
Berging in kleischeuren in de Flevopolders

Jan van den Akker¹, Tom Hoogland¹,
Hans Hakvoort² en Frederik Stoppelenburg³

Inleiding

Na de drooglegging van Zuidelijk en Oostelijk Flevoland is door bodemrijping onomkeerbare scheurvorming ontstaan, verder in dit artikel aangeduid als kleischeuren. De ruimtelijke spreiding van de gescheurde kleilaag en de dikte van de laag zijn onvoldoende bekend. In welke mate scheurvorming in de Noordoostpolder - waar de bodem over het algemeen lichter van textuur is - voorkomt is niet goed bekend. In hydrologisch opzicht hebben de scheuren naar verwachting een significant effect. Ze resulteren in extra bergingscapaciteit, maar kunnen ook als preferente stroombanen fungeren, waardoor het neerslagoverschot sneller tot afvoer komt.

Eind 2010 hebben Alterra en HKV^{lijn.in.water} in opdracht van Waterschap Zuiderzeeland een methode ontwikkeld om de berging in permanente kleischeuren te berekenen en ruimtelijk in kaart te brengen, om het vervolgens te implementeren in de SOBEK-modellen van het waterschap. In dit artikel zijn de belangrijkste resultaten van het bodemkundige deel van het onderzoek samengevat.

Achtergrond

Doordat de bodemopbouw van de IJsselmeerpolders onder water via sedimentatie plaatsvond, had, na het droogvallen van de IJsselmeerpolders, de slibbodem een zeer lage dichtheid. In eerste instantie consolideerde deze bodem door ontwatering en kreeg een wat dichtere pakking. In de volgende fase begon, naast consolidatie, rijping door uitdroging een grote rol te spelen in het verdichten van de grond, waardoor grote bodemdaling optrad.

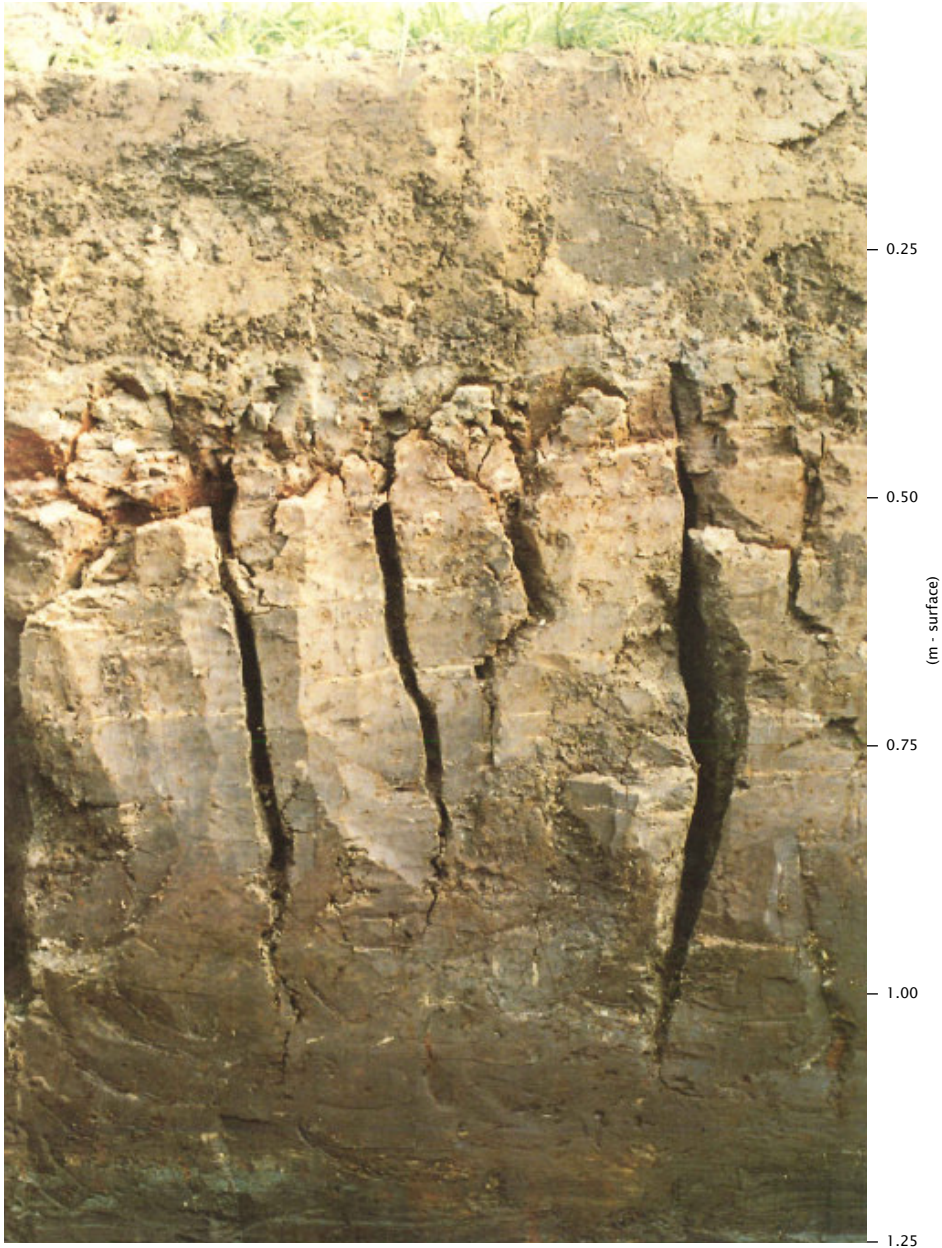
Bij rijping wordt in eerste instantie het verlies aan volume (water) volledig omgezet in daling van het maaiveld. Op een bepaald moment wordt de grond steviger en treedt scheurvorming op. Uiteindelijk wordt de verdere volumevermindering voor ongeveer 1/3 deel omgezet in maaiveld daling en voor 2/3 deel in scheuren.

¹ Alterra, Postbus 47, 6700 AA Wageningen

² HKV^{lijn.in.water}, Postbus 2120, 8203 AC Lelystad

³ Waterschap Zuiderzeeland, Postbus 229, 8200 AE Lelystad

Door het eigen gewicht van de grond worden op enige diepte de scheuren deels dichtgedrukt (Rijniersce, 1983) en wordt de maaiveldddaling wat groter en het aandeel in het volume scheuren iets kleiner. De rijpingscheuren blijken vrij stabiel en zijn in de Flevopolders nog steeds te vinden (zie Afbeelding 1).



Afbeelding 1: Rijpingscheuren in een kleigrond (31% lutum, 4% organischestof) in Oostelijk Flevoland. De verstoorde bovenlaag heeft een dikte van ca 40 cm. De diepste scheuren reiken tot ca. 110 cm diepte. De drainagediepte is 100 cm. De scheurbreedtes bedragen 2,5 tot 4,5 cm. De pedons (kleikolommen) hebben een diameter van 20 - 30 cm (Groen, 1997).

In een onderzoek in 2010 (Projectbureau Oostvaarderswold, 2010) zijn profielkuilen gegraven en blijken de scheuren nog steeds aanwezig te zijn.

Het volume aan berging in deze permanente scheuren kan zeer groot zijn. Een bui van 50 mm zou volledig in de scheuren van de kleigrond in Afbeelding 1 kunnen worden geborgen (Groen, 1997). Volgens verschillende auteurs (Groen, 1997, Rijniersce, 1983 en Wolters, 1996) gaat de rijping en de scheurvorming door tot ca 10 cm onder de drainagebuizen. De scheuren vormen een driedimensionaal netwerk en de horizontale doorlatendheid is daardoor zeer groot. Voor de bovenlaag van 40 cm vormt het netwerk aan scheuren in de ondergrond als het ware een drain op 40 cm diepte (Groen, 1997). De 'drainafstanden' kunnen daardoor tot orde 48 meter zijn. Ter vergelijking: door Vos (2005) worden voor zeeklei in Friesland drainafstanden van 8 - 18 meter genoemd.

Door Zuur (1958) is uit empirisch onderzoek als maat voor de rijping de waterfactor N geïntroduceerd:

$$N = (A - 20) / (L + 3H) \quad (1)$$

Waarin:

- A = watergetal = totaal-watergehalte [g per 100 g droge grond]
- L = lutumgehalte [g per 100 g droge grond]
- H = organische-stofgehalte [g per 100 g droge grond].

Hierbij wordt het watergehalte A bepaald aan verzadigde grond (vochtspanning = 0).

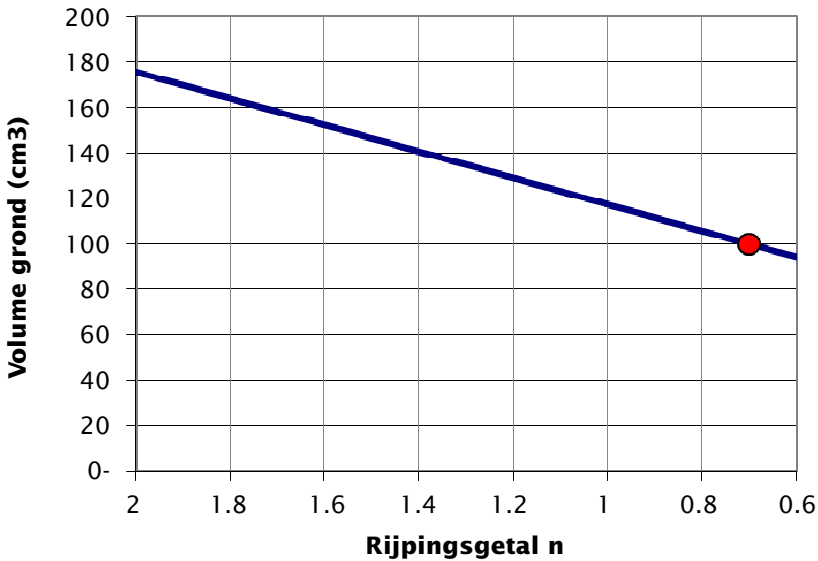
Door Pons en Zonneveld (1965) is deze factor verder verfijnd tot de rijpingsfactor n:

$$n = (A - 0,2 R) / (L + bH) \quad (2)$$

Waarin:

- R = niet-colloïdale minerale delen [g per 100 g droge grond]; $R = 100 - H - L$.
- b = verhouding van het waterabsorberend vermogen van de organische stof ten opzichte van lutum. $b=3$ bij humus en veraard veen; $b=6$ bij weinig verweerd veen.

Afbeelding 2 laat zien dat bij rijping de volumeafname zeer groot is, wat zich uit in grote maaiveld dalingen en scheuren. Bij volledig ongerijpte grond ($n = 2$) is het volume 176 cm³. Na volledige rijping ($n = 0,7$) is het volume teruggebracht tot 100 cm³. NB. in de bouwvoor kan nog sterkere rijping optreden.



Afbeelding 2: Afname volume grond door rijping bij een kleigrond met 35% lutum en 5% organische stof. De rode stip geeft volledige rijping aan, waarbij het volume grond 100 cm³ is.

Bepalen berging in scheuren

Gepresenteerd worden twee methoden om de berging in de scheuren te bepalen. De eerste methode is gebaseerd op visuele waarneming en opmeting van scheurbreedte en scheurdiepte. Deze op zichzelf arbeidsintensieve methode vormt vanwege de geringe beschikbaarheid van waarnemingen geen goede basis voor het ruimtelijk in beeld brengen van de mogelijke waterberging in permanente kleischeuren. De tweede methode is gebaseerd op het berekenen van de scheurvorming op basis van de mate van rijping van een bodemprofiel die wordt bepaald uit het lutum gehalte en organische stof gehalte. In de literatuur en het Bodem Informatie Systeem (Alterra) is een groot aantal profielen beschikbaar. We hebben beide methoden toegepast, waarbij we de eerste methode gebruikt hebben om te toetsen of de tweede methode voldoende nauwkeurige resultaten oplevert.

Methode 1

De eerste methode om de berging van de scheuren te berekenen is gebaseerd op visuele waarnemingen van de scheuren en scheurafstanden in een profielkuil (zie Afbeelding 1). Door het opmeten van scheurbreedten, de breedte van de grondkolommen (pedons) en de scheurafstand kan een inschatting worden gemaakt van het oppervlak aan scheuren in een horizontaal vlak door het scheurpatroon te stileren tot zeshoekig raster (Bronswijk, 1991). Dit is aangegeven in Afbeelding 3.

Het oppervlak A_0 van een regelmatige zeshoek vóór het ontstaan van krimpscheuren is:

$$A_0 = d^2 / 4\sqrt{3} \quad (3)$$

Na het ontstaan van de krimp scheuren met een scheurbreedte s is het oppervlak A_1 :

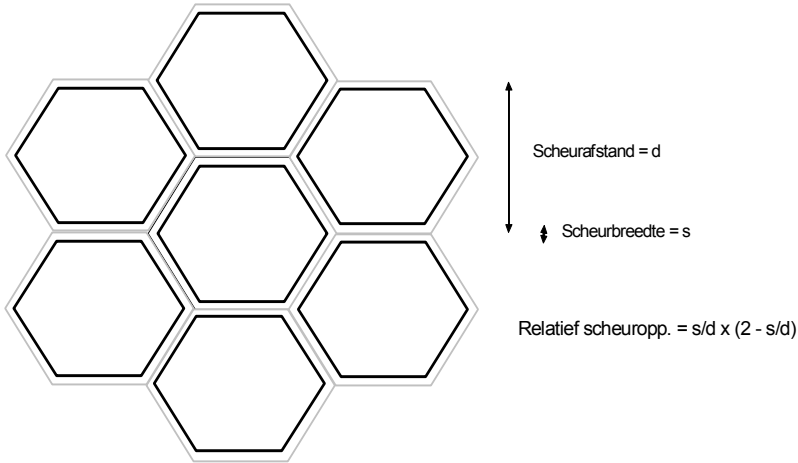
$$A_o = (d - s)^2 / 4\sqrt{3} \quad (4)$$

Het scheuoppervlak S_{opp} is dan:

$$S_{opp} = A_o - A_1 = (2ds - s^2) / 4\sqrt{3} \quad (5)$$

De scheurfractie SF ten opzichte van de ongescheurde grond is dan:

$$SF = S_{opp} / A_o = s/d (2 - s/d) \quad (6)$$



Afbeelding 3: Berekening van het relatief scheuoppervlak (scheurfractie) uit de scheurbreedte en scheurafstand. In dit bovenaanzicht worden de pedons gestileerd als regelmatige zeshoeken weergegeven.

In Tabel 1 is als voorbeeld de berging berekend op basis van scheurbreedten en pedondiameter (waaruit de scheurafstand kan worden berekend) voor een profiel beschreven door Wolters (1996). In dit profiel blijkt volgens de berekening in totaal 105 tot 292 mm water te kunnen worden geborgen.

Scheurdiepte (m)		Scheurbreedte (cm)		Pedondiameter (cm)		Scheurfractie		Berging (mm)	
Van	Tot	Van	Tot	Van	Tot	Van	Tot	Van	Tot
0.44	0.75	0.5	3	5	10	0.190	0.515	58.9	159.6
0.75	0.90	2	5	30	30	0.129	0.306	19.3	45.9
0.75 ⁽¹⁾	0.90 ⁽¹⁾	0.2	1	10	15	0.040	0.129	5.9	19.3
0.90	1.10	1.5	4	30	30	0.098	0.249	19.5	49.8
1.10	1.40	0.2	2	70	70	0.006	0.056	1.7	16.9
								105.4	291.6

⁽¹⁾ De laag 0.75 - 0.90 m heeft pedons met een diameter van 30 cm die weer zijn onderverdeeld in pedons met een diameter van 10 - 15 cm en wordt daarom twee maal beschouwd.

Tabel 1: Berging berekend uit de visuele waarnemingen van scheurbreedten en scheurafstand (te berekenen uit de pedondiameter) van een profiel uit een bosperceel (uit Wolters, 1996, Bijlagen 2.4 (structuuropname 18 september 1979) en 2.8-2 (bemonstering 11 september 1979)).

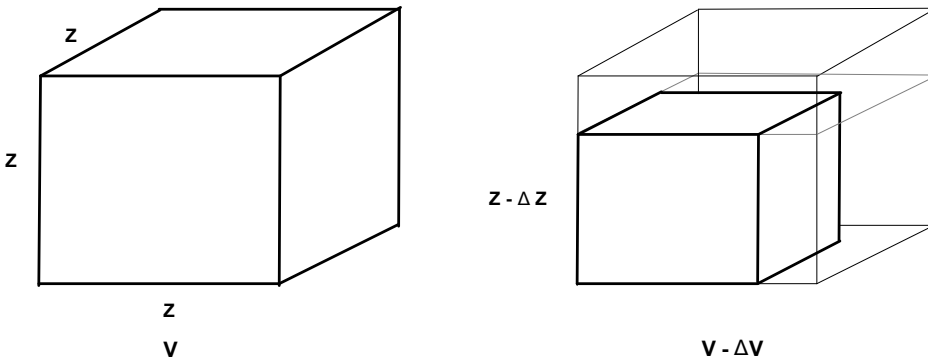
Methode 2

Een tweede methode om de berging te berekenen maakt gebruik van de mate van rijping van de grond. Hoe verder de grond is gerijpt des te groter de scheuren en het aandeel van de scheuren in het volume grond, de scheurfractie.

Voor de berekening van de scheurfractie zijn de factoren nodig die ook in de berekening van de waterfactor N volgens Zuur (1958) gebruikt worden: het lutumgehalte L , het humusgehalte H en het watergetal A . Indien het watergetal A niet bekend is, maar de droge volumedichtheid wel, dan kan uit de droge volumedichtheid het poriënvolume worden berekend en gelijk gesteld worden aan het watergetal A . De gedachte daarbij is dat bij verzadiging alle poriën zijn gevuld.

Bij deze methode wordt er rekening mee gehouden dat in de initiële fase het volumeverlies van de grond volledig wordt omgezet in maaiveldsdaling. Na enige consolidatie van de grond treedt in de vervolfase scheurvorming op in de vorm van isotrope krimp. Isotrope krimp wil zeggen dat de krimp in alle richtingen gelijk is.

In Afbeelding 4 is isotrope krimp uitgebeeld (Bronswijk, 1991).



Afbeelding 4: Een kubus grond met een initiële laagdikte z (m) en volume V (m^3) krimpt isotroop naar een kubus met volume $V - \Delta V$ (m^3) en zijden $z - \Delta z$ (m).

Op basis van Bronswijk (1991) heeft Rijniersce (1983) de volume afname in de verschillende fasen van rijping met de volgende algemene geldende vergelijking beschreven:

$$1 - \Delta V / V = (1 - \Delta z / z)^{r_s} \quad (7)$$

Met r_s als dimensieloze geometriefactor, waarbij voor $r_s = 1$ aangeeft dat er alleen bodemdaling optreedt en geen scheurvorming; $1 < r_s < 3$: overheersend bodemdaling maar ook scheurvorming en $r_s = 3$: isotrope krimp, evenveel krimp in alle richtingen.

Door Rijniersce (1983) zijn metingen aan de rijpingsvelden in Zuidelijk Flevoland gebruikt om een relatie te leggen tussen de druk uitgeoefend door de bovenliggende grond en de waterfactor N (Zuur, 1958). Deze relaties voor de grens waarbij onder bepaalde gronddruk scheurvorming gaat optreden zijn gegeven in Afbeelding 5.

In Afbeelding 5 wordt de grens vanaf waar isotrope krimp optreedt aangegeven met de blauwe lijn met de vergelijking:

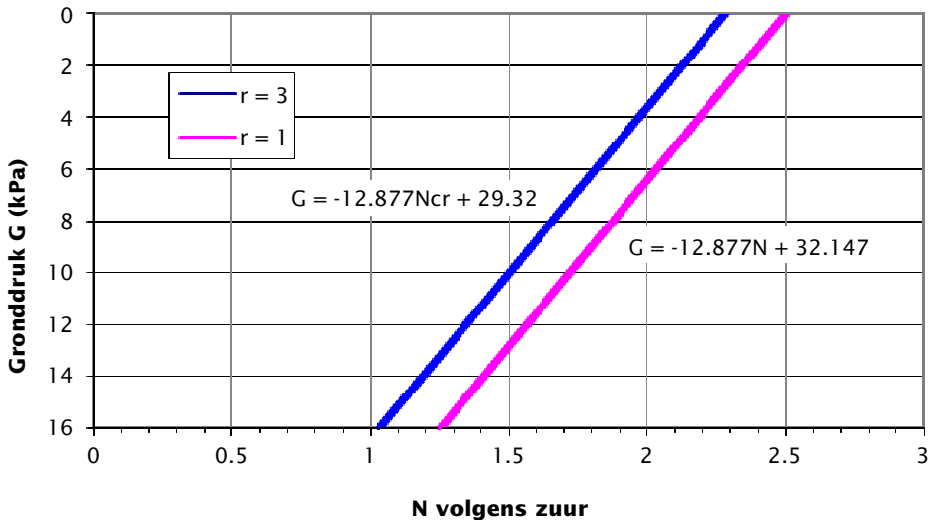
$$G = -12,877 N_{cr} + 29,32 \text{ of } N_{cr} = 0,07766 G + 2,277 \quad (8)$$

Waarin:

G = de gronddruk [kPa]

N_{cr} = de waterfactor N (Zuur, 1958) waarbij de scheurvorming isotroop is.

Links van de blauwe lijn krimpt de kleigrond door rijping alzijdig ($r_s = 3$) en wordt het volume aan rijpingskrimpt verdeeld over de maaivelddaling (1/3 deel) en toename van het volume aan rijpingscheuren (2/3 deel). Rechts van de roze lijn wordt alle rijpingskrimpt nog omgezet in maaivelddaling ($r_s = 1$). Tussen de lijnen ligt een overgangsgedebied. In deze methode gaan we voor de berekening van de scheurfractie uit van de grens waarbij de rijpingskrimpt isotroop is.



Afbeelding 5: Relaties voor de grens waar bij een bepaalde druk scheurvorming gaat optreden.

Met behulp van N_{cr} kan vervolgens het volume V_{cr} (cm^3) van 100 gram grond worden berekend op het moment van scheuren:

$$V_{cr} = N_{cr} (L + 3H) + 20 + 100 / \rho_s \quad (9)$$

Waarin:

ρ_s = het specifiek volumegewicht [g/cm^3] berekend uit de percentages lutum L , humus H en resterende minerale delen R (zand en silt, $R = 100 - L - H$) met specifieke volumegewichten van respectievelijk 2,7; 1,47 en 2,65 g/cm^3 .

$$\rho_s = 100 / (L/2,7 + H/1,47 + R/2,65) \quad (10)$$

Op dezelfde manier als in vergelijking 9 wordt voor de actuele waterfactor N_{nu} het volume V_{nu} [cm³] van 100 gram grond berekend:

$$V_{nu} = N_{nu} (L + 3H) + 20 + 100 / \rho_s \quad (11)$$

Uit het volume van de grond op het moment van scheuren V_{cr} en het huidige volume V_{nu} kan het actuele relatieve oppervlak van de grond (pedon) en de scheuren worden berekend:

$$RO_{nu} = (V_{nu} / V_{cr})^{2/3} \quad (12)$$

$$SF_{nu} = 1 - RO_{nu} \quad (13)$$

Waarin RO_{nu} het relatief oppervlak op dit moment en SF_{nu} de scheurfractie.

In Tabel 2 zijn voor hetzelfde profiel als in methode 1 het lutumgehalte L, het organisch stofgehalte H, de droge dichtheid voor een aantal diepten gegeven (Wolters, 1996). Daaruit zijn vervolgens het specifiek volumegewicht, het watergetal A, de waterfactor N berekend. Vervolgens is in de kolommen 12 t/m 17 met behulp van de vergelijkingen 8 t/m 13 de scheurfractie berekend met een geometriefactor $rs = 3$ (isotrope krimp). Tot slot is in de kolommen 18 t/m 20 de berging berekend voor aansluitende diepten van het voorbeeldprofiel uit Tabel 2.

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)	(16)	(17)	(18)	(19)	(20)	
Diepte begin	Diepte eind	Lulum L	Org. stof H	CaCO ₃	Droge dicht- heid Y _d	Specifiek volume- gewicht ρ _s	Porriën volume	A (uit porriën- volume)	Water- factor volgens Zuur N	Rijpings- getal volgens Pons en Zonne- veld n	N _{cr}	Volume V _{cr}	Volume V _{nu}	Relatieve dikte n _u	Relatieve opper- vlak n _u RO	Scheur- fractie = Relatieve opp. vlakke scheuren SF _{nu}	Volledig profiel	Diepte begin	Volledig profiel	Inhoud scheuren (berging)
(m)	(m)	(%)	(%)	(%)	(kg/m ³)	(kg/m ³)	(%)	(g/ 100g)	(-)	(-)	(-)	(cm ³ / 100g)	(cm ³ / 100g)	(-)	(-)	(-)	(m)	(m)	(m)	(mm)
0.55	0.60	31.5	4.1	7.4	1110	2580	57.0	51.3	0.72	0.88	1.74	135	90	0.874	0.764	0.236	0.44	0.60	37.8	
0.70	0.75	36.1	5.6	7.9	1020	2552	60.0	58.9	0.73	0.89	1.60	144	98	0.880	0.774	0.226	0.60	0.75	33.9	
0.85	0.90	30.0	8.8	8.9	980	2488	60.6	61.8	0.74	0.88	1.46	143	102	0.894	0.800	0.200	0.75	0.90	30.0	
0.95	1.00	29.1	12.6	6.1	800	2418	66.9	83.7	0.95	1.08	1.37	153	125	0.935	0.874	0.126	0.90	1.10	25.1	
1.10	1.15	25.2	15.7	6.6	700	2363	70.4	100.5	1.11	1.23	1.23	151	143	0.981	0.963	0.037	1.10	1.30	7.4	
1.30	1.35	26.4	15	3.8	550	2376	76.8	139.7	1.68	1.79	1.04	137	182	1.100	1.211	-0.211 ^(*)	1.10	1.30	7.4	
Totale berging in mm in de scheuren																			134.2	

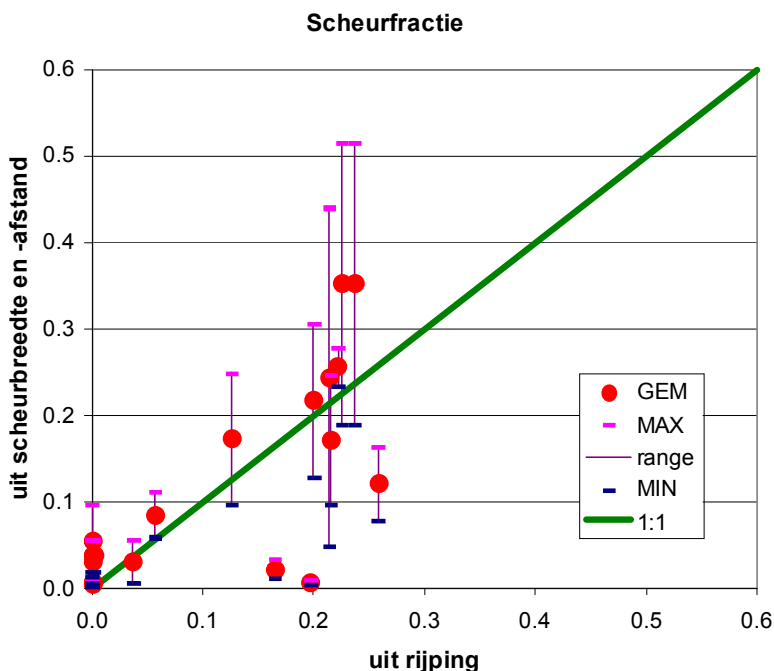
(*) Een negatieve waarde voor de scheurfractie geeft aan dat er nog geen scheuren optreden. De scheurfractie is dan 0

Tabel 2: Textuur en dichtheid van het profiel in tabel 2 op verschillende diepten (Wolters, 1996) en de daaruit berekende mate van rijping. De waarden in de kolommen 7 t/m 11 zijn berekend uit de gegevens in de kolommen 3 t/m 6. Vervolgens worden de gegeven en berekende waarden gebruikt om de scheurfractie uit de mate van rijping te berekenen. In de kolommen 18 t/m 20 worden uit de diepte-intervallen in de kolommen 1 en 2 een aansluitend diepteprofiel samengesteld met bijbehorende inhoud van de scheuren (berging)uitgedrukt in mm berekend als de laagdikte maal de scheurfractie (kolom 17). De som van de berging in de lagen geeft de berging van het profiel (134,2 mm).

Vergelijking van de twee methoden

Voor het voorbeeldprofiel is methode 1, scheurfracties berekend uit scheurafstanden en scheurbreedten (Tabel 2), vergeleken met methode 2, scheurfractie berekend uit de mate van rijping (Tabel 3). Deze blijken goed met elkaar overeen te komen. De scheurfractie berekend met de rijping valt tussen de minimum en maximum waarde voor de scheurfractie berekend uit visuele waarnemingen.

De berekeningen van beide methoden zijn tevens uitgevoerd voor een zestal profielen van Groen (1997) en Wolters (1996). In de zes profielen waren in totaal 18 lagen te onderscheiden. Per laag zijn de resultaten van beide methoden wat betreft scheurfractie met elkaar vergeleken in Afbeelding 6. In Afbeelding 6 is dit aangegeven met de rode bolletjes (GEM), waarbij voor de waarden berekend uit de scheurbreedte en scheurafstand ook de maximum (MAX) en minimum (MIN) berekende scheurfractie is aangegeven.



Afbeelding 6: Vergelijking van scheurfracties berekend uit scheurbreedten en scheurafstanden en de scheurfractie berekend uit de mate van rijping.

Het blijkt dat de scheurfractie berekend uit de rijping in de meeste gevallen lagere waarden geeft dan de scheurfractie berekend uit visuele waarnemingen en metingen aan de scheuren (de "werkelijke" scheurfractie).

Voor een drietal punten geldt dit duidelijk niet. Voor twee punten waarbij in het veld de scheurfractie maar zeer beperkt blijkt te zijn, geldt dat deze bovenin het profiel liggen op een diepte van 37 – 42 cm en een diepte van 47 – 52 cm. Zeker in de meest ondiepe situatie kunnen door grondbewerking en berijden van de grond de scheuren zijn

vernield en/of opgevuld. Bij het derde punt, met scheurfracties van 0.258 (uit rijping) respectievelijk 0,121, betreft het scheuren op een diepte van 55 – 60 cm in een middelzware kleigrond (ca 33% lutum op de grond) met een vrij hoog organisch stofgehalte (ca 11,5 %). Bij andere profielen met een vergelijkbare grond en diepte zijn meer en bredere scheuren aanwezig. Het is niet duidelijk waarom dit hier niet het geval is.

Al met al lijkt de conclusie gerechtvaardigd dat een berekening van de scheurfractie uit de mate van rijping een (veilige) basis vormt voor de constructie van een kaart waarop aangegeven is waar kleisheuren voorkomen en een schatting van de berging.

In kaart brengen van kleisheuren

Voor het in kaart brengen van de kleisheuren is gebruik gemaakt van data uit het Bodemkundig Informatie Systeem, kortweg BIS (www.bodemdata.nl). In BIS zijn 263 boorbeschrijvingen voor Flevoland beschikbaar.

Uit deze boorbeschrijvingen is het pakket dieper dan 40 cm –mv en boven de GLG geselecteerd, maar nooit dieper dan 120 cm. De bovenkant van het pakket (40 cm – mv) is gebaseerd op de ervaring bij profielkuilen dat de permanente kleisheuren tot die diepte zijn verstoord (Groen, 1997, Wolters, 1996). Dit zal met name door grondbewerking zijn veroorzaakt. De diepte van 120 cm – mv voor de onderkant van het pakket is ook gebaseerd op ervaringen met profielkuilen (Groen, 1997, Wolters, 1996), waaruit blijkt dat de scheurvorming veelal niet dieper gaat dan de diepte van de drainbuizen, die in de Flevopolders vaak op ca 1,0 – 1,1 m – maaiveld liggen. De scheurvorming zal ook niet dieper gaan dan de laagste grondwaterstand, vandaar dat naast de maximale diepte van 1,2 m – maaiveld ook de GLG als criterium voor de maximale diepte van de scheuren is gekozen. Van de 263 BIS profielen is de GLG bekend.

Binnen het beschouwde diepte-interval zijn de lagen die meer dan 17,5% lutum bevatten geselecteerd. Een lutumgehalte van 17,5% geeft de grens aan tussen de textuurklassen matige lichte zavel en zware zavel. In matige lichte zavels (lutumgehalte tussen 12% en 17,5%) zijn ook wel permanente kleisheuren geconstateerd (Wolters, 1996), maar we gaan voor de zekerheid uit van een ondergrens van 17,5% lutum.

Bij alle 263 BIS profielen is per bodemlaag bekend wat het lutum- en het organische stofgehalte is. Verder is voor iedere laag op basis van het lutum- en organische stofgehalte een schatting van de droge dichtheid gemaakt. Hiervoor is gebruik gemaakt van een empirische relatie die is afgeleid van de gegevens van 26 bodemlagen van de zes profielen in de Flevopolders die eerder zijn gebruikt voor de bepaling van de scheurfractie (Groen, 1997, Wolters, 1996). De droge dichtheid γ_d blijkt afhankelijk van de diepte D, het lutum- en organische stofgehalte volgens de formule:

$$\gamma_d = 1465,32 - 2,64 * D - 3,08 * L - 30,78 * H \quad (14)$$

Waarin: D = diepte (cm)
L = lutumgehalte (%)
H = organische stofgehalte (%)
 γ_d = droge dichtheid in (kg/m³)

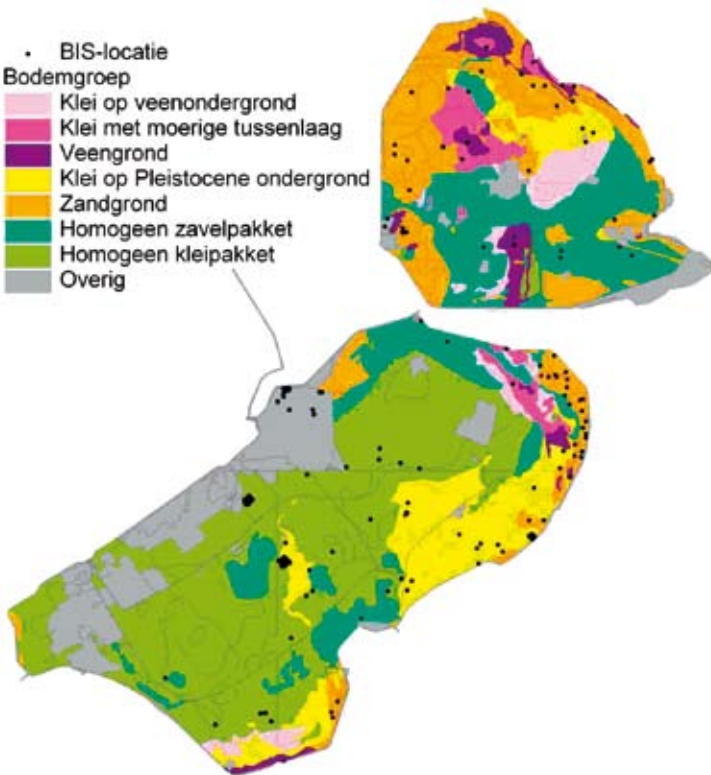
Deze empirische relatie verklaart 94% van de variantie in droge dichtheid en is gebruikt om voor iedere laag een schatting van de droge dichtheid te maken. De droge dichtheid is alleen berekend voor lagen met een organische stofgehalte onder de 15%. Bij hogere organische stofgehalten zijn de bodemlagen bij verzadiging waarschijnlijk zo slap dat rijpingsscheuren bij een gering eigen gewicht al dicht worden gedrukt.

Op basis van de berekende droge dichtheid is conform het rekenvoorbeeld in Tabel 2 per bodemlaag een schatting van de fractie scheuren gemaakt door eerst het watergetal A en de waterfactor N te berekenen.

De totale dikte van de kleilagen in het beschouwde diepte-interval is berekend door sommatie van de afzonderlijke lagen met lutumgehalte boven de 17,5%, en organisch stofgehalte onder de 15%. Over de dikte van dit pakket kleilagen is de berging en het gewogen gemiddelde van de scheurfractie berekend. De berging komt dan overeen met de gemiddelde scheurfractie vermenigvuldigd met de pakketdikte aan kleilagen. Voor alle 263 BIS-locaties is deze berekening uitgevoerd.

Integratie met de bodemkaart

De BIS-locaties zijn over een gegeneraliseerde 1:50.000 bodemkaart gelegd (zie Afbeelding 7). De BIS-locaties zijn helaas ruimtelijk niet zo goed verdeeld over Zuidelijk



Afbeelding 7: BIS-data locaties op de gegeneraliseerde bodemkaart.

en Oostelijk Flevoland en de Noordoostpolder. De bodemeenheden zijn gegeneraliseerd tot zeven groepen op basis van verschillen in dikte van het kleipakket met meer dan 17,5% lutum. Kleigronden zijn daarom in meerdere groepen verdeeld, afhankelijk van de ondergrond en textuur. De zand-, zavel- en veengronden zijn elk apart gegroepeerd. Gezien de geringe kleidikte in deze groepen is een nadere onderverdeling niet nodig. De bodemgroepen staan aangegeven in Afbeelding 7. De groep "Overig" betreft gebieden met water, moeras of bebouwing.

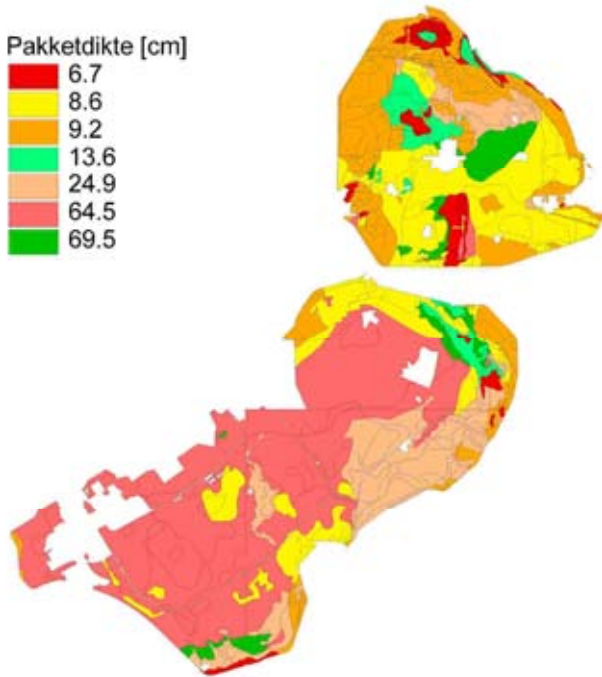
In Tabel 3 zijn voor de zeven bodemgroepen resultaten vermeld van de berekening van de berging volgens methode 2. De tussenresultaten Pakketdikte en Scheurfractie, alsook de berekende berging zijn grafisch weergegeven in de Figuren 8 t/m 10.

Bodemgroep	Aantal profielen	Pakketdikte		H		L		Scheurfractie		Berging (mm)
		Gem. (cm)	Std. (cm)	Gem. (%)	Std. (%)	Gem. (%)	Std. (%)	Gem. (-)	Std. (-)	
Homogeen kleipakket	71	64,5	22,0	1,9	1,9	30,2	5,3	0,137	0,047	88,2
Klei met moerige tussenlaag	7	13,6	19,1	5,3	7,5	23,3	3,5	0,110	0,048	15,0
Veengrond	6	6,7	12,1	9,0	8,5	26,0	8,5	0,178	0,072	11,9
Klei op veenondergrond	21	69,5	8,2	1,1	0,6	35,0	2,7	0,160	0,020	111,0
Klei op Pleistocene ondergrond	60	24,9	22,0	4,5	3,1	25,2	5,6	0,180	0,044	44,9
Zandgrond	75	9,2	17,7	5,5	4,1	23,1	5,1	0,127	0,088	11,6
Homogeen zavelpakket	21	8,6	19,2	6,2	5,0	21,8	4,4	0,045	0,063	3,9

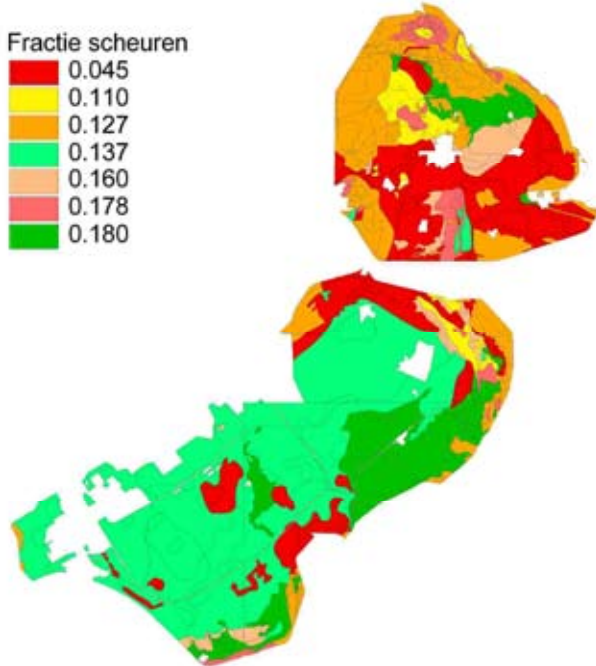
Tabel 3: Berekende berging voor zeven bodemgroepen ,waarvan de pakketdikte geldt: *lutumgehalte L > 17,5% en organische stofgehalte H < 15%.*

Voor een geostatistische opschaling in de ruimte bleek er te weinig data te zijn. Het maximaal haalbare was om voor de constructie van kaarten met de pakketdikte, de scheurfractie en de berging de gemiddelde kenmerken van zeven bodemgroepen te bepalen, zoals gegeven in de bovenstaande tabel.

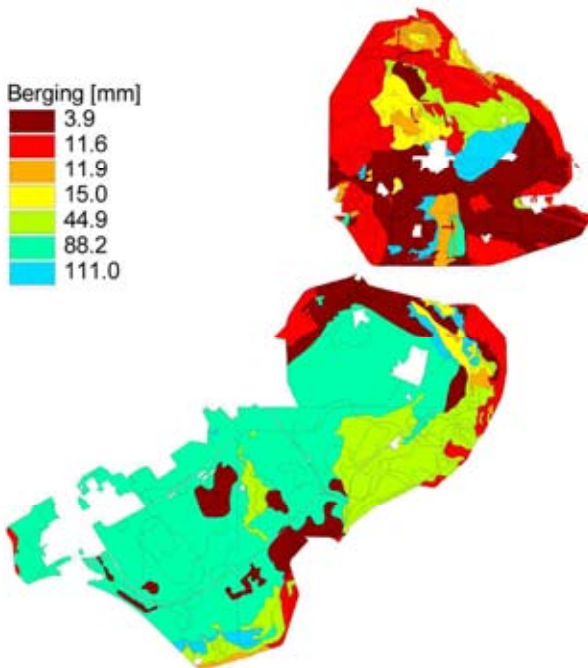
De resulterende kaarten zijn gegeven in de Afbeeldingen 8 t/m 10. Hieruit mag niet de conclusie worden getrokken dat er overal permanente scheuren aanwezig zijn in de ondergrond. Gezien de ongelijke ruimtelijke spreiding van de BIS-locaties kunnen er delen voorkomen zonder scheuren.



Afbeelding 8: Pakketdikte lagen met een lutumgehalte > 17,5% en organische stofgehalte < 15%.



Afbeelding 9: Gemiddelde scheurfractie per bodemgroep in de lagen met een lutumgehalte > 17,5% en organische stofgehalte < 15%.



Afbeelding 10: Berging in de rijpingsscheuren per bodemgroep in de lagen met een lutumgehalte > 17,5% en organische-stofgehalte < 15%.

Effecten in een SOBEK-rekenmodel

Als laatste stap in dit project is de verkregen informatie vertaald in de bodemprofielen die in SOBEK-RR aanwezig zijn. De extra bergingscapaciteit is op de juiste diepte in de bergingscoëfficiëntprofielen in SOBEK verdisconteerd. Een uitgevoerde plausibiliteitstest laat zien dat het SOBEK-modelinstrumentarium goed functioneert met deze aanpassing. De volgende stap is het volledig verdisconteren van deze bergingsprofielen in de bestaande SOBEK-modellen van het waterschap, waarna in de modelkalibratieprocedure óók aandacht geschonken wordt aan het tweede hydrologische effect van scheurvorming, namelijk een lagere drainageweerstand. In een vervolg op dit artikel zullen we verslag doen van deze modelaanpassing en -kalibratie.

Conclusies en aanbevelingen

Met deze studie is een goede voorlopige indruk verkregen van de berging in permanente rijpingsscheuren. Het blijkt dat grote delen van Zuidelijk en Oostelijk Flevoland waarschijnlijk een behoorlijke grote bergingscapaciteit in permanente kleischeuren hebben. Bij de Noordoostpolder geldt dit alleen voor een vrij klein gebied met kleigronden op het Pleistocene zand of kleigronden op veengronden. De onzekerheden zijn echter groot. Er is een groot gebrek aan hard bewijs in de vorm van veldmetingen. Omdat de veldmetingen die door Wolters (1996) zijn gebruikt al in

de jaren 1978 en 1979 zijn uitgevoerd en die van Groen (1997) midden jaren negentig, zal de hieruit afgeleide dichtheidsrelatie de mate van rijping op dit moment (2011) enigszins onderschatten. Hiermee zitten we voor de berekende scheurfractie en de berging in het gebied waarschijnlijk aan de conservatieve kant.

Voor een verdere verbetering van het inzicht in het fenomeen kleischeuren in Flevoland wordt aanbevolen om de door de RIJP verzamelde gegevens van de opgeheven rijpingsterreinen (van Dooremolen e. a., 1996) op te sporen en deze toegankelijk te maken door deze data te digitaliseren. Dit zou een geostatistische opschaling wellicht mogelijk maken.

Dit zou verder versterkt kunnen worden door de data van de bodemkundige code- en profielenkaarten van Oostelijk en Zuidelijk Flevoland (Ente en Segeren, 1969, Koning en Ente, 1986) te digitaliseren. Door bovendien op een aantal relevante punten van de vroegere rijpingsterreinen de huidige mate van rijping vast te stellen, zou beter kunnen worden berekend wat de huidige scheurfracties zijn. Deze combinatie van ontsluiten van oude data en gerichte aanvullende metingen zou de onzekerheid sterk doen afnemen en met behulp van geostatistiek ook beter kwantificeerbaar maken.

Literatuur

Boels, D, J.J.H. van den Akker, J.E. Dijkhuis, R. Duijn, W. Ma, J. Harmsen, R. Kampf, A. van den Toorn, G.D. Vermeulen en J.J. van der Waarde (1999)

Kwaliteitsverbetering van baggerspecie op basis van extensieve biorestatuatie in combinatie van energieteelt; Gouda, CUR/NOBIS, rapport 96-1-02

Bronswijk, J.J.B. (1991) Magnitude, modeling and significance of swelling and shrinkage processes in clay soils; Proefschrift Wageningen Universiteit

Dooremolen, W.A. van, A. van der Scheer en H.J. Winkels, 1996 Waarnemingen en prognoses van de maaiveldsdaling in Flevoland; in Flevovericht 388: Lelystad, Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Rijkswaterstaat, Directie IJsselmeergebied

Eertwegh, G.A.P.H. van den (2002) Water and nutrient budgets at field and regional scale, Travel times of drainage water and nutrient loads to surface water; Proefschrift, Universiteit Wageningen

Ente, P.J. en W.A. Segeren (1969) Toelichting bij de bodemkundige code- en profielenkaart en de grondwaterstandenkaarten van Oostelijk Flevoland.; Rijksdienst IJsselmeerpolders, Lelystad, Flevovericht 65

Geertsema, H.E. (2009) De invloed van kleischeuren op het neerslag-afvoerproces; Technische Universiteit Delft, Faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen, Sectie Waterhuishouding

Glopper, R.J. de (1973) Subsidence after drainage of the deposits in the former Zuyder Zee and in the brackish and marine forelands in The Netherlands; Van Zee tot Land no. 51

Groen, K.P. (1997) Pesticide Leaching in Polders: Field and Model Studies on Cracked Clays and Loamy Sand; Proefschrift, Universiteit Wageningen

- Groenevelt, P.H. en Grant, C.D. (2002)** Curvature of shrinkage lines in relation to the consistency and structure of a Norwegian clay soil; in: Geoderma 106: pag 236-245
- Kim, J.D. (1992)** Characterization of swelling and shrinkage behaviour, hydraulic properties and modeling of water movement in a physical ripening marine clay soil; Katholieke Universiteit Leuven, Doctoraatsproefschrift Nr. 218
- Koning, J. en P.J. Ente (1986)** De bodemkundige code- en profielenkaart van Zuidelijk Flevoland, schaal 1 : 25.000; Rijksdienst IJsselmeerpolders, Lelystad. Flevobericht 271
- Menke, U., E. van de Laar en G. Lenselink (1998)** De bodem en geologie van Zuidelijk Flevoland; Flevobericht nr. 415. Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Rijkswaterstaat Directie IJsselmeergebied, Lelystad, 93 blz
- NHI (2008)** Nationaal Hydrologisch Instrumentarium - NHI, Modelrapportage; Deelrapport Bodem
- Pons, L.J. en I.S. Zonneveld (1965)** Soil ripening and soil classification; ILRI publ. no. 13, Wageningen
- Projectbureau Oostvaarderswold (2010)** Scheurvorming in de Almerelaag Oostvaarderswold; Arcadis
- Rijniersce, K. (1983)** Een model voor de simulatie van het fysische rijpingsproces van gronden in de IJsselmeerpolders; Van Zee tot Land nr. 52, Lelystad. Dissertatie Universiteit Wageningen
- Scheer, A. van der (1979)** Over de te verwachten inklinking van gronden in het Markerwaardgebied na drooglegging; Flevobericht nr.101, Lelystad
- Schultz, E. (1992)** Waterbeheersing van de Nederlandse droogmakerijen; Proefschrift, Technische Universiteit Delft
- Vermeulen, J. (2007)** Ripening of PAH and THP polluted sediments, Determination and quantification of bioremediation parameters; PhD-Thesis Wageningen University, Wageningen
- Viergever, M.A. (1986)** De ondergrond van Almere - grondmechanische en funderingstechnische gegevens; Flevobericht nr. 262, Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat Directie IJsselmeergebied, Lelystad
- Vos, S.F., S.A. Kroes en K. Kooistra (2005)** Drainage in Fryslân: Inventarisatie van de drainagesituatie in Friesland van nu en in de toekomst; Rapport 0152953-drainageWsFryslan-050405, Oranjewoud
- Wolters, H.A. (1996)** Neerslag en afvoer in het landelijk gebied van Flevoland; Flevobericht nr. 357, Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat, directie IJsselmeergebied, Lelystad
- Zuur, A.J. (1958)** Bodemkunde der Nederlandse bedijkingen en droogmakerijen. Deel C. Het watergehalte, de indroging en enkele daarmee samenhangende processen; College dictaat LUW - Wageningen

