel niet gemodelleerd hoeft te worden. De druk als functie van de tijd stuurt de berekening.



Figuur 6.1: geometrie gebruikt in de berekening.



Figuur 6.2: Mesh van het gebied rond de caveerne.

Gebruikte cavernedruk als functie van de tijd

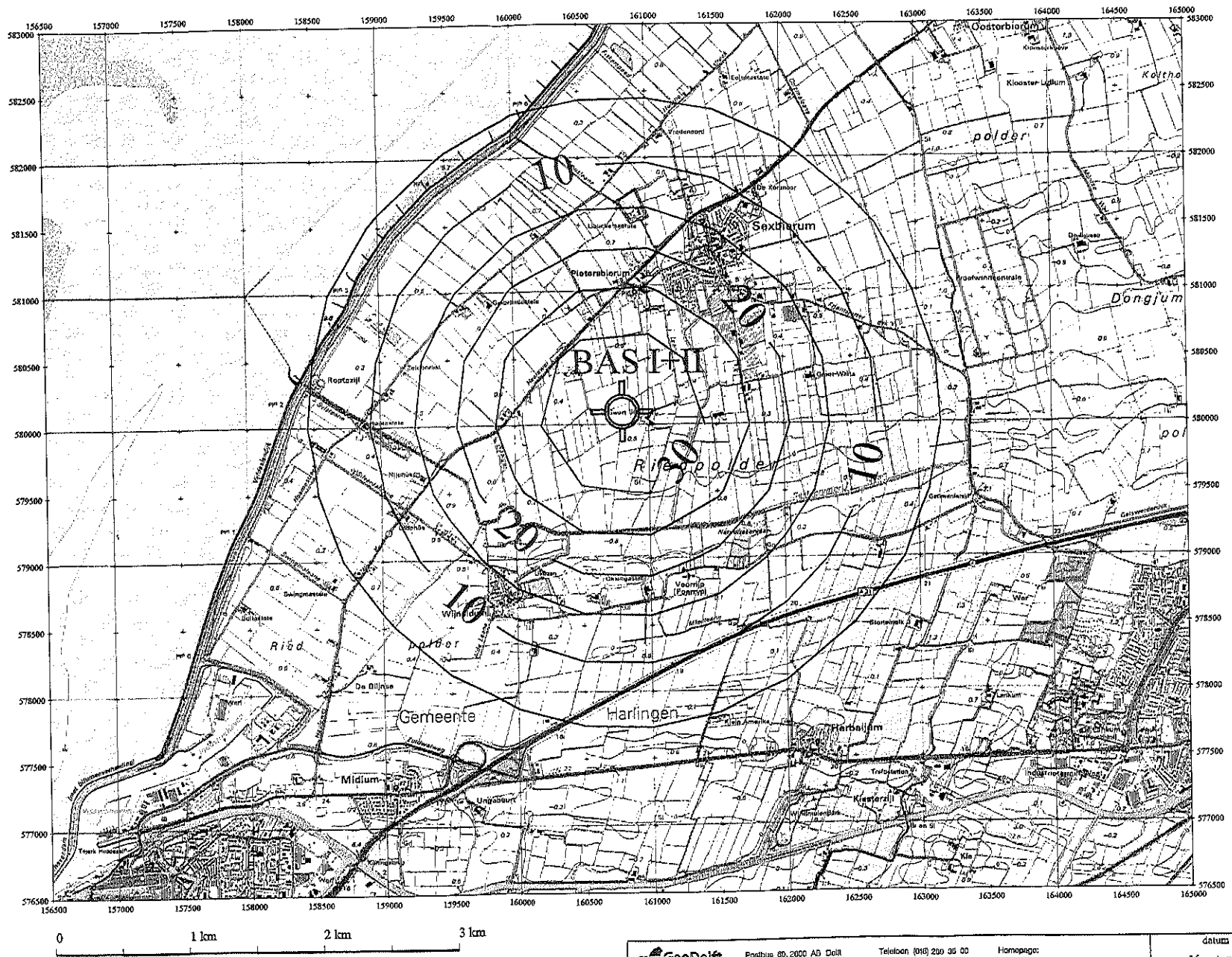
In de gebruikssituatie van de caveerne wordt uitgegaan van een druk op de cavernewand gelijk aan de hydrostatische druk plus een overdruk van 10 bar. Deze druk wordt gemaakt met twee loadcases. De eerste loadcase is een constante druk normaal op de cavernewand, gelijk aan de hydrostatische waarde ter plaatse van het dak van de caveerne (op 2550m diepte), plus een overdruk van 10 bar. Deze druk is met een pekdichtheid van van 1286.5 kg/m^3 gelijk aan $32.8 + 1.0 = 33.8 \text{ MPa}$. De tweede loadcase is een druk normaal op de cavernewand die hydrostatisch verloopt van 0.0 MPa bovenin tot 3.2 MPa onderin de caveerne. De twee loadcases opgeteld geven de correcte druk in de caveerne voor de situatie met 10 bar overdruk.


Deze druk wordt niet direct opgelegd, maar dit geschied vanuit een initiële toestand, waar gesteld wordt dat in het begin de druk in de caveerne hetzelfde is als die in de ondergrond (lithostatische druk). Deze druk wordt berekend aan de hand van het gewicht van de bovenliggende grondlagen. In de zoutlagen, steenzout en carnalliet, is gesteld dat voor het aanbrengen van het eigengewicht geldt dat $K_0=1.0$, zoals ook gebruikt door KBB en NITG. De lithostatische druk heeft op de diepteligging van het dak van de caveerne (-2550 m) een waarde van 55.5 MPa. De initiële toestand wordt gemaakt door het eigengewicht van de lagen aan te brengen terwijl tegelijkertijd loadcase 1 (constante druk normaal op cavernewand) een waarde heeft van 55.5 MPa en loadcase 2 ook is aangezet, met het hydrostatisch verloop in de caveerne. Hiermee wordt op een zeer klein verschil (verschil tussen gewicht gewicht pek en gewicht steenzout) na een lithostatische situatie gesimuleerd.

In de berekeningen wordt de druk in de caveerne in 1 dag verlaagd van de lithostatische druk naar hydrostatische druk plus 10 bar overdruk. Dit gebeurt door loadcase 1 van 55.5 MPa te verlagen naar 32.8 MPa. Daarna blijft de druk constant op deze overdruk van 10 bar. De berekening gaat door totdat de maximum zakking van 35 cm in het centrum van de kom bereikt is.

Bijlage III

Voorspelde bodemdaling bij maximale zakking van 35 cm in het centrum van de kom geprojecteerd op een plattegrond van noordwest Friesland. Coördinaten zijn Rijksdriehoekskoördinaten en zakking is weergegeven in centimeters.



 Postbus 80, 2000 AD Delft Stillewaagweg 2, 2020 CK Delft	Telefoon (016) 290 30 00 Telefax (016) 291 08 21	Homepage: www.GeoDelft.nl	datum	got.
			16 september 2001	inz
			CO- 400130/03	gez.
FRISIA Consessiegebied Contouren in cm van berekende bodemdaling voor BAS I+II met maximaal 35 cm bodemdaling			fris1b.dgn	for
				A3

