

**Studieresultaten
betreffende ongelijkmatige zakkingen
in verband met aardgaswinning
in de provincie Groningen**

deelstudie I:

**Mogelijkheid van breukbeweging
door gasproductie uit
het Groningen gasveld**

deelstudie II:

**Mogelijkheid van schade aan de
bebouwing door wijzigingen
in het peil van polder- en boezemwater**

een uitgave van de
Commissie Bodemdaling door Aardgaswinning
Postbus 620, 9700 AP Groningen

maart 1987

INHOUD

	pag.
Woord vooraf	3
Inhoudsopgave	4
Samenvatting:	7
Deelstudie I:	11
1 Probleemstelling	13
2 Onderzoeksmethode	14
2.1 Geologie van het gebied	14
2.2 Modelkeuze	14
3 Resultaten	16
4 Conclusies	19
Verantwoording	19
Literatuur	19
Deelstudie II:	21
1 Inleiding	23
2 Probleemstelling	24
2.1 Gevolgen van de aardgaswinning	24
2.2 Oorzaken van ongelijkmatige zetting	25
2.3 Effect van zettingen op de bebouwing	26
2.4 Typen funderingen	26
2.5 Karakteristieke bebouwing in het onderzoeksgebied	27
2.6 Onderzoek	27
3 Grondwater	29
3.1 Waterhuishouding	29
3.2 Grondwaterstandsveranderingen	30
4 Ondergrond	32
4.1 Samenstelling van de ondergrond	32
4.2 Eigenschappen van grond	33
4.3 Invloed van voorbelastingen	34
4.4 Schematisering van de grond	35
4.5 Te verwachten zettingen en zakkings	36
5 Krachtswerking	37
5.1 Mechanisch gedrag van gebouwen	37
5.2 Spanningen	37
5.3 Snedekrachten	39
5.4 Belastingafdracht bij een rechthoekige balk	39
5.5 Belastingafdracht in de muren van een woning	40
5.6 Krachtswerking bij gemetselde gebouwen	40

	pag.
6 Wisselwerking tussen gebouw en ondergrond	43
6.1 Afdracht van het eigen gewicht per woning aan de ondergrond	43
6.2 Krachtsafdracht bij een rijtje woningen	44
6.3 Homogene ondergrond	48
6.4 Inhomogene ondergrond	49
6.5 Uiteindelijke spanningsverdeling in de muren	51
6.6 Krachtswerking in de bedrijfsgedeelten van de boerderijen	51
6.7 Invloed van scheurvorming op de bebouwing	52
7 Kansrekening	53
7.1 Kans op schade	53
7.2 Histogram	53
7.3 Normale verdeling	54
7.4 Veiligheidsbeschouwingen	56
8 Schade aan de bebouwing	58
8.1 Sterkte van metselwerk	58
8.2 Maximale momenten in de woningen	59
8.3 Maximale trekspanningen in de muren	60
8.4 Kans op scheurvorming door eigen gewicht	62
8.5 Toename van de kans op scheurvorming door daling van de grondwaterstand	62
9 Toelaatbare slootpeilverlagingen	64
9.1 Zakking van de bebouwing afhankelijk van de grondsoort	64
9.2 Momentenbereik bij de verschillende grondsoorten	64
9.3 Adviezen voor de verlaging van de peilen van het open water	66
10 Kans op scheurvorming bij rijtjeswoningen en boerderijen	67
10.1 Rijtjeswoningen	67
10.2 Bedrijfsgedeelten van boerderijen	67
11 Slotopmerkingen	69
Technische uitgangspunten voor de berekeningen	70
Waterhuishouding	70
Grondmechanica	70
Krachtswerking in gebouwen	70
Literatuur	71
Verantwoording	71

**Studieresultaten
betreffende ongelijkmatige zakkingen
in verband met aardgaswinning
in de provincie Groningen**

Samenvatting van de deelstudies I en II

Samenvatting

Als gevolg van de aardgaswinning zijn twee oorzaken denkbaar, die tot ongelijke zakkingen en daardoor tot schade aan de bebouwing kunnen leiden. Ten eerste zouden bestaande of nieuwe breuken in het diepliggende gasvoerende gesteente zich tot aan de oppervlakte kunnen doorzetten en daar een onregelmatige zakking veroorzaken (deelstudie I). Een tweede mogelijkheid is dat de bovenste grondlagen, waarop de bebouwing rust, zodanige zettingen zullen ondergaan door wijzigingen in het peil van polder- en boezemwater, dat onder bepaalde omstandigheden scheurvorming in de bebouwing kan optreden (deelstudie II).

In deelstudie I is uitgegaan van de geologische opbouw van het pakket van gesteentelagen vanaf het gasreservoir tot aan de oppervlakte en daarbij is speciaal gelet op het patroon van breukvlakken en andere onregelmatigheden in het lagenpakket. Op deze wijze is uit een oogpunt van breukvorming in het Groningen gasveld de meest ongunstige combinatie van geologische omstandigheden gedefinieerd. Dat wil dus zeggen, dat onder die omstandigheden breuken zich het verst naar boven zouden voortplanten bij compactie van de gasvoerende lagen. Verschillende rekenmodellen zijn ontworpen, gebaseerd op de genoemde ongunstige situatie. Met behulp van een computer is daarna een groot aantal berekeningen uitgevoerd uitgaande van verschillende uitgangsposities. Na onderzoek van de resultaten bleek, dat pas bij een compactie van meer dan 10 meter van het reservoirgesteente, breukvlakken zich tot aan de aardoppervlakte zouden voortplanten. De vermelde resultaten zijn geverifieerd door de Rijks Geologische Dienst en het Staatstoezicht op de Mijnen. In het kader van deze verificatie is het model nog eens doorgerekend met zeer ongunstige randvoorwaarden. Zelfs onder deze extreme condities werd gevonden, dat er een reservoir compactie van bijna 2 meter zou moeten optreden alvorens een breuk tot aan de oppervlakte zou doorlopen. Gezien de verwachte maximale compactie van het gasvoerende gesteente van 0,60 - 0,70 m mag het dus uitgesloten worden geacht, dat dit verschijnsel zich zal voordoen. Scheurvorming in gebouwen uit dien hoofde zal derhalve niet optreden.

In deelstudie II is gekeken naar de zettingsgevoeligheid van de ondergrond voor peilverlagingen en de consequenties daarvan voor de bebouwing. De studie draagt een algemeen karakter en is niet bedoeld als een handleiding waarmee de oorzaak van scheurvorming in een willekeurig gebouw kan worden opgespoord. Wel wordt aangegeven welke aspecten voor de beoordeling van individuele schadegevallen van belang kunnen zijn.

De grond in het onderzoeksgebied is gelaagd van structuur en bestaat voornamelijk uit de grondsoorten klei, veen en zand of combinaties daarvan. De laagdikten kunnen van

plaats tot plaats sterk variëren. De grond kan homogeen van opbouw zijn, waarbij de laagopbouw vrijwel ongestoord is of inhomogeen. De laatste situatie doet zich bijvoorbeeld voor, indien een geul of kreek, die een homogeen pakket doorsnijdt, op een later tijdstip is dichtgeslibd. In tegenstelling tot homogene grond veranderen bij inhomogene grond de samenstelling en eigenschappen ervan over relatief korte afstand vergeleken met de lengte van een gebouw.

Als een gevolg van de bodemdaling door aardgaswinning zal de aardoppervlakte de vorm krijgen van een zeer platte schotel. Om de locale omstandigheden zo weinig mogelijk te verstoren, dient de drooglegging - dat is de afstand van maaiveld tot slootpeil - zoveel mogelijk gelijk te blijven in het gebied. Naarmate de bodemdaling vordert, zal dit bereikt worden door het tijdig bouwen van gemalen, sluizen, stuwen en dergelijke. Gezien de schotelvorm zullen kleine afwijkingen van de huidige drooglegging onvermijdelijk zijn. Deze materie wordt bestudeerd door de Waterschappen en naar verwachting zullen veranderingen in de drooglegging groter dan 0,20 m zelden of nooit noodzakelijk zijn. Belangrijk is, dat voor het overgrote deel van het gebied een veel kleinere droogleggingsverandering van toepassing zal zijn.

Het niveau van de grondwaterspiegel varieert in de loop van het jaar al naar gelang het seizoen. Als de grondwaterspiegel ten opzichte van het maaiveld verder daalt dan het minimum niveau dat ter plaatse voorheen ooit eens is bereikt, dan zal rekening moeten worden gehouden met zetting van de grond. Een dergelijke zetting zal dus vooral optreden in erg droge zomers. Een verlaging van het slootpeil van 0,20 m ten opzichte van het maaiveld zal de grondwaterstand doen dalen. Zo zal op enkele meters afstand van een sloot de gemiddelde laagste grondwaterstand in het geval van klei 0,05 - 0,10 m dalen, bij veen 0,10 m en bij zand 0,10 - 0,15 m. In het midden van een kavel is die daling kleiner. De zettingen, die verband houden met peilverlagingen die doorgevoerd worden vanwege de bodemdaling, zullen dan ook in droge zomers optreden, omdat dan de kans het grootst is dat de grondwaterspiegel dieper onder het maaiveld zakt dan ooit voorheen. Uit de berekeningen blijkt, dat in het onderzoeksgebied in het geval van zand de zetting ongeveer 5% bedraagt van de daling van de grondwaterspiegel onder het genoemde minimum. In het geval van klei en veen zijn deze percentages respectievelijk 10 en 15.

Bij homogene grond is de zetting van de grond in het algemeen gelijkmatig en zal de bebouwing in zijn geheel meezakken; bij inhomogene grond echter kan een verschil in zetting tot scheefstand en/of scheurvorming van de bebouwing leiden. Langgerekte bouwwerken zijn speciaal gevoelig voor ongelijke zakking, daarom zijn de volgende be-

bouwingstypen bestudeerd: een rijtje van 6 woningen van 36 meter lang en een 50 meter lange muur van het bedrijfs-gedeelte van een boerderij. In beide gevallen is de funde-ring op staal, dat wil zeggen zonder onderheing, gedacht; deze situatie is het meest gevoelig voor eventuele schade. Schade is gedefinieerd als

- a. doorgaande scheurvorming in het metselwerk en/of
- b. scheefstand groter dan 5 mm/m.

Gebleken is dat scheefstand veelal niet maatgevend is en daarom heeft de studie zich vooral op scheurvorming ge-richt.

Scheurvorming in bebouwing treedt op als de spannin-gen in het metselwerk de treksterkte ervan overschrijden. Er is uitgegaan van een gemiddelde treksterkte gebaseerd op proeven en literatuuronderzoek. Het berekenen van de spanningen in de muren van woningen is met behulp van een computerprogramma uitgevoerd. Factoren die van gro-te invloed zijn op die spanningen zijn de volgende: de aard, vorm en bouwwijze van het gebouw, de plaats in het ge-bouw waar de spanningen werken, de afmetingen van de fundering en de mate van inhomogeniteit van de onder-grond. Bekeken is hoe, rekening houdende met de stijfheid van het gebouw, bij meer of minder zetting van homogene en inhomogene grond de spanningen in het metselwerk veranderen. Door deze spanningen te vergelijken met de treksterkte van metselwerk is bepaald onder welke omstan-digheden scheuren gaan optreden.

Aangezien de zetting van grond via het grondwaterpeil afhankelijk is van het slootpeil is hiermee het verband ge-legd tussen slootpeilverlaging en mogelijke scheurvorming.

Het zal duidelijk zijn dat voor de vele soorten gegevens die een rol spelen in deze problematiek geen vaste cijfers gehanteerd mogen worden. De treksterkte van metselwerk bijvoorbeeld en de geometrie van de bouwwerken variëren aanzienlijk. Men ontkomt er dus niet aan om met gemiddel-de waarden te werken: een gemiddelde waarde voor de treksterkte van metselwerk en een gemiddelde waarde voor de spanningen in het metselwerk. In verband met de bena-deringen die bij dit type berekeningen onvermijdelijk zijn, is een zekere spreiding rond deze gemiddelden mede in de berekening opgenomen. Met behulp van deze uit de sta-tistiek bekende techniek is het mogelijk de kans van het op-treden van schade te berekenen. Aldus is de kans op scha-de ten gevolge van eigen gewicht alsmede de toename van die kans door een daling van de grondwaterstand bepaald. In navolging van wat in de civiele en bouwkundige techniek gebruikelijk is, is de maximaal toe te laten vergroting van die kans op 5% gesteld.

Bij het rijtje van 6 woningen gefundeerd op homogene kleige grond is de kans op scheurvorming alleen ten gevol-ges van het eigen gewicht ca. 10%, dat wil zeggen dat van alle 100 vergelijkbare rijtjes woningen er al 10 scheuren ver-tonen voordat er sprake is van peilverlaging. Bij inhomoge-ne grond is de kans op scheurvorming ten gevolge van het eigen gewicht ruim 30%. Een daling van het grondwaterpeil heeft bij homogene grond nauwelijks invloed op de kans op scheurvorming. Bij inhomogene grond neemt de kans op scheurvorming toe met maximaal 10% per 0,20 m grond-waterstands-daling.

Als resultaat van de studie is onderstaande tabel ontstaan waarin globale criteria zijn gegeven om de vergroting van de kans op scheurvorming niet significant, dwz. kleiner dan 5% te doen zijn.

grondprofiel voor-namelijk bestaande uit	toelaatbare grond-waterstands-daling in m	toelaatbare sloot-peilverlaging in m
klei	0,10	0,20
veen met kleidek	0,07	0,10
zand	0,24	0,30

De maximale relatieve peilverlagings zijn gebaseerd op de meest ongunstige situatie met betrekking tot de grond-gesteldheid.

Bij boerderijen is de situatie wezenlijk anders. Dit wordt voornamelijk veroorzaakt door de toegepaste constructie van bedrijfsgebouwen in het onderzoeksgebied. De lange muur van het bedrijfsgedeelte blijkt erg kwetsbaar te zijn voor ongelijkmatige zetting. Daardoor is de kans op scheur-vorming bij inhomogene grond in zeer vele gevallen al zo-danig groot, dat een vergroting van deze kans door een grondwaterstands-daling niet veel praktische betekenis heeft. Gezien de traditionele situatie van waterlopen parallel aan de muren van bedrijfsgebouwen, geldt bij homogene grond dat de toeneming van deze kans onder overigens dezelfde omstandigheden praktisch nihil is.

Een verkleining van de drooglegging zal in het algemeen niet tot scheurvorming leiden, alhoewel een vermindering van het draagvermogen van de ondergrond zal optreden. In die gebieden waar momenteel sprake is van een relatieve peilverhoging, omdat de peilen nog niet aangepast zijn aan de bodemdaling, is het onwaarschijnlijk dat aanwezige scheurvorming is toe te schrijven aan de tot op heden opge-treden bodemdaling door aardgaswinning van maximaal 0,15 m. Vergroting van de drooglegging in verband met de bodemdaling is tot op heden slechts in geringe mate en in een klein gebied doorgevoerd, zodat de kans klein is, dat thans reeds schadelijke effecten van de bodemdaling merk-baar zouden zijn als gevolg van die verlagingen. In alle ge-vallen geldt dat voor op staal gefundeerde bouwwerken de mate van inhomogeniteit heel belangrijk is.

Aanbevolen wordt de plannen voor de indeling van de peilgebieden te zijner tijd te toetsen aan de resultaten van deze studie.

Tenslotte zij opgemerkt, dat er veel andere factoren zijn die scheurvorming kunnen veroorzaken, maar die in deelstudie II verder niet zijn uitgewerkt, zoals:

- een onregelmatige belasting van de fundering
- een plaatselijke verandering van de funderingsbelasting en bouwstijfheid door bijvoorbeeld verbouwingen
- grote plaatselijke belastingen naast de fundering
- bouwkundige gebreken
- daling van grondwaterstanden door aanhoudende droogte en andere vormen van wateronttrekking, zoals boomgroei nabij de fundering
- externe invloeden zoals krimp en grote temperatuurver-schillen.

Commissie Bodemdaling
door Aardgaswinning

Deelstudie I:

Mogelijkheid van breukbeweging door gasproductie uit het Groningen gasveld

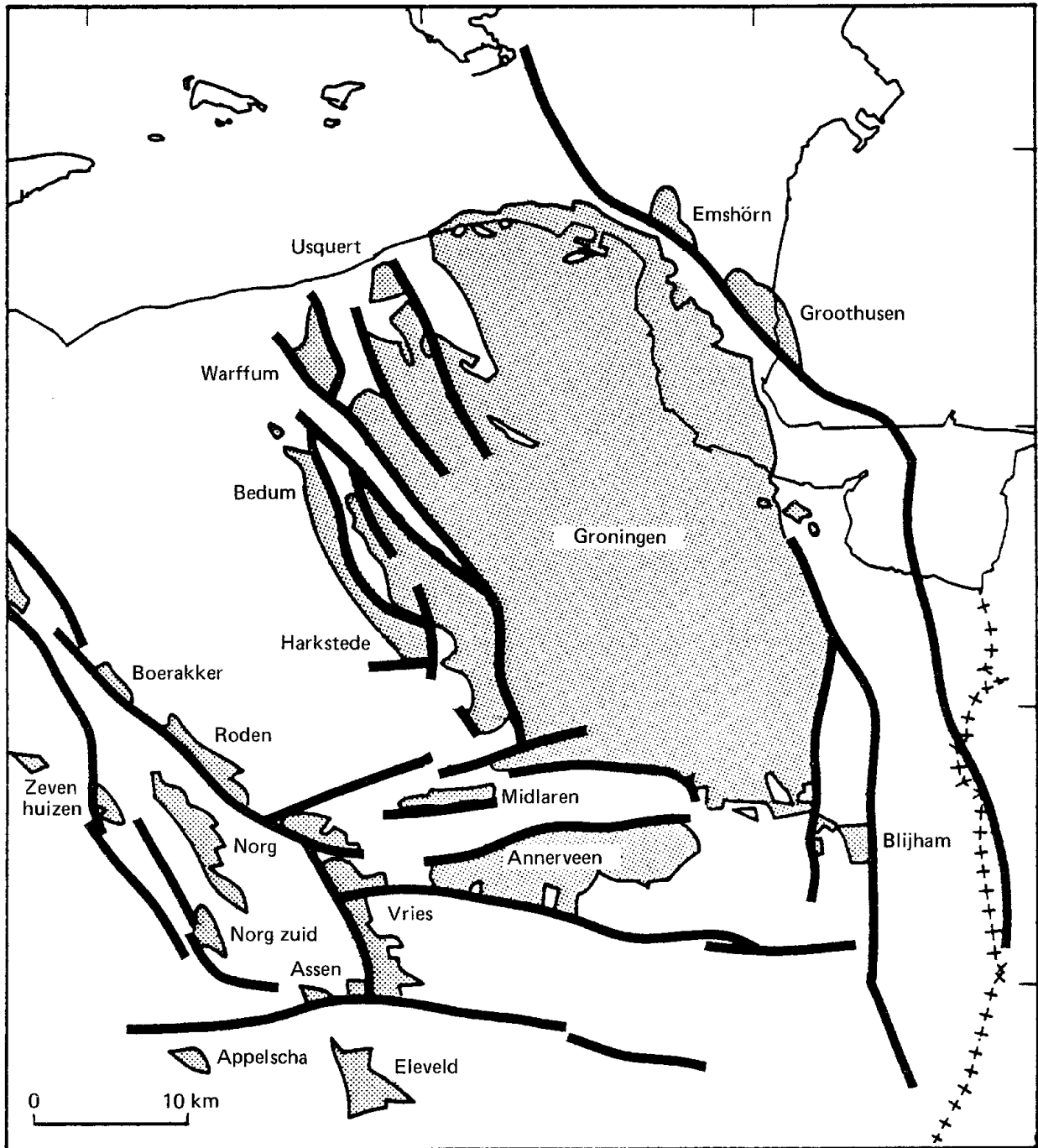


Fig. 1 Breukpatroon zoals aanwezig op een diepte van ongeveer 2850 m onder het maaiveld. (i.e. aan de top van de Slochteren zandsteen).

1 Probleemstelling

De gasproductie uit het Groningen gasveld werd gestart in 1964. De begindruk van het gas in het reservoir bedroeg 350 bar. Volgens de huidige productieplannen zal de gasproductie beëindigd worden in het jaar 2025. De gasdruk in het reservoir is dan gedaald tot gemiddeld 50 bar. Het Groningen gasreservoir bestaat uit een poreuze zandsteenlaag van gemiddeld 160 m dik, gelegen op een gemiddelde diepte van 2900 m beneden het maaiveld. Terwijl gedurende de gasproductie de druk van het gas in de poriën van het reservoirgesteente afneemt, blijft het op het reservoir drukkende gewicht van het erboven liggende gesteente even groot. Doordat de tegendruk van het gas voortdurend afneemt, wordt het reservoirgesteente enigszins samengedrukt, m.a.w. er treedt compactie op. Tijdens de compactie van het reservoir zakken de erboven liggende lagen mee, zodat aan het maaiveld bodemdaling ontstaat. In een studie verricht door de Nederlandse Aardolie Maatschappij BV (NAM) in 1984 werd aangetoond, dat de bodemdaling schotelvormig zal zijn en in het jaar 2025 in het centrum van de schotel maximaal 0,65 m zal bedragen.

Omdat de drukkaling in het gasreservoir niet op alle plaatsen even groot is, zal ook de reservoircompactie niet overal gelijk zijn. Een extreem geval doet zich voor op die plaatsen, waar het reservoir wordt begrensd door een afsluitende breuk. Daar kan slechts aan één kant van het breukvlak de druk in het gesteente afnemen en dientengevolge compactie optreden. Door dit verschil in compactie over korte afstand dwars op de breuk ontstaan spanningen in het gesteente. Deze spanningen zouden zich kunnen ontladen in de vorm van blijvende gesteentevervormingen, zoals reactivering van de bestaande breuk of de ontwikkeling van een nieuwe breuk.

De vraag is nu of deze blijvende vervorming, eventueel in de vorm van een breuk, zich zover naar boven toe kan voortplanten, dat zij het maaiveld bereikt, waardoor er plaatselijk een ongelijkmatige bodemdaling kan ontstaan. Op verzoek van de NAM heeft het Koninklijke/Shell Exploratie- en Productie Laboratorium (KSEPL) te Rijswijk een studie verricht naar mogelijke breukbeweging door gasproductie uit het Groningen gasveld.

2 Onderzoeksmethode

2.1 Geologie van het gebied

Het Groningen gasreservoir wordt gevormd door de Slochteren zandsteen, die in het Perm-tijdperk (ongeveer 285 miljoen jaar geleden) is afgezet. De zandsteen varieert in dikte van 75 m tot 240 m, en wordt doorsneden door talrijke grote en kleine breuken die alle een steile hellingshoek hebben. In fig. 1 is de ligging van de belangrijkste breuklijnen op een diepte van ongeveer 2850 m getoond. Enkele breuken vormen tevens de begrenzing van het Groningen gasveld. Deze breuken waren voor het laatst actief in de late Jura-tijd (± 150 miljoen jaar geleden). Boven op de Slochteren zandsteen is in de loop van vele miljoenen jaren het zgn. Zechstein steenzout afgezet, dat in dikte varieert van 45 m tot ruim 2000 m. Dit steenzout vormt een ondoorlaatbare laag, zodat het gas in de Slochteren zandsteen niet naar boven kan ontsnappen.

In fig. 2 is een karakteristieke dwarsdoorsnede getoond door het zuidelijke en centrale gedeelte van het Groningen gasreservoir, met daarboven de afzettingen uit latere tijdperken (Trias, Jura, Krijt, Tertiair). Uit deze figuur komt duidelijk naar voren, dat in het Zechstein steenzout en in de erboven liggende gesteentelagen géén breuken voorkomen, met uitzondering van die plaatsen waar het zoutpakket over korte afstand sterk in dikte verandert, zoals bij Meeden het geval is. Blijkbaar zijn in het geologische verleden de breuken, die in de Slochteren zandsteen zelf ontstonden, effectief geabsorbeerd door het steenzout. Dit is goed verklaarbaar uit het feit, dat steenzout zich op geologische tijdschaal gezien vloeibaar (visceus) gedraagt.

2.2 Modelkeuze

Het gedrag van het gesteente boven het gasreservoir is op KSEPL bestudeerd met behulp van een computerprogramma, gebaseerd op de zgn. eindige elementenmethode. Hierbij wordt de gesteentestructuur twee-dimensionaal in model gebracht door een netwerk, bestaande uit een groot aantal eindige elementen. De vorm, grootte en verdeling van de elementen is zodanig gekozen, dat de mechanische eigenschappen van het gesteente en de spanningscondities tijdens de gehele periode van gasproductie voldoende representatief ingevuld en aangepast kunnen worden. Er wordt in het computerprogramma onderscheid gemaakt tussen twee typen blijvende gesteentevervorming, nl. vervorming die (nog) geen breuk veroorzaakt, en vervorming waarop wel een breuk in het gesteente volgt.

De mogelijkheid van breukbeweging is getest aan de hand van een netwerk met materiaaleigenschappen en spanningscondities, die relatief gunstig zijn voor breukreactivering en het ontstaan van nieuwe breuken. Het model is in grote lijnen ontleend aan de structuur van de ondergrond ter hoogte van Meeden (zie fig. 2), waar een maximale verandering in de dikte van de steenzoutlaag boven het reservoir voorkomt. Om de gevolgen van de gasproductie op het erboven liggende gesteente zo groot mogelijk te laten zijn, is in het model een directe verbinding aangebracht tussen een breuk in het reservoir en een bestaande breuk boven het steenzout, die reikt tot een diepte van slechts 500 m onder het maaiveld. Er ontstaat dan het netwerkmodel getoond in fig. 3a.

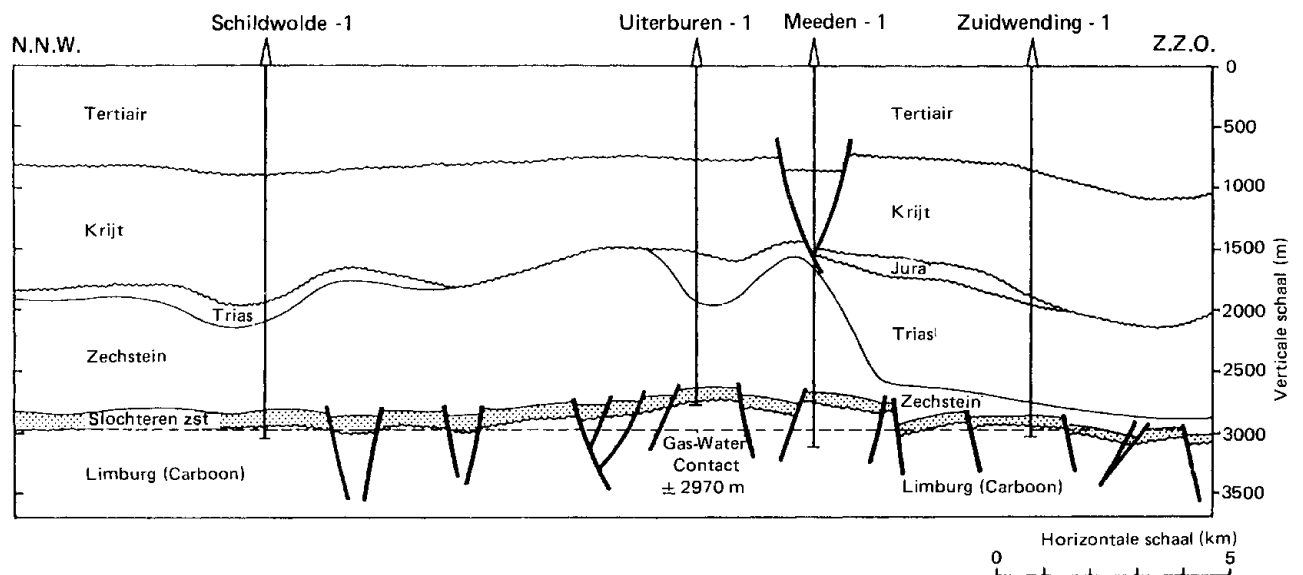


Fig. 2 Dwarsdoorsnede door de ondergrond van Groningen in het centrale en zuidelijke deel van het Groningen gasveld. De gashoudende laag is de Slochteren zandsteen op een diepte van ongeveer 2900 m. De Zechstein formatie bestaat uit een steenzoutafzetting, die ondoorlaatbaar is voor gas.

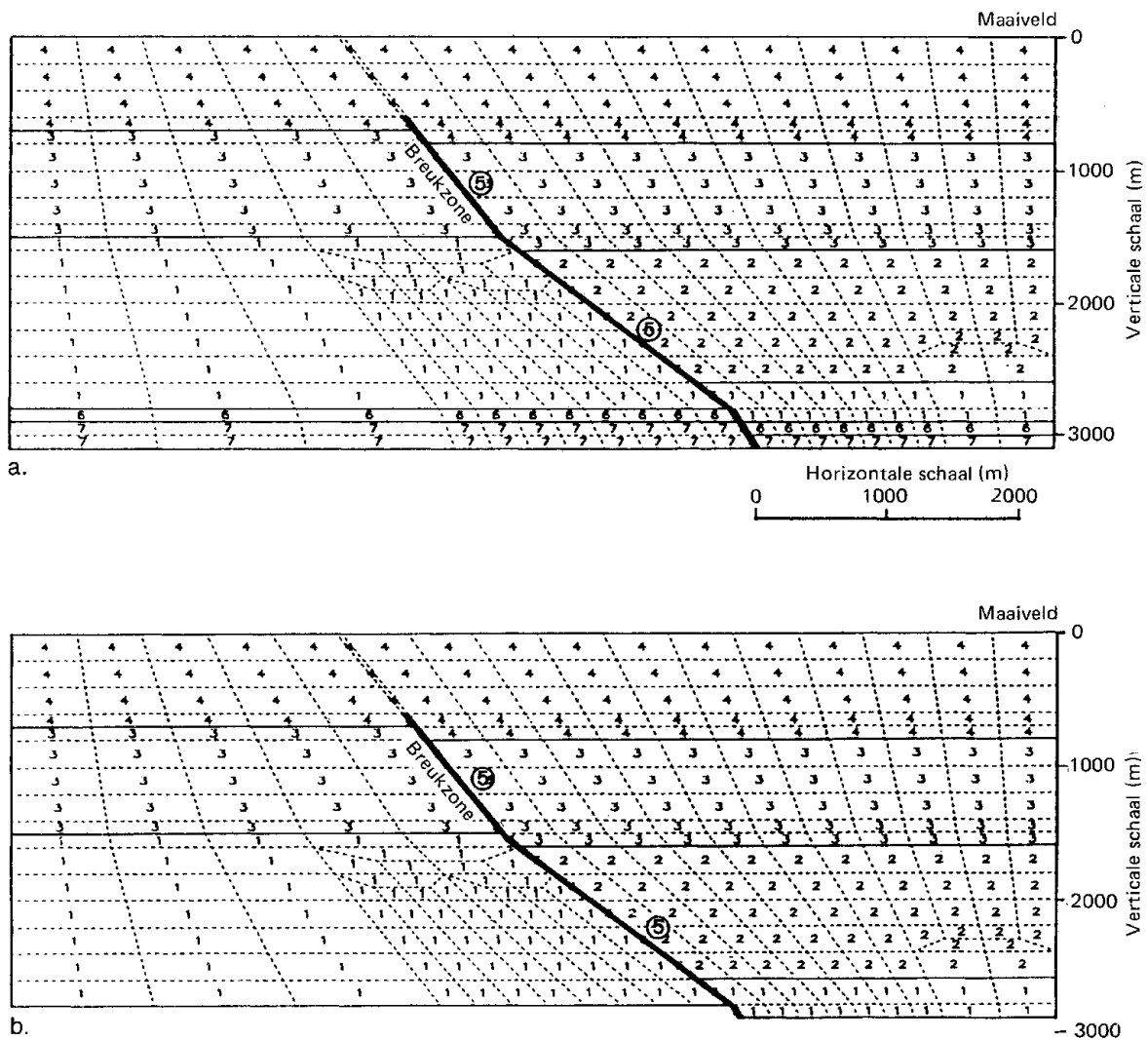


Fig. 3 Eindige elementennetwerk.
 a. ten behoeve van analyse I.
 b. ten behoeve van analyse II.

Verklaring der cijfers:
 1 = Zechstein steenzout
 2 = Trias gesteentelaag
 3 = Krijt gesteentelaag
 4 = Tertiair gesteentelaag
 5 = zout langs breukzone
 6 = Slochteren zandsteen (gasreservoir)
 7 = Limburg formatie (Carboon)

De Slochteren zandsteen en het eronder liggende Carboon-gesteente worden relatief hard en bros in model gebracht, het Zechstein steenzout zwak en buigzaam, terwijl de gesteenten uit het Trias, Krijt en Tertiair er qua eigenschappen tussenin zitten. De smalle breukzone wordt opgebouwd gedacht uit steenzout om breukreactivering ten gevolge van ongelijkmatige reservoircompactie te vergemakkelijken. Een dergelijke breuk heeft afsluitende eigenschappen, zodat een groot contrast in reservoirdruk over de breukzone realistisch is.

Uitgaande van het bovenstaande twee-dimensionale model van de ondergrond heeft men op KSEPL twee verschillende analyses uitgevoerd. In analyse I wordt het verloop van de gasproductie nagebootst door een drukafname in de poriën van het reservoirgesteente (code 6 in fig. 3a) aan één kant van de breuk, met als resultaat een neerwaartse verplaatsing van de bovenkant van het reservoirgesteente. In analyse II is het gasreservoir zelf weggelaten (zie fig. 3b, waarin de lagen 6 en 7 uit fig. 3a dus ontbreken). Door een neerwaartse verplaatsing van de onderkant van het steenzout (code 1 in fig. 3b) kan men reservoircompactie nabootsen. Hoewel analyse I beter de feitelijke situatie ondergronds nabootst dan analyse II, heeft analyse II het voordeel dat een willekeurig grote compactie bestudeerd kan worden.

3 Resultaten

De maximale drukdaling in het gasreservoir van ongeveer 300 bar is in analyse I toegepast op zowel het reservoirgedeelte, dat alléén rechts van de breuk ligt, als het gedeelte dat alléén links van de breuk ligt. De resulterende posities waar blijvende gesteentevervorming optreedt zijn getoond in de figuren 4a en b. Het is duidelijk, dat in beide gevallen alléén vervormingen zeer dicht bij de breuk aan de bovenkant van het reservoir optreden. Deze vervormingen geven bovendien geen aanleiding tot het optreden van nieuwe breuken.

In analyse II is de breukgevoeligheid van het gesteente op uitgebreidere schaal getest. In fig. 5a is de situatie getoond, dat de onderkant van de Zechstein zoutlaag rechts van de breukzone 1 m naar beneden verplaatst wordt. Deze daling is al groter dan de voorspelde 0,65 m reservoir-

compactie uit de studie van de NAM. Desondanks laat ook fig. 5a geen blijvende vervormingen zien in het hoger gelegen gesteente. Het opvoeren van de grootte van de verplaatsing tot 2,6 m heeft tot gevolg dat de vervormingen wél doorzetten naar hoger gelegen niveau's, zoals fig. 5b laat zien, maar reactivering treedt slechts zeer beperkt op in het onderste gedeelte van de breuk. De neerwaartse verplaatsing moet tot minstens 12,4 m vergroot worden, alvorens een breuk ontstaat die het maaiveld bereikt. Deze verplaatsing is bijna 20 keer groter dan de voorspelde maximale compactie van het gasreservoir. De aldus ontstane breuk is getoond in fig. 5c. Het valt hierbij op dat er een nieuwe breuk is ontstaan onder een hellingshoek van 60° met het maaiveld, terwijl de bestaande breukzone wel wat blijvende vervorming ondergaat, maar duidelijk niet gereactiveerd wordt.

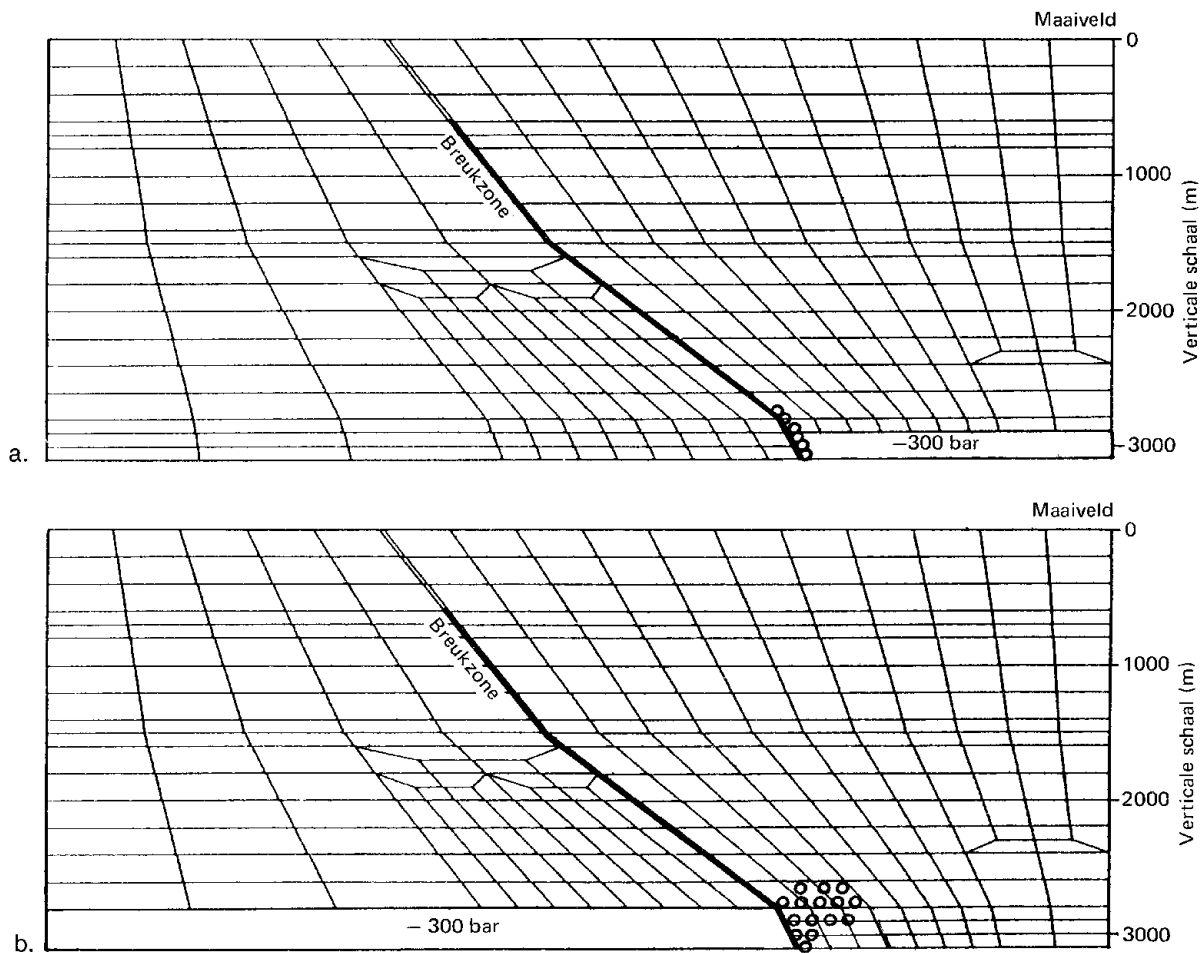


Fig. 4 *Plastische vervorming ten gevolge van een drukafname van 300 bar (plaats van de vervorming weergegeven door kleine cirkels).*

a. *in het reservoir rechts van de breuk gelegen.*

b. *in het reservoir links van de breuk gelegen.*

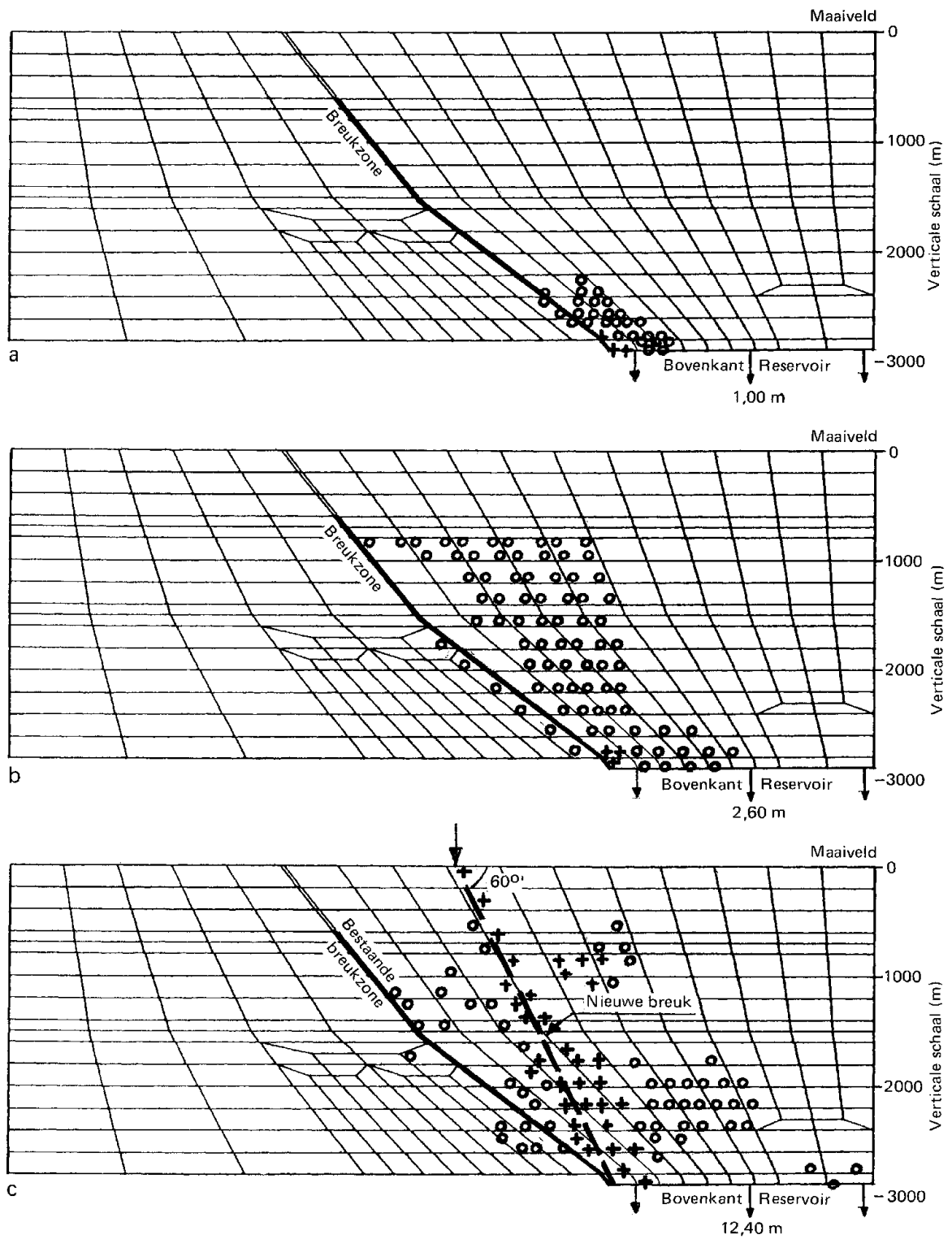
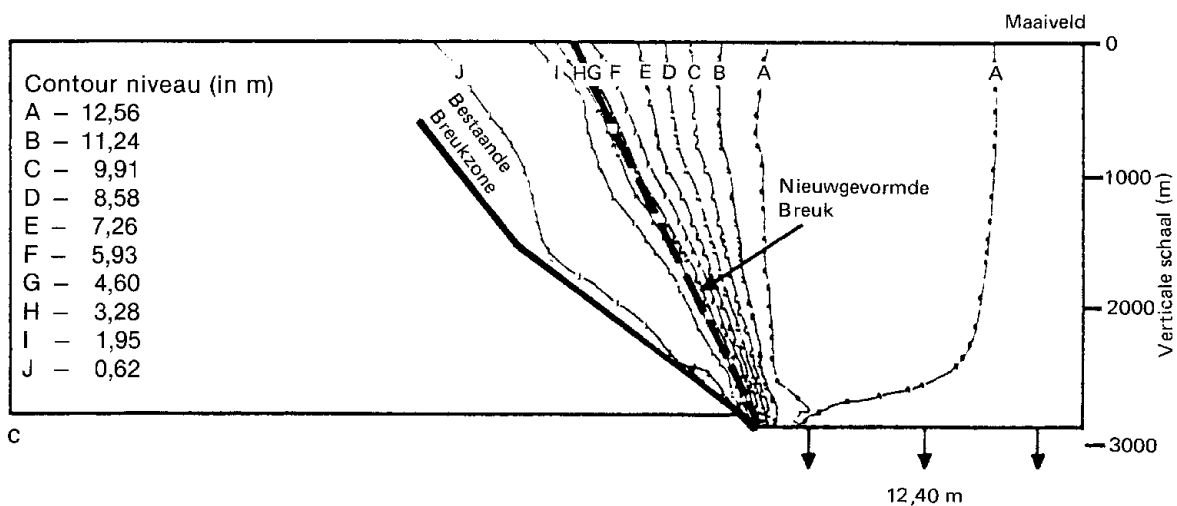
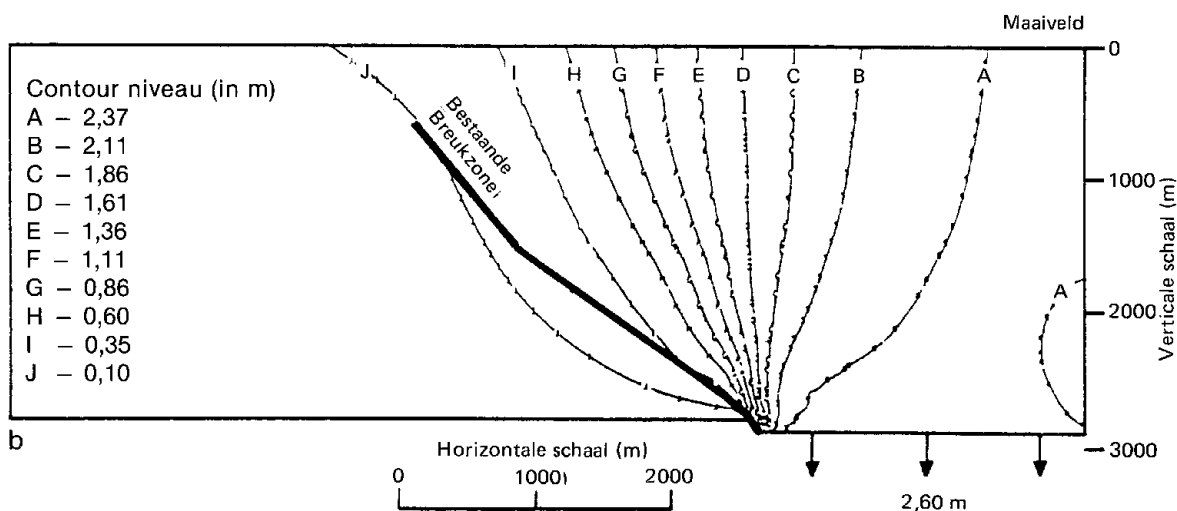
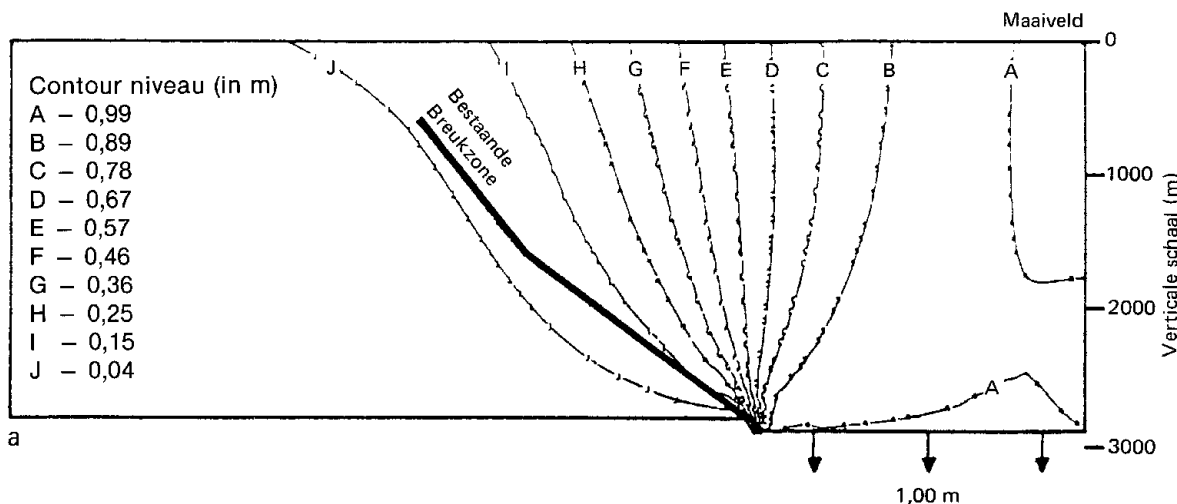


Fig. 5 *Plastische vervorming, gepaard gaande met de ontwikkeling van een breuk ten gevolge van een neerwaartse verplaatsing van de bovenkant van het reservoir, i.e. onderkant Zechstein zoutlaag, rechts van de breukzone (plaatsen van blijvende vervorming weergegeven door cirkels; ontwikkeling van een breuk weergegeven door plustekens).
 a : neerwaartse verplaatsing is 1,00 m.
 b : neerwaartse verplaatsing is 2,60 m.
 c : neerwaartse verplaatsing is 12,40 m; de pijl ter hoogte van het maaiveld geeft de plaats aan, waar de nieuw gevormde breuk het aardoppervlak bereikt.*

Naast vervormingsprofielen leveren beide analyses ook contourdiagrammen op. Deze contouren geven aan in welke richting en in welke mate de daling, veroorzaakt door de compactie van het reservoir, zich voortplant. In fig. 6 zijn drie contourdiagrammen afgebeeld, die betrekking hebben op de in analyse II bestudeerde neerwaartse verplaatsingen van respectievelijk 1 m, 2,6 m en 12,4 m. Hieruit blijkt dat in de gevallen van 1 m en 2,6 m neerwaartse verplaatsing (figuren 6a en 6b) de contourlijnen gelijkmatig naar het maaiveld uitwaaiëren, wat tevens duidt op een gelijkmatige bodemdaling. Figuur 6c laat een concentratie van contourlijnen zien, waaruit blijkt dat de daling minder gelijkmatig verloopt als gevolg van een doorlopende breuk naar het maaiveld. Uit de drie voorbeelden van fig. 6 blijkt tevens, dat de bodemdaling in het diepste punt van het maaiveld vrijwel gelijk is aan de compactie van het gasreservoir op 2900 m diepte.

veld uitwaaiëren, wat tevens duidt op een gelijkmatige bodemdaling. Figuur 6c laat een concentratie van contourlijnen zien, waaruit blijkt dat de daling minder gelijkmatig verloopt als gevolg van een doorlopende breuk naar het maaiveld. Uit de drie voorbeelden van fig. 6 blijkt tevens, dat de bodemdaling in het diepste punt van het maaiveld vrijwel gelijk is aan de compactie van het gasreservoir op 2900 m diepte.



4 Conclusies

Uitgaande van de praktijk van het Groningen gasveld, waarin een drukafname van 300 bar en een reservoircompactie van 0,65 m zal optreden, geven de uitgevoerde modelstudies aan dat het ontstaan of reactiveren van een breuk ten gevolge van gaswinning niet zal voorkomen.

De analyses wijzen uit dat een compactie die ongeveer 20 keer zo groot is als de verwachte compactie van 0,65 m, dat wil zeggen 12,40 meter, er pas toe zou leiden dat een breuk de aardoppervlakte bereikt.

Verantwoording

Deze publikatie beschrijft in verkorte vorm de door KSEPL gevolgde studiemethode, de resultaten, en de conclusies. Het in de literatuur genoemde, gedetailleerde technische rapport is opgesteld door A. Koopman, G. Mäkel en A. Speksnijder. Het Staatstoezicht op de Mijnen en de Rijks Geologische Dienst hebben zowel de publikatie als het rapport bestudeerd en geautoriseerd.

Literatuur

Koninklijke/Shell Exploratie en Productie Laboratorium: 'A study on the possibility of generation and/or reactivation of faults by depletion of gas in the Groningen gas field (The Netherlands)', Rapport RKER.86.120., 1986.



Fig. 6
Contourdiagrammen, die grootte en verdeling van dalingen aangeven ten gevolge van een neerwaartse verplaatsing van de bovenkant van het reservoir rechts van de bestaande breuk, voor respectievelijk drie verschillende verplaatsingen (1,00 m, 2,60 m en 12,40 m).

Deelstudie II:

**Mogelijkheid van schade aan de bebouwing
door wijzigingen in het peil van polder- en boezemwater**



Fig. 1
 Gemeentelijke indeling van de provincie Groningen, met de begrenzing van het gebied waar bodemdaling wordt voorspeld.

De gemeentelijke indeling geeft de toestand weer op 1 januari 1987. Voor de grens van het bodemdalingsgebied is de contourlijn aangehouden waar de daling gelijk is aan 0,05 m volgens de prognose voor het jaar 2025. Deze contourlijn komt vrijwel overeen met die voor een daling van 0,01 m volgens de prognose voor het jaar 1984.

1 Inleiding

Door de aardgaswinning in de provincie Groningen vindt een schotelvormige bodemdaling plaats. Dit heeft tot gevolg dat de peilen van polder- en boezemwater plaatselijk moeten worden aangepast. Hierdoor kunnen ongelijkmatige zakkingen van het aardoppervlak optreden die onder bepaalde omstandigheden scheurvorming in de bebouwing zouden kunnen veroorzaken.

Deze problematiek is in de voorliggende publikatie nader uitgewerkt aan de hand van een onderzoek dat is uitgevoerd door Grondmechanica Delft te Delft, in samenwerking met het instituut TNO voor Bouwmaterialen en Bouwconstructies (TNO-IBBC) te Rijswijk en het Ingenieursbureau TAUW Infra Consult te Deventer. Het doel van het onderzoek is als volgt:

- het geven van een overzicht welke zakkingen, afhankelijk van de peilveranderingen, in het betreffende gebied zullen optreden,
- het bepalen van de kans op schade aan de bebouwing als gevolg van de peilveranderingen,
- het verschaffen van inzicht in de factoren die bij de beoordeling van individuele schadegevallen van belang zijn,
- het aangeven van maatregelen om de kans op schade zoveel mogelijk te beperken.

Deze publikatie heeft een algemeen karakter en is niet bedoeld als een handleiding waarmee de oorzaak van scheurvorming in een willekeurig gebouw kan worden opgespoord. Zoals gezegd geeft zij echter wel een inzicht in de factoren die deze scheurvorming beïnvloeden, zodat ook voor individuele schadegevallen een indruk kan worden verkregen of de bodemdaling als oorzaak van schade in aanmerking kan komen.

Het onderzoek heeft zich gericht op het gebied dat in fig. 1 is weergegeven. De steden Groningen en Delfzijl zijn in het onderzoek niet beschouwd, omdat er zodanige maatregelen zullen worden getroffen, dat in deze steden vrijwel geen relatieve peilveranderingen zullen optreden. Bij het onderzoek is voornamelijk uitgegaan van voorhanden zijnde gegevens. Er is vrijwel geen terrein- of laboratoriumonderzoek uitgevoerd. Wel is gebruik gemaakt van resultaten van grond- en laboratoriumonderzoek dat in het verleden is verricht.

De volgende hoofdstukken geven een samenvatting van het onderzoek en de daaruit voortvloeiende conclusies en aanbevelingen. Bij het onderzoek zijn drie geheel verschillende vakgebieden betrokken: waterhuishouding, grondmechanica en krachtswerking in gebouwen. Omdat slechts weinigen op alle drie de vakgebieden deskundig zullen zijn, is er naar gestreefd om de essentie van het onderzoek weer te geven in eenvoudige bewoordingen en tekeningen. Sommige onderdelen bezitten daardoor een wat meer verklarend karakter dan men veelal in technische publikaties zal aantreffen. Vaktermen zijn steeds ter plaatse verklaard. De technische uitgangspunten voor de berekeningen en de voornaamste literatuur zijn in beknopte vorm aan het eind van de publikatie weergegeven.

De samenstellers hopen op deze wijze alle relevante technische informatie te hebben overgebracht en tegelijkertijd de materie voor belangstellenden op redelijk begrijpelijke wijze te hebben beschreven.

2 Probleemstelling

2.1 Gevolgen van de aardgaswinning

Door de aardgaswinning in de provincie Groningen treedt over een vrij groot gebied een schotelvormige bodemdaling op, die in de loop van de tijd zal toenemen, zie fig. 2 en 3. De daling wordt veroorzaakt door de samendrukking van de poreuze zandsteenlaag waaraan het gas wordt onttrokken. Deze laag is gemiddeld 160 m dik en bevindt zich ca. 3 km beneden het aardoppervlak, dat verder als maaiveld zal worden aangeduid. De samendrukking van de genoemde zandsteenlaag verloopt heel geleidelijk en gelijkmatig. Alle grondlagen die zich hierboven bevinden, zakken in principe even gelijkmatig mee. Hetzelfde geldt voor de hierop staande bebouwing die hiervan geen enkele schade kan ondervinden, zolang zich geen breuken in de zandsteenlaag voordoen die zich tot aan het maaiveld voortplanten. Het laatstgenoemde aspect is behandeld in deel I van deze publikatie.

De daling van het maaiveld zou zelfs geheel onopgemerkt kunnen verlopen als men maar kans zou zien om de waterstand in het gebied in dezelfde schotelvorm te verlagen; mogelijke problemen buitendijks blijven hierbij buiten beschouwing. Per polder – of correcter geformuleerd: per peilgebied – kan natuurlijk alleen maar een horizontale waterstand optreden, meestal aangeduid als polderpeil en in meer algemene termen als open waterpeil. Om veranderingen ten opzichte van de vroegere toestand zo klein mogelijk te houden, zal men trachten om de gemiddelde drooglegging ongeveer constant te houden. Met drooglegging wordt de afstand bedoeld tussen het maaiveld en het slootpeil. De drooglegging zal dus plaatselijk groter of kleiner kunnen worden dan de gemiddelde drooglegging, zoals in fig. 4 schematisch is weergegeven.

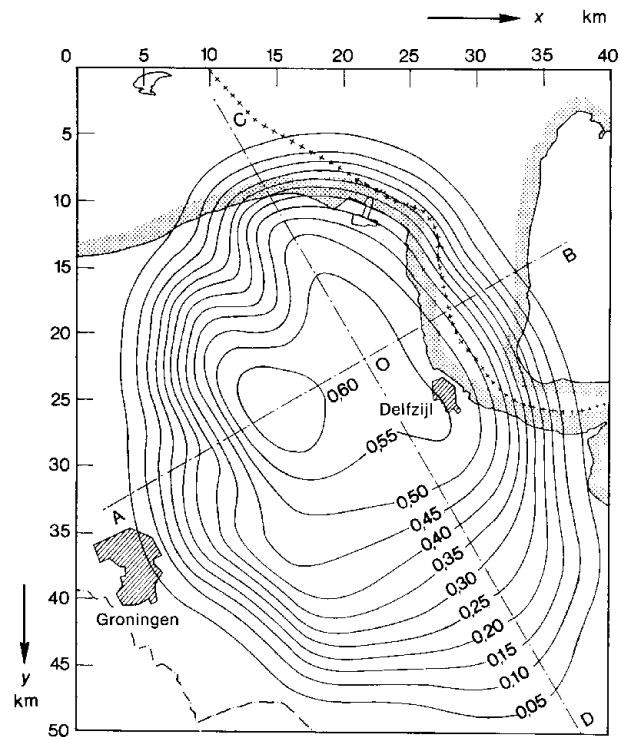


Fig. 2
Prognose van de bodemdaling in het jaar 2025, weergegeven als contourlijnen (daling in m).

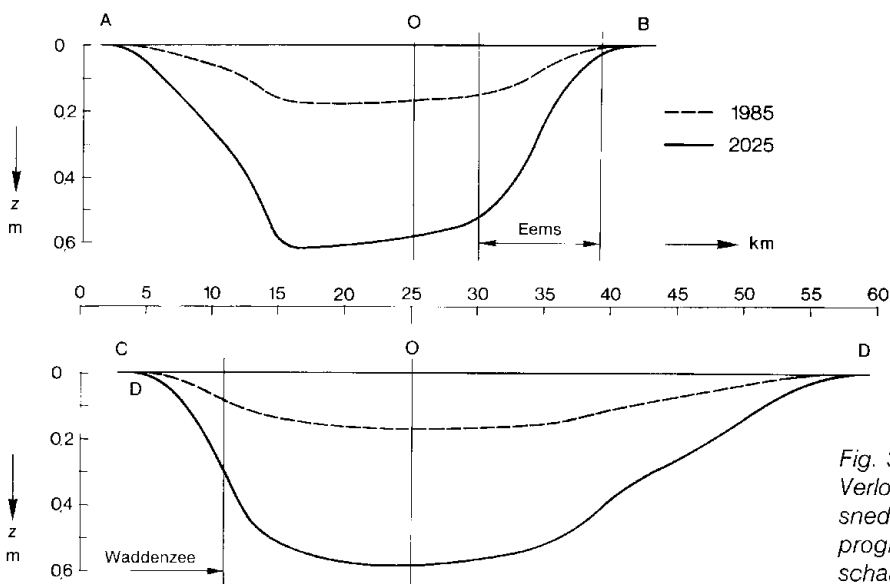


Fig. 3
Verloop van de bodemdaling over de doorsneden A-B en C-D van fig. 2, volgens de prognoses voor 1985 en 2025, (lengteschaal: hoogteschaal = 1 : 25000).

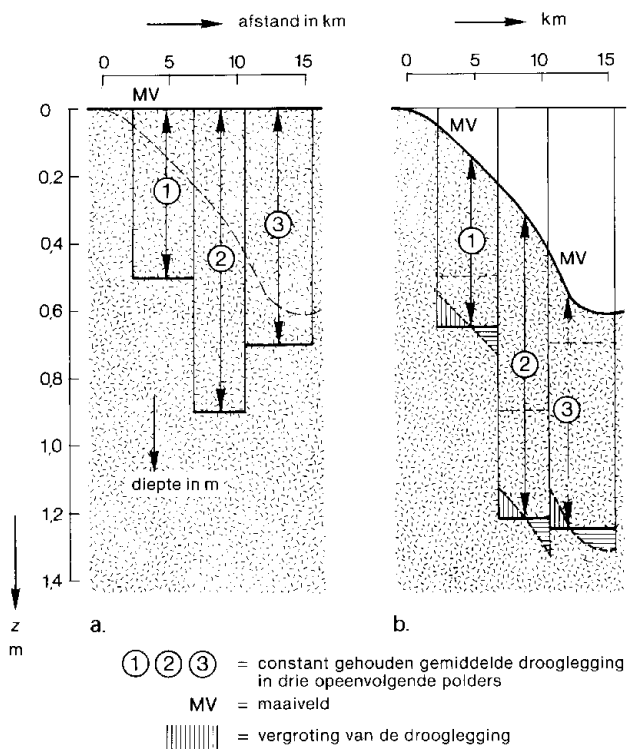


Fig. 4
 Aanpassing van de drooglegging per polder (lengteschaal : hoogteschaal = 1 : 25000).
 a. drooglegging van drie peilgebieden vóór bodemdaling.
 b. onveranderde gemiddelde drooglegging na bodemdaling.

In de gebieden waar de drooglegging groter wordt dan voorheen, neemt de opwaartse waterdruk op de grond af. Dit heeft hetzelfde effect alsof er een gelijkmatige druk op de grond wordt uitgeoefend. Door deze belasting zullen de bovenste lagen direct onder het maaiveld worden samengedrukt. Sterk samendrukbare lagen noemt men slappe lagen, weinig samendrukbare lagen noemt men stijve lagen. De slappe lagen in het bodemdalingsgebied hebben een dikte die ongeveer varieert tussen 5 m en 20 m; in het zuiden zijn ze zelfs geheel afwezig.

De samendrukking van de bovenste lagen van de ondergrond zal in het vervolg als zetting worden aangeduid. Bij een volkomen gelijkmatige zetting zou de daarop staande bebouwing gewoon meezakken en zou geen schade zijn te verwachten. In werkelijkheid zullen veelal ongelijkmatige zettingen optreden.

2.2 Oorzaken van ongelijkmatige zetting

De zettingen van de grond zijn in hoofdtekken evenredig met de grootte van de grondwaterstands daling en omgekeerd evenredig met de stijfheid van de grond; hoe stijver de grond hoe geringer de zetting. De oorzaken voor ongelijkmatige zettingen liggen dan ook voor de hand:

1. Een ongelijkmatige daling van de grondwaterstand.
 De gelijkmatige daling van het peil geldt alleen maar voor de sloten en de kanalen. Per kavel varieert de grondwaterstand echter afhankelijk van het seizoen. In de winter kan men een bol verloop verwachten en in de zomer een hol verloop, zie fig. 5. Dus zelfs bij een volkomen homogene grond, die overal precies dezelfde samenstelling en eigenschappen bezit, zal het verlopen de grondwaterpeil een verloopende zetting van de grond veroorzaken.
2. Een ongelijkmatige samenstelling van de grond, gezien in horizontale richting. Men spreekt dan van inhomogene grond. Over een afstand van enkele meters kan de stijfheid van de grond verschillen. Bij één en dezelfde toename van de belasting treden dan toch ongelijke zettingen op, zie fig. 6.

Bij een inhomogene grond en een variërende grondwaterstands daling kunnen de effecten elkaar zowel versterken als verzwakken.

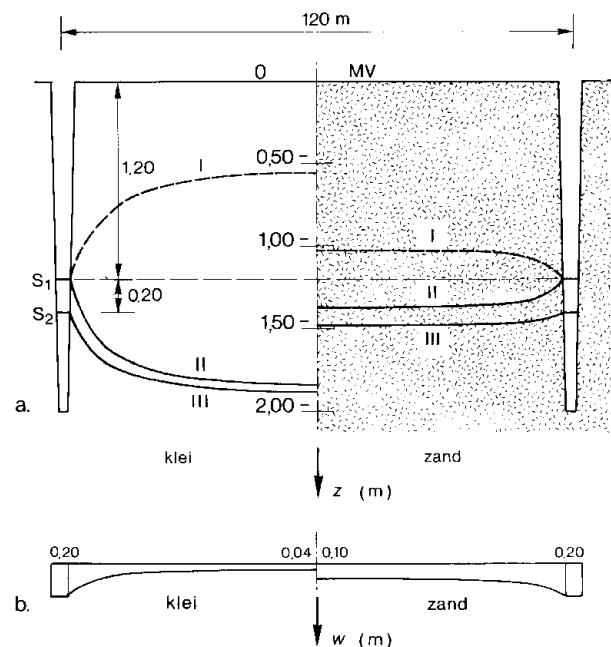


Fig. 5
 Verloop van de grondwaterstand over de helft van een kavel voor klei (linkerhelft) en zand (rechterhelft), (lengteschaal : hoogteschaal = 1 : 40).
 a. I verloop in een natte winter.
 II verloop in een zeer droge zomer.
 III verloop in een zeer droge zomer na een slootpeilverlaging van 0,20 m.
 b. Verloop van de grondwaterstands daling voor klei en zand.

S₁, S₂ = slootpeil vóór en na peilverlaging.

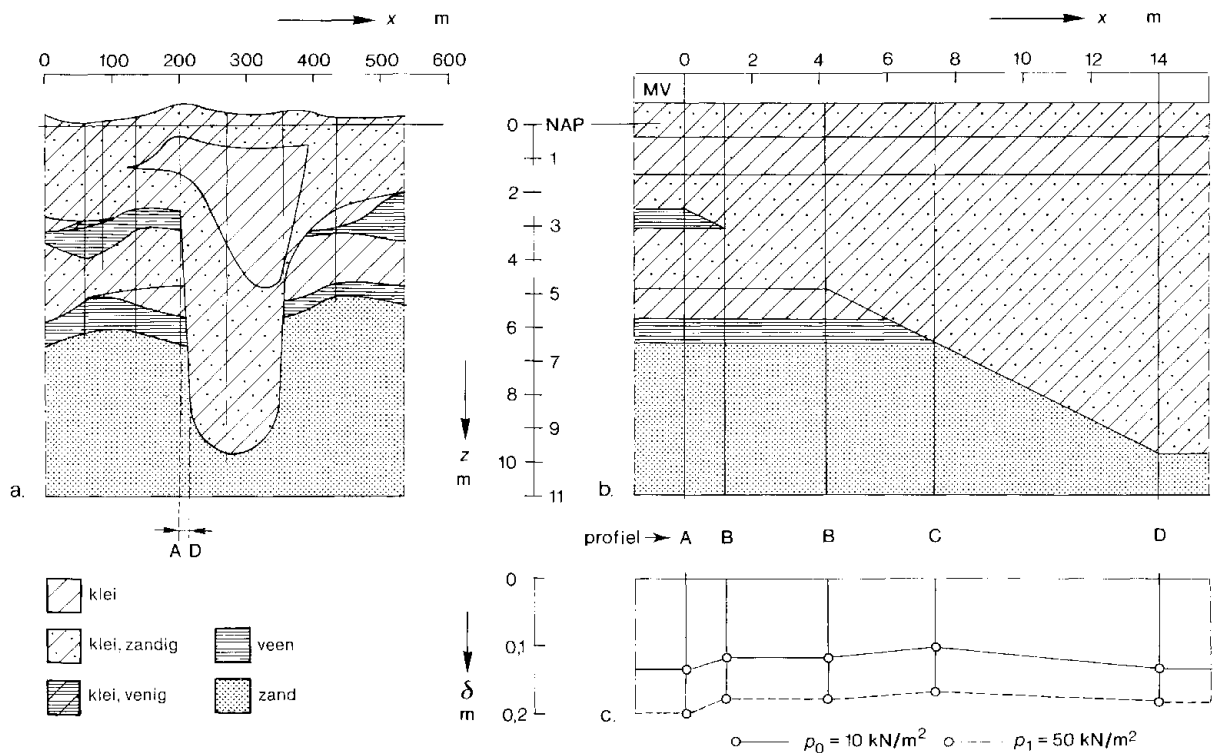


Fig. 6
 Voorbeeld van een inhomogene grondgesteldheid.
 a. Geologisch profiel bij een opgevlude kreek in de nabijheid van Appingedam, (lengteschaal : hoogteschaal = 1 : 50).
 b. Geschematiseerd grondprofiel ter plaatse van de linker kreektrand van fig. 6a, (lengteschaal : hoogteschaal = 1 : 1);
 c. Zakking in de verticalen A, B, C en D van fig. 6b ten gevolge van een gelijkmatig verdeelde belasting $p_0 = 10 \text{ kN/m}^2$ en van een funderingsstrook ter breedte van 1 m met een belasting $p_1 = 50 \text{ kN/m}^2$, (lengteschaal : hoogteschaal = 1 : 20).

Door het verschil in lengteschalen tussen fig. 6a en 6b is de afstand AD in fig. 6a aanmerkelijk kleiner dan in fig. 6b. Uit fig. 6c blijkt dat de veenlagen een belangrijk aandeel leveren in de zettingen van de ondergrond.

In het holocene pakket hebben zich in het verleden, onder invloed van inbraken vanuit zee en de werking van eb en vloed, geulen en krekken gevormd die later weer met andersoortige materialen zijn opgevuld. Daardoor kunnen plaatselijk vrij grote afwijkingen in de samenstelling van de ondergrond optreden, zie fig. 6a.

2.3 Effect van zettingen op de bebouwing

De vraag rijst hoe de bebouwing op deze zettingen zal reageren en of er ook schade is te verwachten. Dit hangt af van de vorm en afmetingen van een gebouw, het materiaal waaruit het is opgetrokken, de wijze van funderen en de mate van inhomogeniteit van de grond. Zo zal een kort gebouw minder snel schade ondervinden dan een lang gebouw en zal een gebouw van gewapend beton minder snel scheuren dan een gemetseld gebouw.

Erg belangrijk is de wijze waarop het gebouw is gefundeerd, zie paragraaf 2.4. De wijze van funderen wordt mede bepaald door de samenstelling van de ondergrond in het onderzoeksgebied. Deze kan als volgt worden beschreven. Direct onder het maaiveld bevinden zich slappe lagen uit een jong geologisch tijdperk, het Holoceen. Dit lagenpakket strekt zich in het algemeen uit tot een diepte variërend tussen 5 m en 20 m beneden maaiveld en is samengesteld uit klei, veen, zand of een combinatie van deze grondsoorten. Deze lagen rusten op stijvere lagen uit een ouder geologisch tijdperk, het Pleistoceen. Het holocene lagenpakket kan vrij gemakkelijk worden samengedrukt door dalingen van de grondwaterstand, het pleistocene lagenpakket kan in dit verband als vrijwel onsamendrukbare worden beschouwd.

2.4 Typen funderingen

In het onderzoeksgebied komt een drietal funderingstypen voor die elk op hun eigen wijze reageren op zettingen van de ondergrond.

Bij een fundering op staal rust het gebouw rechtstreeks via een verbreding van de muur op de bovenste samendrukbare lagen, zie fig. 7a. Het gebouw moet de zettingen van deze lagen dus rechtstreeks volgen. Bij ongelijkmatige zettingen – door welke oorzaak dan ook – zal het gebouw de zettingsverschillen trachten te egaliseren en te overbruggen. Meer dan eens blijkt dit niet mogelijk zonder scheurvorming in de muren en scheefstand van het gebouw.

Bij een fundering op gewapend betonpalen worden de palen zo diep in de ondergrond geheid dat ze worden ondersteund door draagkrachtige lagen uit het Pleistoceen, zie fig. 7b. De zettingen van de slappe lagen gaan dan min of meer onopgemerkt aan het gebouw voorbij omdat de palen in de stijve laag niet zakken. De slappe grond kan wel min of meer aan de betonpalen gaan 'hangen', men spreekt dan van negatieve kleef. Dit veroorzaakt een extra belasting op de palen, die alleen in extreme gevallen alsnog een zakking van de palen tot gevolg kan hebben. De palen zijn dan niet diep genoeg in een stijve laag geheid.

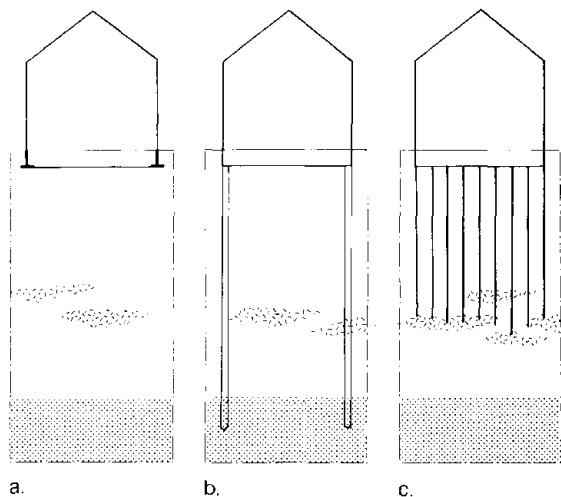


Fig. 7

Verschillende wijzen van funderen.

- a. Fundering op staal (details in fig. 29b).
- b. Fundering op gewapend betonpalen in een draagkrachtige laag.
- c. Fundering op houten palen 'op klee'.

Bij een fundering op houten palen worden de echte draagkrachtige lagen meer dan eens niet bereikt, zie fig. 7c. De palen onttelen een deel van hun draagvermogen aan de wrijvingskrachten tussen palen en slappe grondlagen. Deze wrijvingskrachten ontstaan tijdens het heien van de palen. De palen 'hangen' nu min of meer aan de slappe grond; dit wordt positieve kleeft genoemd. Bij zetting van die slappe lagen zullen de palen gedeeltelijk meezakken. De zakking van een gebouw is in principe minder groot dan bij een fundering op staal, maar schade aan het gebouw is nog wel mogelijk.

2.5 Karakteristieke bebouwing in het onderzoeksgebied

In het beschouwde gebied komen voornamelijk woningen en boerderijen voor; deze zijn vrijwel uitsluitend uitgevoerd als laagbouw in metselwerk. Ongeveer 1/3 deel van de woningvoorraad is 'oude bouw' van voor 1930, uitgevoerd in steens metselwerk (muurdikte 0,22 m); aanbouwen ook in halfsteens metselwerk (muurdikte 0,11 m). Het betreft veelal vrijstaande woningen of 'twee onder één kap'. Vrijwel alle woningen zijn gefundeerd op staal. Bij de zgn. 'nieuwe bouw' met spouwmuren is zowel op staal als op palen gefundeerd (spouwmuren bestaan uit twee halfsteensmuren en een tussenruimte voor isolatiedoelinden, zie fig. 29b). Ongeveer 40% van alle woningen is uitgevoerd als rijtjeswoningen met 3 tot 8 woningen per rijtje.

De boerderijen in het onderzoeksgebied kunnen in drie typen worden onderscheiden: het kop-hals-romp type, het 'alles onder één kap' type en het type met gescheiden woon- en bedrijfsgedeelte. Over de funderingen van de boerderijen zijn weinig gegevens bekend. Verwacht mag worden dat de meeste bedrijfsgebouwen op staal zijn gefundeerd. Bij de woongebouwen zullen zowel funderingen op staal als op palen zijn toegepast.

Bedrijfshallen komen weinig voor. Openbare gebouwen zoals kerken, scholen ed. zijn vrijwel uitsluitend uitgevoerd in traditioneel metselwerk.

Bij de 'oude bouw' is veel zakking en scheurvorming geconstateerd. Na de droge zomers van 1975 en 1976 zijn echter ook veel klachten gemeld over toenemende scheurvorming en zakking van 'nieuwe' op staal gefundeerde gebouwen. De muren van de meeste bedrijfsgebouwen van de boerderijen vertonen matige tot ernstige scheurvorming en scheefstand.

2.6 Onderzoek

In het kader van het onderzoek zijn voor het vaststellen van schade de volgende criteria gehanteerd:

- doorgaande scheurvorming in het metselwerk
- scheefstand groter dan 5 mm per m.

Het criterium ten aanzien van de scheurvorming houdt in dat de trekspanningen die optreden in het vlak van de muren, de treksterkte van het metselwerk niet mogen overschrijden.

Zoals reeds eerder werd vermeld, heeft een verlaging van het open waterpeil een daling van de grondwaterstand tot gevolg. Dit heeft op zijn beurt hetzelfde effect als een belasting op het maaiveld. Hierdoor zullen zettingen ontstaan die over het algemeen niet gelijkmatig zullen zijn. Het ligt voor de hand te zoeken naar die peilverlagingen die nog toelaatbaar zijn, zonder dat schade aan de bebouwing behoeft te worden verwacht.

Voor wat betreft de waterhuishouding en de te verwachten zettingen is het gehele gebied beschouwd waar bodemdaling door aardgaswinning zal optreden met uitzondering van de steden Groningen en Delfzijl. Bij de bebouwing zijn uitsluitend constructievormen beschouwd die kwetsbaar voor zettingen worden geacht. Hiervoor zijn gekozen:

- een rijtje van 6 relatief nieuwe woningen in traditioneel metselwerk en gefundeerd op staal.
- een lange muur van het bedrijfsgebouwe van een boerderij, eveneens uitgevoerd in metselwerk en gefundeerd op staal.

Om uitspraken te kunnen doen welke peilverlagingen nog toelaatbaar zijn ten einde de kans op schade, c.q. de kans op verdere toename van reeds aanwezige schade, zoveel mogelijk te beperken, zijn de volgende onderzoekingen uitgevoerd:

- a. Het bepalen van het verloop van de grondwaterstand in een kavel afhankelijk van grondsoort en jaargetijde bij het huidige slootpeil en bij een peilverlaging van 0,20 m.
- b. Het bepalen van de zettingen van de grond onder invloed van het eigen gewicht van het rijtje woningen en de toename van de zettingen door daling van de grondwaterstand.
- c. Het bepalen van de spanningen en vervormingen die ontstaan in de gemetselde muren van het rijtje woningen ten gevolge van het eigen gewicht van de woningen, en de wijzigingen die optreden onder invloed van daling van de grondwaterstand.
- d. Het bepalen van de kans op scheurvorming door het eigen gewicht van het rijtje woningen en de vergroting van deze kans door daling van de grondwaterstand.
- e. Het aangeven van verlagingen van het open waterpeil die in het onderzoeksgebied toelaatbaar worden geacht.

In de volgende hoofdstukken zijn de onderdelen a. t/m e. nader uitgewerkt. Het rijtje woningen is vrij gedetailleerd onderzocht, de lange muur van het bedrijfsgebouwtje van een boerderij is meer globaal beschouwd. Uit het onderzoek is namelijk gebleken dat woningen als maatgevend moeten worden beschouwd. Indien voor het rijtje woningen geen schade hoeft te worden verwacht, dan geldt dit eveneens voor andere typen woningen die minder kwetsbaar zijn voor ongelijkmatige zettingen van de ondergrond.



Fig. 8
Peilverlagingen in het onderzoeksgebied gedurende de periode 1888 - 1985.

3 Grondwater

3.1 Waterhuishouding

De waterhuishouding van het open water in het onderzoeksgebied berust bij de waterschappen Hunsingo, Eemzijvest, Reiderzijvest en de provincie Groningen, zie fig. 10. Het waterbezwaar wordt geloosd op de Eems, de Waddenzee en het Lauwersmeer.

Ter compensatie van de natuurlijke klink en ten behoeve van een verbetering van de productie-omstandigheden in de landbouw, is het open waterpeil in de afgelopen 100 jaar in grote delen van het gebied meer dan 1 m verlaagd, zie fig. 8. Na 1960 hebben deze peilverlagingen vooral plaatsgevonden in het kader van ruilverkavelingen, zie fig. 9. In de figuren 8 en 9 zijn uitsluitend die gebieden weergegeven waar informatie over de gehele beschouwde periode beschikbaar was.

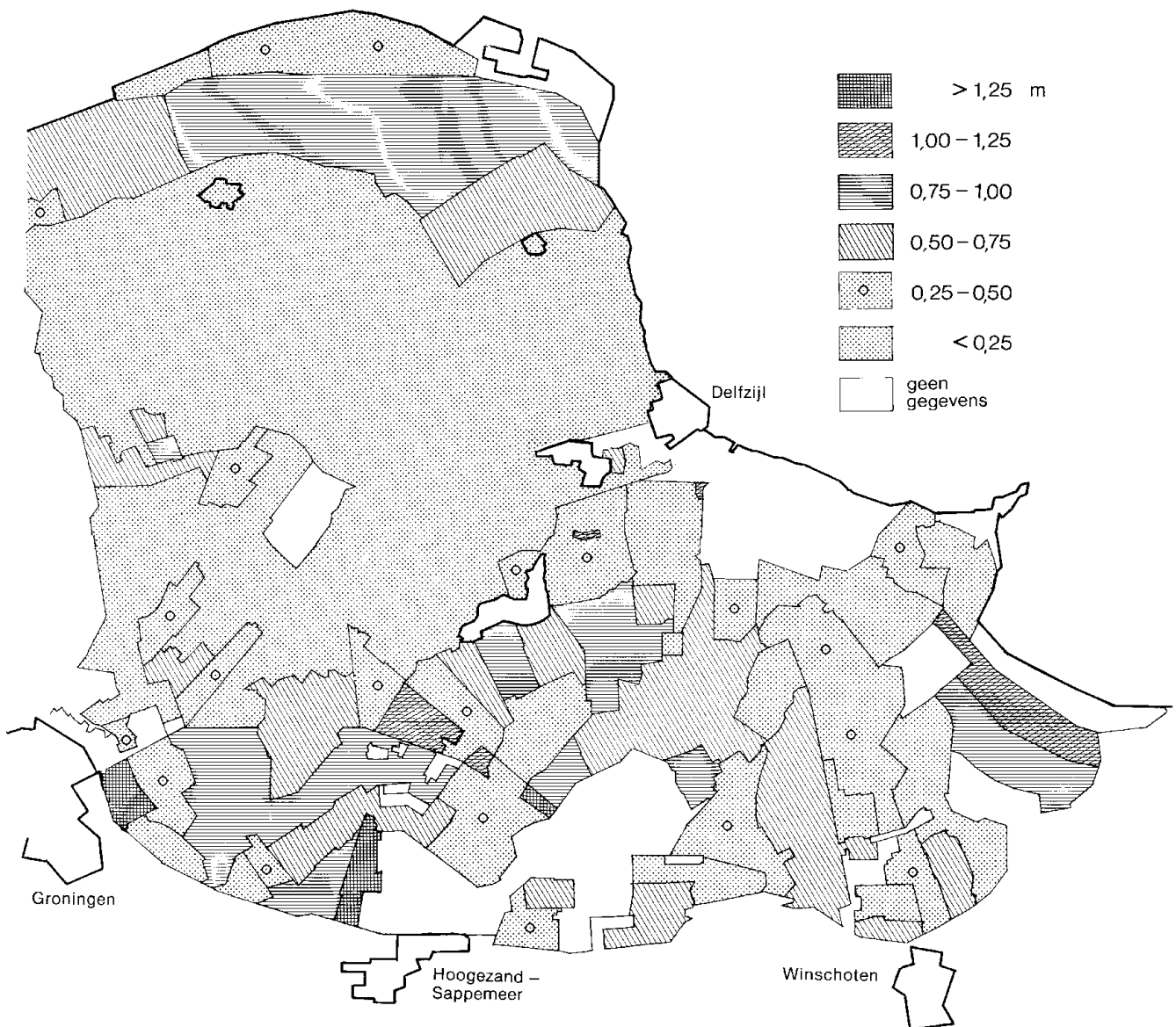
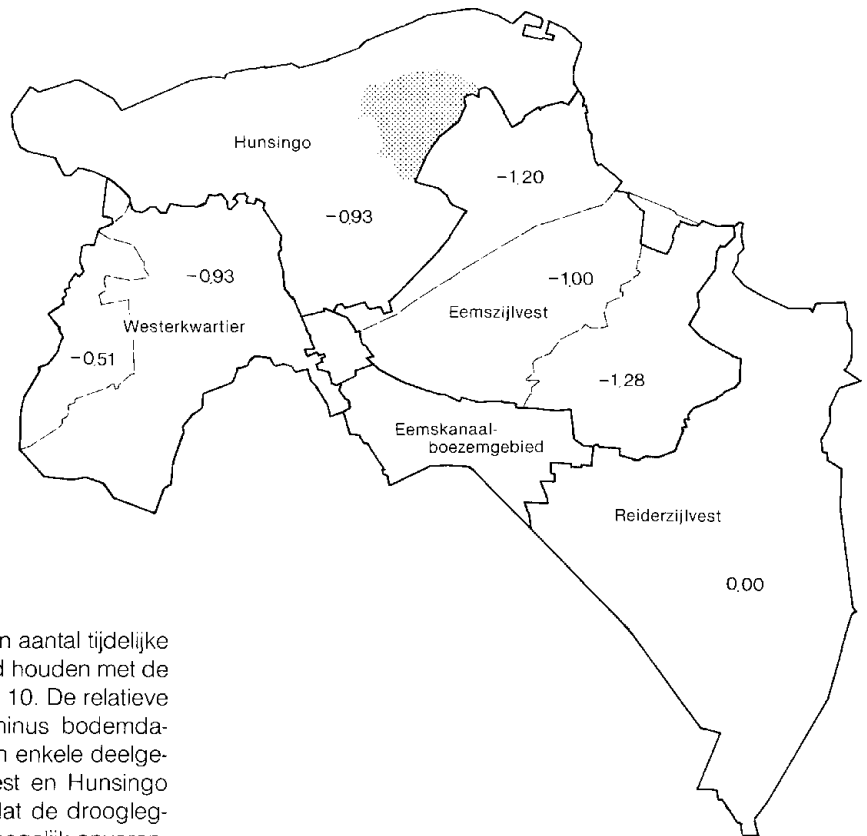


Fig. 9
Peilverlagingen in het onderzoeksgebied gedurende de periode 1960 – 1985.

Fig. 10

Waterschappen in de provincie Groningen met aanduiding van het na te streven boezempeil, aangegeven in m t.o.v. NAP. Tevens is het gebied met onderbemalingen in het waterschap Hunsingo aangegeven.



Alleen in het waterschap Hunsingo is een aantal tijdelijke onderbemalingen gerealiseerd die verband houden met de bodemdaling door aardgaswinning, zie fig. 10. De relatieve peilverlaging (= absolute peilverlaging minus bodemdaling) bedroeg overal minder dan 0,10 m. In enkele deelgebieden van de waterschappen Eemszijlvest en Hunsingo zijn de boezempeilen zodanig verlaagd, dat de drooglegging in relatie tot de bodemdaling zoveel mogelijk onveranderd is gebleven. Door de bodemdaling zijn de gemalen namelijk mee gezakt met het maaiveld en het polderpeil is ten opzichte van de gemalen ongewijzigd gebleven.

3.2 Grondwaterstandsveranderingen

Voor het onderzoek is uitgegaan van een relatieve peilverandering van maximaal 0,20 m, dat wil zeggen een toename van de drooglegging met 0,20 m. Deze peilverlaging is gekozen als een redelijk verwachting van de maximale verlaging die in verband met de bodemdaling zal worden toegepast.

Maar ook bij een constant peil van het open water varieert de hoogte van de grondwaterstand over het oppervlak van een kavel afhankelijk van het seizoen. Bepalend zijn hierbij het grondprofiel, de breedte van de kavel, de hoeveelheid neerslag, de verdamping en de wateronttrekking door gewassen. Voorts moet rekening worden gehouden met de mogelijkheid van wateraanvoer uit dieper gelegen lagen die zowel goed als slecht waterdoorlatend kunnen zijn. Dit verloop kan met behulp van computermodellen dag voor dag worden nagegaan, zij het volgens een bepaalde schematisering. Uit dergelijke berekeningen volgen ook de extreme grondwaterstanden en de tijdsduur waarover ze optreden.

De berekeningen worden hier niet in detail gepresenteerd, maar fig. 5 is typerend. Het geeft de extreme grondwaterstanden voor een lange kavel, waarbij het verloop van de grondwaterstand in breedterichting overal hetzelfde is; dat wil zeggen, voor de berekeningen is een twee-dimensionaal elementenmodel gebruikt. In alle berekeningen is uitgegaan van omstandigheden die overeenkomen met die van het zeer droge jaar 1976. Vervolgens is hetzelfde gedaan voor een verlaging van het slootpeil met 0,20 m. In alle berekeningen is het peil van het open water gedurende het gehele jaar constant verondersteld.

Uit fig. 5 blijkt dat de grondwaterspiegel in de winter, waarbij relatief veel neerslag kan worden verwacht, een bol verloop heeft en in de zomer met relatief weinig neerslag, een hol verloop. Om deze redenen wordt 's zomers in sommige polders dan ook een hoger peil gehanteerd dan 's winters. Voorts zijn de verschillen in grondwaterstand bij goed doorlatende grondsoorten, zoals zand, betrekkelijk klein ten opzichte van de verschillen bij minder goed doorlatende grondsoorten, zoals klei en veen.

De berekeningen zijn uitgevoerd voor een tiental grondprofielen. Het blijkt dat bij een slootpeilverlaging van 0,20 m, de grondwaterstandsddaling in het midden van een kavel voor elke grondsoort binnen bepaalde grenzen varieert, zie tabel 1. De kavelbreedte hangt mede af van de grondsoort. Bij veen is deze minimaal 40 m en voor de overige grondsoorten 75 m of meer.

Tabel 1
Daling van de gemiddelde laagste grondwaterstand, in een zeer droge zomer in het midden van een kavel, bij een slootpeilverlaging van 0,20 m.

grondprofiel voornamelijk bestaande uit:	slootpeil- verlaging in m	grondwater- standsddaling in m
klei	0,20	< 0,05
veen (met kleidek)	0,20	0,05 – 0,10
zand	0,20	0,10 – 0,15

Voorts zijn meer gedetailleerde berekeningen uitgevoerd naar het verloop van de grondwaterstand rond en onder de bebouwing als functie van plaats en tijd. Hierbij is gebruik gemaakt van een drie-dimensionaal elementenmodel, waarbij neerslag en verdamping afhankelijk van het percentage verhard oppervlak per element kunnen worden ingevoerd.

De variatie in de grondwaterstands daling in de nabijheid van een sloot is het grootst voor een klei-achtige ondergrond zoals volgt uit tabel 1 en figuur 5. Alleen voor dit geval is de invloed op de bebouwing onderzocht en wel voor homogene grond, zie paragraaf 6.3. Het rijtje van 6 woningen is hierbij haaks op een poldersloot gesitueerd met de kopgevel op een afstand van 4 m vanaf deze sloot. Het verloop van de grondwaterstands daling onder het rijtje woningen is weergegeven in fig. 11. Hetzelfde is gedaan voor het bedrijfsgedeelte van een boerderij waarbij de lange zijden van de muren zich evenwijdig aan een poldersloot bevinden op een afstand van 10 m en 20 m vanaf deze sloten. Ook de invloed van een hoogwatersloot is onderzocht. Enkele gegevens zijn vermeld in fig. 12.

Bij inhomogene grond is uitgegaan van een constante grondwaterstands daling van 0,20 m. De invloed hiervan op de bebouwing voor een klei-achtige ondergrond is behandeld in paragraaf 6.4. Voor zand en veen is dit gebeurd in hoofdstuk 9. In alle berekeningen is steeds uitgegaan van de gemiddelde laagste grondwaterstand, dat wil zeggen de grondwaterstand die ten minste gedurende 10 dagen per jaar wordt onderschreden. Deze 'gemiddelde laagste grondwaterstand' zal in het vervolg zonder meer als de grondwaterstand worden aangeduid.

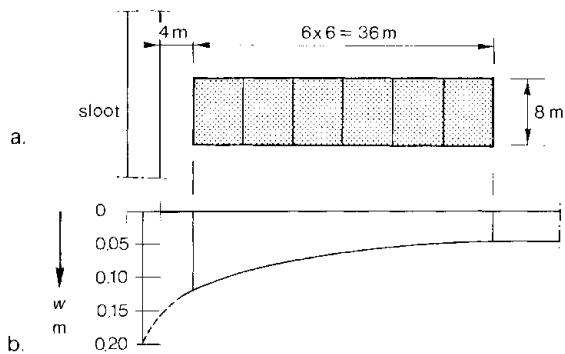


Fig. 11
Daling van de gemiddelde laagste grondwaterstand bij een rijtje van 6 woningen.
a. Plattegrond.
b. Verloop van de grondwaterstands daling onder de bebouwing op een klei-achtige ondergrond, bij een verlaging van het slootpeil met 0,20 m.

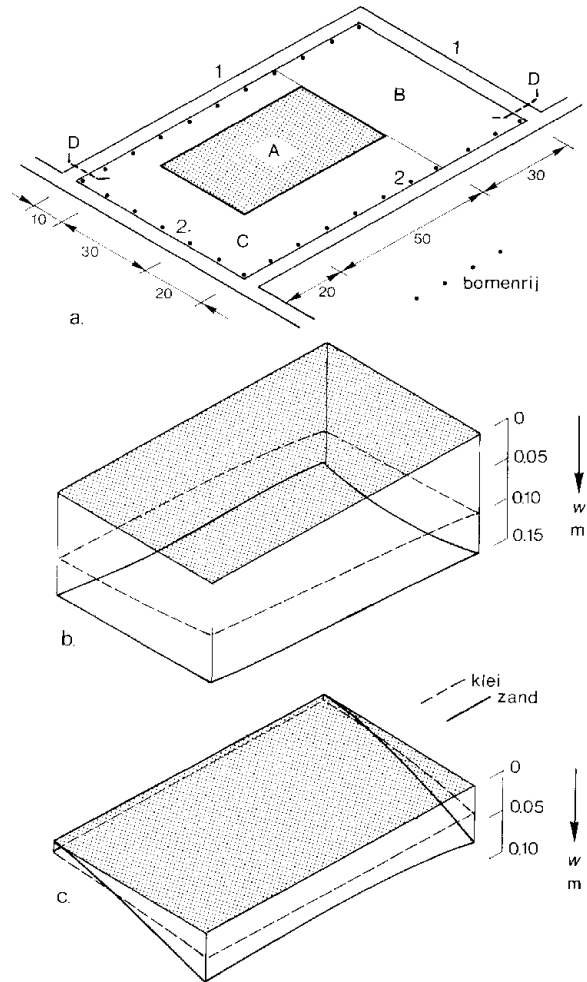


Fig. 12
Daling van de gemiddelde laagste grondwaterstand bij het bedrijfsgedeelte van een boerderij.
a. Situering van het bedrijfsgedeelte ten opzichte van de omringende sloten; A = bedrijfsgedeelte; B = open verharding, C = onverhard, D = stuw.
b, c Verloop van de grondwaterstands daling onder de muren van het bedrijfsgedeelte voor de grondsoorten klei en zand;
b. situatie zonder hoogwatersloten, 1 = 2 = sloot,
c. situatie met hoogwatersloten, 1 = hoogwatersloot, 2 = sloot.

4 Ondergrond

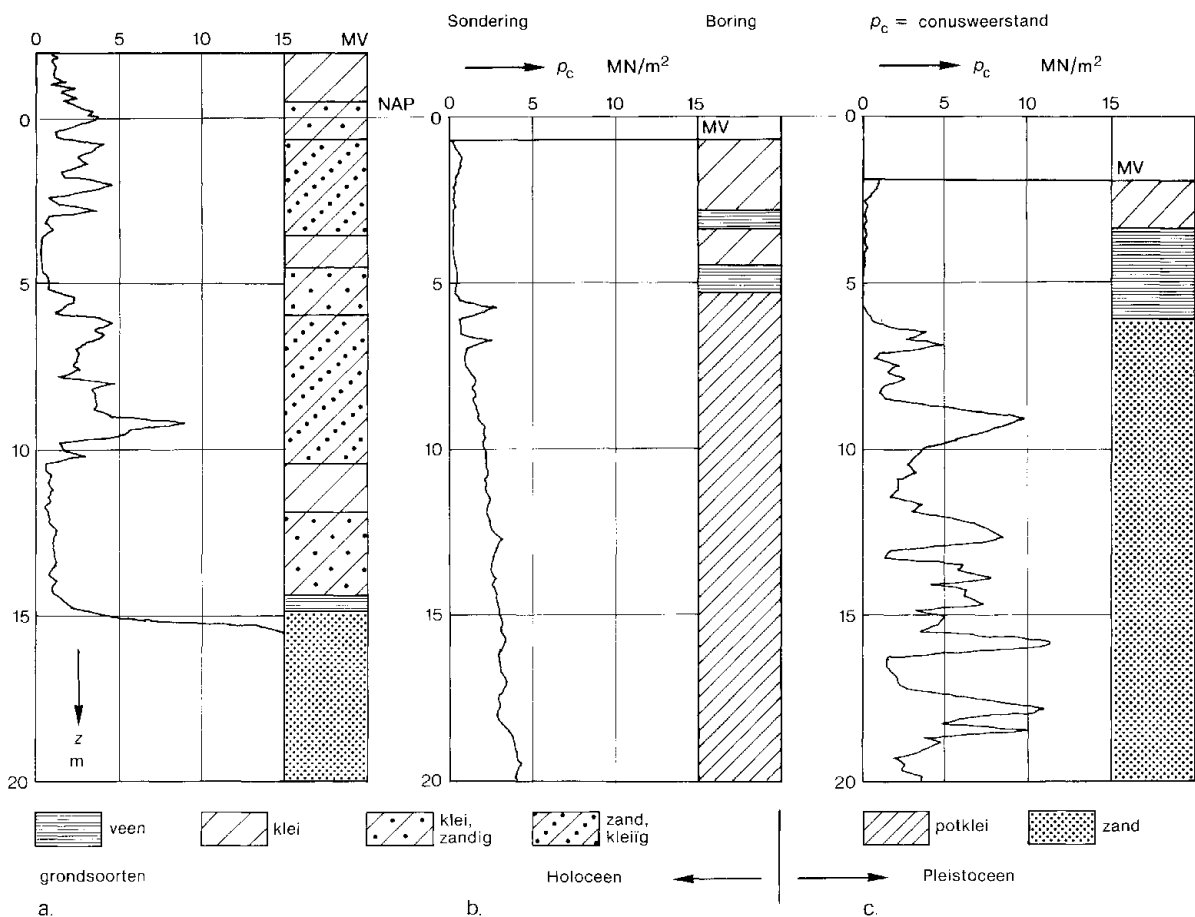
4.1 Samenstelling van de ondergrond

De ondiepe ondergrond is gevormd tijdens het Holoceen. De dikte van dit holocene lagenpakket neemt van zuid naar noord geleidelijk toe van minder dan 5 m tot 20 m en bestaat uit klei, veen, zand of een combinatie van deze grondsoorten.

Over het algemeen zijn het vrij slappe lagen, alleen het zand is stijver. De weerstand van de opeenvolgende lagen kan worden bepaald met behulp van een sondering. Hierbij wordt een kegelvormig lichaam, de conus, in de grond gedrukt en wordt op verschillende diepten de kracht gemeten die daarvoor nodig is. In fig. 13 zijn enkele sonderingen weergegeven die kenmerkend zijn voor het onderzoeksgebied. Bij de zandgronden uit het noorden liggen er redelijk draagkrachtige lagen vrijwel aan de oppervlakte, maar in het midden en zuiden bieden de bovenste 5 m van de grond nauwelijks enige weerstand. In dezelfde grafieken is ook de samenstelling van de grond weergegeven, zoals die uit boringen is vastgesteld.

Onder het holocene pakket bevindt zich het Pleistoceen, dat voornamelijk is gevormd in de verschillende ijstijden. Het Pleistoceen is weinig samendrukbaar, hetzij door de grote voorbelasting, hetzij door het afzettingsproces. Tijdens het Holoceen zijn inbraken van de zee opgetreden die de mondingen van de diverse rivieren hebben verbreed en verdiept en waarbij kreekssystemen zijn ontstaan, die zich in de pleistocene zandgrond hebben ingesneden. Deze kreekssystemen zijn naderhand vaak opgevuld met meer zandige zee-afzettingen. Dit is een van de belangrijkste oorzaken van de inhomogeniteiten van de holocene lagen, zie fig. 6a.

Fig. 13
Enkele voor het onderzoeksgebied kenmerkende sonderingen en boringen.
a. Het zandige gebied in het noorden.
b. Het kleigebied in het midden.
c. Het veengebied rondom het Eemskanaal.



De begrippen 'homogene' en 'inhomogene' grond kunnen nu ook beter worden verduidelijkt. Uit de boringen en sonderingen van fig. 13 blijkt dat in verticale richting altijd een variatie in grondsoort en grondeigenschappen optreedt. Als deze lagen echter overal even dik zijn, dan is in horizontale richting geen verandering te merken in de samendrukbaarheid van het totale lagenpakket. Men zal dan van een homogene grond spreken.

Indien er echter in horizontale richting veranderingen optreden in laagdikten en grondsoorten, zoals bijv. in fig. 6a is weergegeven, dan verandert de samendrukbaarheid van de grond wel degelijk in horizontale richting. Als deze veranderingen op betrekkelijk korte afstand optreden, vergeleken met de lengte van een gebouw, dan zal men spreken van een inhomogene grond.

4.2 Eigenschappen van grond

Voor de bepaling van de vervormingen van grond onder uitwendige invloeden is een aantal formules in gebruik die voor Nederlandse grond redelijk voldoen. Men dient zich echter te realiseren dat deze formules noodzakelijkerwijs op een zekere schematisering van de grond berusten en dat in werkelijkheid zowel hogere als lagere waarden kunnen optreden dan uit een berekening volgt.

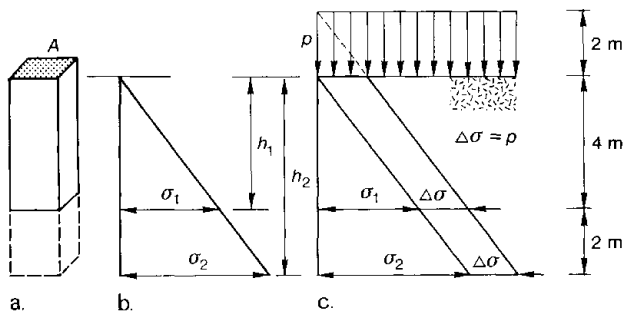


Fig. 14

Verticale spanningen bij homogene grond.

- Kolom grond met een oppervlak $A = 1 \text{ m}^2$.
- Verloop van de grondspanningen ten gevolge van het eigen gewicht van de grond.
- Spanningsverloop ten gevolge van het eigen gewicht plus een gelijkmatig verdeelde bovenbelasting.

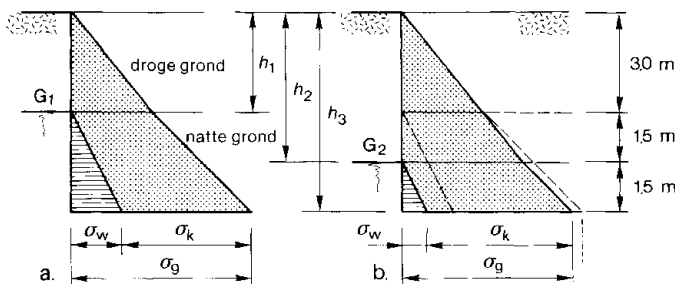


Fig. 15

Involed van het grondwater op het verloop van de verticale normaalspanningen in de grond.

- Splitting van de grondspanningen σ_g in waterspanningen σ_w en korrelspanningen σ_k : $\sigma_g = \sigma_w + \sigma_k$
- Bij een daling van de grondwaterstand nemen de korrelspanningen toe.

$G_1, G_2 =$ grondwaterstand voor en na peilverlaging

In de figuren 14, 15 en 16 zijn enkele resultaten weergegeven voor het ideale geval van een volkomen homogene grond van één en dezelfde samenstelling, die wordt belast door een gelijkmatig verdeelde belasting, bijv. een egale grondophoging. In fig. 14a is een kolom grond beschouwd waarbij de verticale spanningen ten gevolge van het eigen gewicht lineair met de diepte toenemen, zie fig. 14b. Ten gevolge van de gelijkmatig verdeelde bovenbelasting – die in fig. 14c is aangegeven als een overhoogte van dezelfde grond – treedt overal dezelfde spanningsverhoging $\Delta\sigma$ op.

In een groot deel van Nederland komt altijd grondwater voor op relatief geringe diepte. Door de opwaartse druk van het water wordt een deel van de belasting gedragen, men noemt dit de waterspanningen, zie fig. 15a. Het resterende deel van de belasting wordt door het korrelskelet van de grond opgenomen. De gemiddelde spanningen van het korrelskelet worden korrelspanningen genoemd. Alleen de vergroting van de korrelspanningen is verantwoordelijk voor de zettingen.

Bij een daling van de grondwaterstand nemen de korrelspanningen toe en zal ook de zetting van de grond toenemen, zie fig. 15b. Een daling van de grondwaterstand heeft hetzelfde effect als een extra gelijkmatig verdeelde belasting en de zettingen zijn vrijwel recht evenredig met de grootte van de daling van de grondwaterstand.

Ook al is de toename van de spanningen in de ondergrond gelijk, zoals in fig. 14c over de volle hoogte en in fig. 15b beneden de hoogte h_2 , dan nog neemt het aandeel van de diepere lagen in de totale zetting af. Dit komt omdat vooral de relatieve toename van de spanningsverhogingen voor de zettingen van belang is, zie rekenvoorbeeld bij fig. 14c.

Rekenvoorbeeld bij fig. 14 (a,b).

1 m^3 grond heeft een gewicht (in feite een massa) van 1600 kg , dit veroorzaakt een kracht $F = 1600 \cdot 10 = 16\,000 \text{ Newton (N)}$, of $16 \text{ kiloNewton (kN)}$.

Het gewicht van de kolom grond veroorzaakt een gelijkmatige tegendruk op de daaronder liggende grond: de grondspanning σ_g . De grondspanning op een diepte $h_1 = 4 \text{ m}$ bedraagt:
 $\sigma_g = F/A = (4 \cdot 16 \text{ kN}) / 1 \text{ m}^2 = 64 \text{ kN/m}^2 = 0,064 \text{ N/mm}^2$.

Relatieve spanningsverhoging (c).

De relatieve spanningsverhoging neemt af bij toenemende diepte:

$$(\sigma_2 + \Delta\sigma) / \sigma_2 < (\sigma_1 + \Delta\sigma) / \sigma_1$$

$$(\sigma_1 = 64 ; \sigma_2 = 96 ; \Delta\sigma = 32 \text{ kN/m}^2)$$

Rekenvoorbeeld bij fig. 15.

droge grond (zand)

massa 1600 kg/m^3

natte grond

massa 2000 kg/m^3

water

massa 1000 kg/m^3

Op een diepte $h_1 = 3 \text{ m}$ geldt zowel voor geval a. als b:

$$\sigma_g = 3 \cdot 16 \text{ kN} / 1 \text{ m}^2 = 48 \text{ kN/m}^2$$

$$\sigma_w = 0 ; \sigma_k = 48 \text{ kN/m}^2$$

Vervolgens daalt de grondwaterstand van een hoogte $h_1 = 3 \text{ m}$ tot een hoogte $h_2 = 4,5 \text{ m}$ beneden maaiveld.

Op een diepte $h_3 = 6 \text{ m}$ geldt voor geval a:

$$\sigma_g = 3 \cdot 16 + 3 \cdot 20 = 108 \text{ kN/m}^2$$

$$\sigma_w = 3 \cdot 10 = 30 \text{ kN/m}^2$$

$$\sigma_k = 108 - 30 = 78 \text{ kN/m}^2$$

Voor geval b. geldt op 6 m diepte:

$$\sigma_g = 4,5 \cdot 16 + 1,5 \cdot 20 = 102 \text{ kN/m}^2$$

$$\sigma_w = 1,5 \cdot 10 = 15 \text{ kN/m}^2$$

$$\sigma_k = 102 - 15 = 87 \text{ kN/m}^2$$

De toename van de korrelspanning op 6 m diepte door een daling van de grondwaterstand met $1,5 \text{ m}$ bedraagt dus:

$$\Delta\sigma_k = 87 - 78 = 9 \text{ kN/m}^2$$

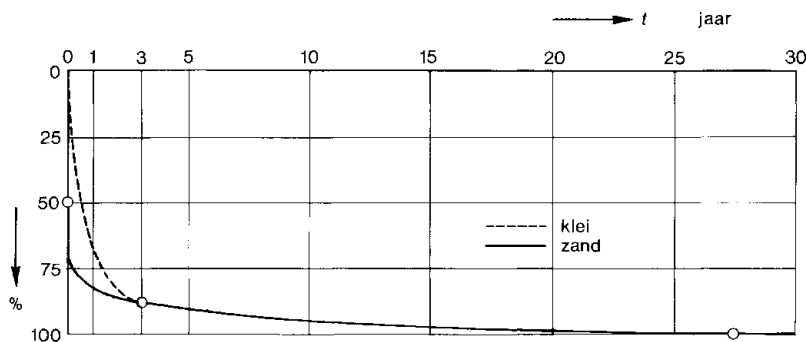
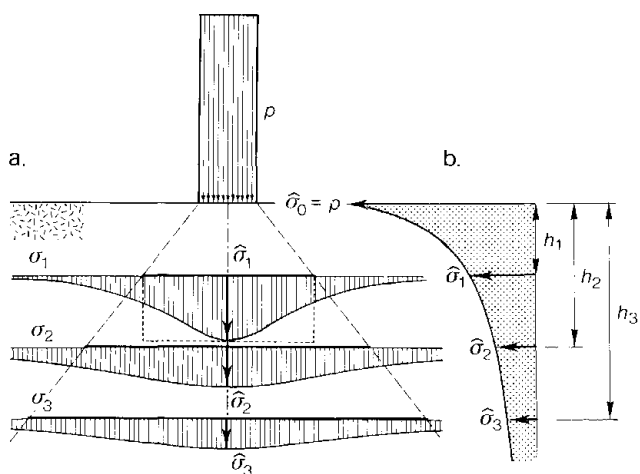


Fig. 16
Zettingsverloop ten gevolge van een (snel aangebrachte) gelijkmatig verdeelde bovenbelasting als functie van de tijd. De zettingen zijn aangegeven als een percentage van de zettingen na 30 jaar.
— zonder invloed van grondwater
- - - onder invloed van het grondwater bij minder goed doorlatende grond

Voorts blijken de zettingen afhankelijk te zijn van de tijd en min of meer tot een limietwaarde te naderen, zie fig. 16. De getrokken lijn geeft het theoretische zettingsverloop weer bij afwezigheid van grondwater. Gewoonlijk is er wel grondwater aanwezig en wordt bij een plotselinge belastingverhoging de toename van de grondspanningen aanvankelijk geheel door de waterspanningen opgenomen. Samendrukking van de grond kan pas optreden zodra het water dat zich in de grond bevindt tussen de korrels wordt uitgerst. Bij klei en veen neemt dit proces geruime tijd in beslag. Het zettingsverloop in de tijd kan hierdoor in de beginfase sterk worden beïnvloed; de eindzettingen blijven echter onveranderd, zie de stippellijn in fig. 16.

Indien de belasting echter slechts plaatselijk toeneemt, zoals bij de bouw van een woning, dan spreidt deze belasting zich over de ondergrond, zodat de extra spanningen bij toenemende diepte steeds geringer worden, zie fig. 17. Het zal duidelijk zijn dat vooral de bovenste paar meter van de grond van belang is voor het zakkingsgedrag van een gebouw dat gefundeerd is op staal. In dit soort berekeningen wordt meestal net gedaan alsof de op de ondergrond uitgeoefende belastingen, de vervormingen van de ondergrond zonder meer kunnen volgen, zoals dat bij een plaatselijke grondophoging het geval zal zijn.

In deze publikatie wordt afwisselend van zettingen en zakkingen gesproken. In het algemeen wordt bij samendrukking van de grond door daling van de grondwaterstand van zettingen gesproken. De daaruit voortvloeiende verticale verplaatsingen van een gebouw worden echter als zakkingen aangeduid.



4.3 Invloed van voorbelastingen

In alle voorgaande beschouwingen is stilzwijgend aangenomen dat de huidige spanningen in de grond in vroeger tijden nooit zijn overschreden. Want alleen dan veroorzaken de extra spanningen ook de berekende zettingen. Zoals reeds eerder werd vermeld, kan men bij de betrekkelijk geringe spanningsverhogingen zoals die optreden bij de bouw van woningen, gefundeerd op staal, of bij geringe dalingen van de grondwaterstand, wel aannemen dat de zettingen recht evenredig zijn met de grootte van de aangebrachte spanningsverhogingen, zie fig. 18a, b.

Bij een elastisch materiaal, zoals rubber, verdwijnen de zettingen weer als de belasting wordt weggenomen, het materiaal 'veert als het ware terug'. Bij grond treedt deze terugvering echter nauwelijks op, hoogstens voor zo'n 10 à 20%, zie fig. 18c. Als de grond weer opnieuw dezelfde belasting moet dragen, treedt de oorspronkelijke zetting weer op. De grond gedraagt zich opeens als een veel stijver medium, zie fig. 18d.

In fig. 19 zijn de last-vervormingsdiagrammen weergegeven die volgen uit het vervormingsgedrag van fig. 18. Grond die vroeger veel zwaarder belast is geweest, noemt men overgeconsolideerde grond, ze gedraagt zich zeer stijf. Alleen als de belasting nog hoger wordt dan voorheen is opgetreden, kan de grond zich weer als een veel slapper medium gaan gedragen, zie fig. 19b.

In vroeger jaren kunnen allerlei peilveranderingen zijn aangebracht die thans nog maar moeilijk zijn te achterhalen. Alle dalingen van de grondwaterstand die minder zijn dan vroeger ooit eens zijn opgetreden, geven aanleiding tot een gedrag van de grond dat als 'stijf' moet worden gekenmerkt. En hoe stijver de grond is, hoe minder de kans op schade. Bij een zeer droge zomer kan het grondwater echter een lager peil bereiken dan ooit voorheen is voorgekomen. De grond gedraagt zich dan als een 'slap' medium en meer dan eens kan dit aanleiding geven tot scheurvorming. Hier ligt dan ook de oorzaak van de schademeldingen na zeer droge zomers.

Fig. 17
Vergroting van de verticale normaalspanningen in de grond ten gevolge van een geconcentreerde belasting.
a. Verloop van de spanningen in enkele horizontale doorsneden.
b. Verloop van de maximale spanningen in een verticale doorsnede onder het centrum van de geconcentreerde belasting.

De streeplijnen geven de spanningsverspreiding weer zoals die in de figuren 20a en 21a is aangehouden en de stippellijn het daarbij behorende constante spanningsverloop op een diepte h_1 .

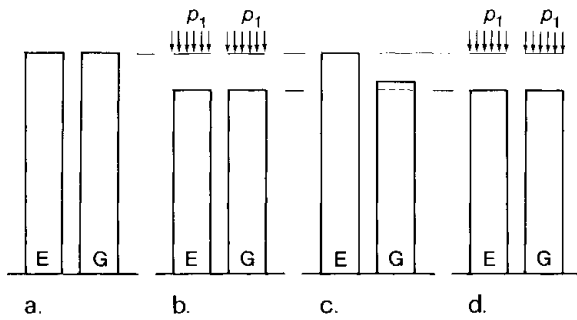


Fig. 18
Verband tussen belasting en vervorming bij een kolom van een elastisch materiaal (E) en een kolom grond (G).
a. Onbelaste toestand.
b. Toestand na de eerste belasting p_1 .
c. Toestand na ontlasten.
d. Toestand na een herhaalde belasting eveneens tot p_1 .

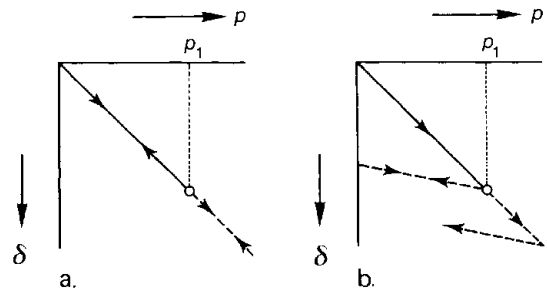


Fig. 19
Last-vervormingsdiagrammen behorende bij fig. 18, bij verwaarlozing van de tijdseffecten.
a. Lineair elastisch materiaal.
b. Grond (geschematiseerd).

In fig. 19b geldt de steile tak alleen voor toenemende belastingen die voorheen nog niet zijn opgetreden. Voor alle andere belastingvariaties gelden flauw hellende takken waarvan er in de figuur twee zijn weergegeven.

4.4 Schematisering van de grond

Om de invloeden die de ondergrond en het gebouw op elkaar uitoefenen in een rekenprocedure te kunnen opnemen, moet het verband tussen de opgenomen kracht van een moot grond en zijn verticale verplaatsing bekend zijn. Als uitgangspunt heeft de spanningsspreiding in de grond volgens fig. 17 gediend. Deze belastingafdracht is geschematiseerd tot een gelijkmatige belastingspreiding in een pyramidevormig lichaam volgens fig. 21a waarbij de gemiddelde spanning op elke hoogte gelijk is aan die van fig. 17b. Alle vervormingen worden in deze pyramide geconcentreerd gedacht en het spannings- en zakkingsverloop is op elke hoogte eenvoudig te bepalen zie fig. 20a.

Vervolgens is de grond verdeeld in een aantal kolomvormige moten volgens fig. 21c. Deze worden beschouwd als een stelsel veren die onderling zijn gekoppeld. Elke 'veer' is dan een grondmoot van bijv. 1 vierkante meter oppervlak en een hoogte van 5 of 6 meter. Als één grondveer wordt belast dan worden de nabijliggende grondveren mee omlaag getrokken en nemen zo een deel van de belasting over, zie fig. 21d. De stijfheden van de koppelbalken worden zodanig gekozen dat een overeenkomstige belastingspreiding optreedt als in het pyramidevormige lichaam van fig. 21a.

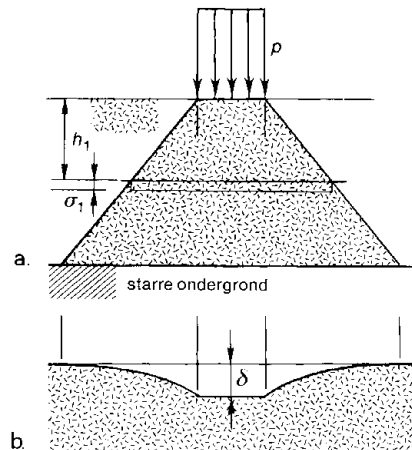


Fig. 20
Geschematiseerde spreiding van een geconcentreerde belasting.
a. Meewerkend grondlichaam met een gelijkmatig aangekomen spanningsverdeling.
b. Zakkingsverloop van het maaiveld.

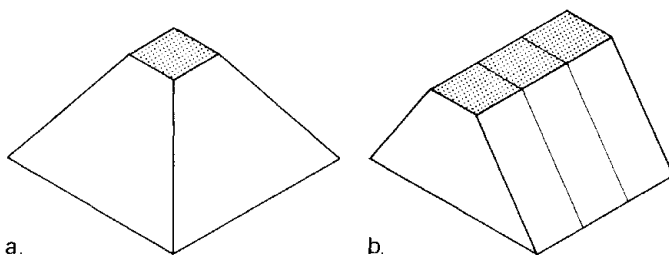
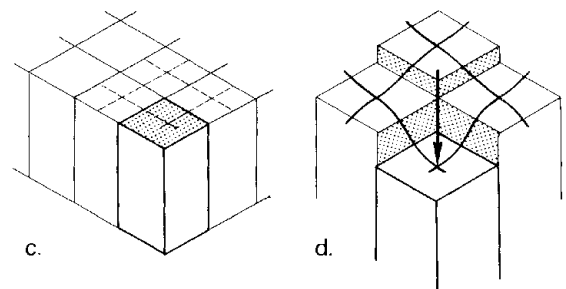


Fig. 21
Schematisering van de grond tot een stelsel gekoppelde veren.
a. Ruimtelijk beeld van de belastingspreiding volgens een afgeknotte pyramide.
b. Belastingspreiding bij een strokenbelasting.



c. Verdeling van de grond in moten.
d. Verbinding van de grondmots in x- en y-richting door koppelbalkjes. Bij belasting van één grondmoot worden de aanliggende grondmots gedeeltelijk mee omlaag getrokken.

Het is mogelijk gebleken om deze schematisering zodanig uit te voeren dat een goede overeenstemming optreedt met de uitkomsten van berekeningen volgens de klassieke zettingstheorie, zoals genoemd in paragraaf 4.2, waarbij de belastingen de vervormingen van de ondergrond zonder meer kunnen volgen. Laatstgenoemde berekeningswijze biedt echter geen mogelijkheden om de wisselwerking tussen gebouw en ondergrond in rekening te brengen.

4.5 Te verwachten zettingen en zakkings

De samendrukbaarheid van de grond is bepaald aan de hand van de resultaten van een groot aantal samendrukingsproeven op grondmonsters afkomstig uit het onderzoeksgebied. Voor het uitvoeren van berekeningen is het onderzoeksgebied verdeeld in subgebieden met een oppervlak van 4 x 4 km². In elk subgebied zijn één of meer grondprofielen gekozen die representatief worden geacht voor het holocene pakket in dat subgebied.

Voor alle gekozen grondprofielen zijn de zettingen bepaald zoals die in een periode van 30 jaar (en in het midden van een kavel) zullen optreden. Voor een korter tijdbestek treedt een bepaald percentage van deze zetting op, zie fig. 16. Bij deze zettingsberekeningen spelen dezelfde factoren een rol die in de voorafgaande paragrafen zijn beschreven. Door de laagsgewijze opbouw van de grond, zoals weergegeven in de boringen van fig. 13, dienen de samendrukkingen van de verschillende lagen apart te worden bepaald en vervolgens gesommeerd.

Bij een slootpeilverlaging van 0,20 m blijkt de daling van de gemiddelde laagste grondwaterstand te variëren tussen minder dan 0,05 m en maximaal 0,15 m. In het grootste deel van het onderzoeksgebied blijken de daaruit volgende zettingen minder te bedragen dan 5 mm. In een aantal subgebieden in het noordelijk deel van het onderzoeksgebied, waar het holocene pakket relatief dik is, worden zettingen verwacht die liggen tussen 5 en 10 mm. Voor een aantal subgebieden, met name de veengebieden zuidelijk van het Eemskanaal, zijn geen representatieve grondprofielen beschikbaar.

Voor drie grondprofielen zijn gedetailleerder berekeningen gemaakt waarbij de zakking van het rijtje van 6 woningen is bepaald. Hiertoe is eerst nagegaan hoe groot de drukken onder de funderingsstroken worden als de ondergrond wordt geschematiseerd tot een stelsel gekoppelde veren. Met deze strookbelastingen als uitgangspunt is vervolgens de zakking van het gehele rijtje van 6 woningen berekend.

Bij deze berekeningen is niet langer uitgegaan van de daling van de gemiddelde laagste grondwaterstand in het midden van de kavel, die kan variëren tussen 0,05 en 0,15 m, maar van een gelijkmatige daling van de grondwaterstand van 0,20 m over de gehele oppervlakte van de kavel.

Uit fig. 5 blijkt dat een gelijkmatige grondwaterstands daling in feite een fictief geval is. Voor de praktijk betekent het echter dat op enige afstand van de sloot de daling van de gemiddelde laagste grondwaterstand vrijwel constant is. Uit de berekeningen volgt dat de zakking van het rijtje woningen als een percentage van de grootte van de grondwaterstands daling kan worden uitgedrukt:

zand:	zakking	5% van de grondwaterstands daling
klei:	zakking	10% van de grondwaterstands daling
veen:	zakking	15% van de grondwaterstands daling

Uiteraard geven bovenstaande getallen slechts een globale indicatie en houdt de naam van de grondsoort slechts in dat deze hoofdzakelijk bestaat uit zand, klei resp. veen. Indien over 'veen' wordt gesproken, wordt steeds bedoeld 'veen met kleidek'.