



Gedrag van verdroogde kades

Fase B, C, D: Ontstaan en gevaar van krimp-scheuren in klei- en veenkades

J.J.H. van den Akker, R.F.A. Hendriks, J.Y. Frissel, K. Oostindie en J.G. Wesseling



ALTERRA
WAGENINGEN **UR**

Gedrag van verdroogde kades

Fase B, C, D: Ontstaan en gevaar van krimp-scheuren in klei- en veenkades

J.J.H. van den Akker, R.F.A. Hendriks, J.Y. Frissel, K. Oostindie en J.G. Wesseling

Alterra Wageningen UR
Wageningen, oktober 2013

Alterra-rapport 2473
ISSN 1566-7197

Akker, J.J.H. van den, R.F.A. Hendriks, J.Y. Frissel, K. Oostindie en J.G. Wesseling, 2013. *Gedrag van verdroogde kades; Fase B, C, D: Ontstaan en gevaar van krimpscheuren in klei- en veenkades*. Wageningen, Alterra Wageningen UR (University & Research centre), Alterra-rapport 2473. 88 blz.; 24 fig.; 11 tab.; 29 ref.

Het beschreven onderzoek in dit rapport is onderdeel van het onderzoeksproject 'gedrag van verdroogde kades' van het Hoogheemraadschap Delfland. Het onderzoek van Alterra is een bureau- en modelonderzoek en is gericht op scheuren door krimp, die ontstaan in lange perioden met droogte. Onderzocht zijn veenkaden en kleikaden op veen, met een accent op kleikaden omdat deze in Delfland het meeste voorkomen. Bij kleikaden lijkt het grootste risico preferente stroming via de scheuren te zijn. Bomen kunnen door hun diepe beworteling en grote verdamping een extra risico vormen. Langsscheuren in de kruin kunnen met water gevuld worden en dit kan resulteren in een bezwijkmechanisme. Dit is door Deltares nader onderzocht in een parallel rapport.

Trefwoorden: kade, dijk, veen, klei, scheur, krimp, rijping, SWAP, kruin daling, verdroging, kleikade, veenkade

Dit rapport is gratis te downloaden van www.wageningenUR.nl/alterra (ga naar 'Alterra-rapporten'). Alterra Wageningen UR verstrekt *geen* gedrukte exemplaren van rapporten. Gedrukte exemplaren zijn verkrijgbaar via een externe leverancier. Kijk hiervoor op www.rapportbestellen.nl.

© 2013 Alterra (instituut binnen de rechtspersoon Stichting Dienst Landbouwkundig Onderzoek), Postbus 47, 6700 AA Wageningen, T 0317 48 07 00, E info.alterra@wur.nl, www.wageningenUR.nl/alterra. Alterra is onderdeel van Wageningen UR (University & Research centre).

- Overname, verveelvoudiging of openbaarmaking van deze uitgave is toegestaan mits met duidelijke bronvermelding.
- Overname, verveelvoudiging of openbaarmaking is niet toegestaan voor commerciële doeleinden en/of geldelijk gewin.
- Overname, verveelvoudiging of openbaarmaking is niet toegestaan voor die gedeelten van deze uitgave waarvan duidelijk is dat de auteursrechten liggen bij derden en/of zijn voorbehouden.

Alterra aanvaardt geen aansprakelijkheid voor eventuele schade voortvloeiend uit het gebruik van de resultaten van dit onderzoek of de toepassing van de adviezen.

Alterra-rapport 2473 | ISSN 1566-7197

Foto omslag: Hoogheemraadschap Delfland

Inhoud

	Woord vooraf	5
	Samenvatting	7
1	Inleiding	9
2	Scheurvorming door rijping en krimp	11
	2.1 Rijping	11
	2.2 Krimp van kleigronden	13
	2.3 Krimp van veengronden	17
3	Scheurvorming door bomen	19
4	Modellering krimpscheuren	23
	4.1 Methoden	25
	4.1.1 Theoretische dijken	28
	4.1.2 Werkelijke dijken	29
	4.1.3 Invloed van hellingshoek en expositie ten opzichte van de zon	32
	4.2 Resultaten en discussie	34
	4.2.1 Theoretische dijken	34
	4.2.2 Werkelijke dijken	39
	4.2.3 Invloed van hellingshoek en expositie ten opzichte van de zon dit is 4.2.3	42
5	Effect van grasbeheer en begroeiing op vochtgehalte en scheurbreedte bij uitdrogende kleikades	45
	5.1 Verzadigingsgraad	47
	5.2 Scheurbreedte	49
6	Beantwoording vragen	51
	6.1 FASE B, Verklaring van ontstaan van de scheur- en vervormingspatronen	51
	6.2 FASE C, Beschrijving van mogelijke faalmechanismen	53
	6.3 FASE D, Maatregelen ter voorkoming van en reparatie van scheurvorming	54
7	Conclusies en aanbevelingen	59
	7.1 Conclusies	59
	7.2 Aanbevelingen	60
	Referenties	61
	Bijlage 1 Krimpkarakteristieken	63
	Bijlage 2 Textuurindeling in de bodemkunde (Steur en Heijink, 1991)	65
	Bijlage 3 Veldbezoek Delfland, onderzoek verdroogde kades	67

Woord vooraf

In 2003 braken bij Wilnis en Terbregge de (veen)dijken door als gevolg van de extreme droogte. Sinds die tijd is veel zorg en aandacht besteed aan deze nieuwe vorm van bezwijken. Dit heeft ondermeer geleid tot een groot aantal onderzoeken en (Stowa) publicaties en de borging van tot dan toe onbekende faalmechanismen in de leidraad voor het toetsen van regionale keringen. Het hoogheemraadschap van Delfland heeft voor droogtegevoelige dijken beleid ontwikkeld om ze met extra zorg te beheren.

In de afgelopen jaren is duidelijk geworden dat de Delflandse droogtegevoelige dijklichamen ook op andere manieren door extreme droogte worden beïnvloed. Grootschalige scheuren en scheurpatronen in vooral dijken van klei op veen zorgden voor de nodige onrust. In de droogte van 2011 trad in Berkel en Roodenrijs dijkfalen bijna op nadat een scheur door de kade leidde tot wateroverlast. Tijdig ingrijpen voorkwam erger.

Omdat bijzondere zorg - bij extreme weerscondities - voor bijna 200 km kering leidt tot een aanzienlijke inzet van beheercapaciteit en middelen was het de vraag in hoeverre de scheurvorming de zorg in de huidige omvang noodzaakte. Inhoudelijk was hierbij de vraag hoe sterk de scheurvorming de veiligheid kon beïnvloeden.

Delfland heeft daarom het onderzoek 'gedrag van verdroogde kades' gedefinieerd en samen met Alterra en Deltares uitgewerkt. Hierbij is voornamelijk gebruik gemaakt van beschikbare (inspectie)-gegevens van Delfland en de expertise van de drie organisaties. Bij de totstandkoming van dit onderzoek is afgestemd met Stowa en Waterschap Rivierenland.

Samenvatting

Het Hoogheemraadschap Delfland beheert ongeveer 400 km regionale kering, waarvan een groot deel kleikades op veen. In droge perioden ontstaan in deze kades veel droogtescheuren, die mogelijk een probleem opleveren voor de stabiliteit of het waterkerend vermogen. In dit rapport wordt eerst nader ingegaan op het ontstaan van krimpscheuren in klei- en veengronden en de problemen die krimp-scheuren kunnen opleveren. Daarbij wordt ook aandacht besteed aan rijping, omdat de grond waaruit de betreffende kades zijn opgebouwd lang niet altijd bestaat uit volledig gerijpte grond. In voorkomende gevallen kan dit tot veel extra scheurvorming leiden, die dan ook nog voor een belangrijk deel permanent zijn. Extra aandacht krijgen krimp en scheurvorming door bomen. Afhankelijk van de soort boom kunnen deze de oorzaak zijn van tot wel twee meter diepe krimpscheuren. Met het model SWAP zijn een aantal theoretische kades en twee werkelijke kades doorgerekend voor zeer droge jaren (1976 en 2003) en voor 2011, dat wordt gekenmerkt door een zeer droog voorjaar. Van de twee werkelijke kades waren scheurbreedten en -diepten uit 2011 bekend. Verder zijn de werkelijke dijken in 2013 nader onderzocht.

Uit het onderzoek volgt dat de krimp- en scheurgevoeligheid van de kade sterk afhangt van diepte van het freatisch vlak en van de zwaarte van de klei waarmee de kade is opgebouwd. Indien niet goed gerijpte klei is gebruikt of klei met een hoog gehalte aan organische stof, neemt de scheurgevoeligheid sterk toe. Veen is het meest gevoelig voor krimp en scheurvorming, omdat veen door haar hoge watergehalte veel meer en veel langer kan uitdrogen dan klei. Van belang is daarbij dat gras beter en dieper wortelt in veen dan in klei, waardoor het uitdrogen van een veenkade extra wordt bevorderd. Beregenen om te voorkomen dat een kade uitdroogt en grote scheurvorming optreedt kan, maar vergt veel inspanning en discipline. Een maai- of weidebeheer om de verdamping door het gras te beperken en daarmee het uitdrogen van de kade, lijkt weinig effectief. Het grasbeheer zou vooral gericht moeten zijn op het behoud van een goede grasmatten om erosie en snelle afstroming van water te beperken en om diepwortelende planten te voorkomen. Diepwortelende gewassen, vooral struiken en bomen, kunnen kades tot zeker twee meter diepte sterk uitdrogen, waarbij grote, diepe scheuren ontstaan.

Krimpscheuren hebben vooral als nadeel dat een netwerk ontstaat van preferente stroombanen voor water. Bij vernatten zwellen lang niet alle scheuren helemaal dicht en blijft het netwerk van preferente stroombanen grotendeels bestaan. Nabij het boezemwater en onder het diepste freatisch vlak droogt de grond niet uit en ontstaan geen krimpscheuren. Deze slecht doorlatende grond houdt het boezemwater tegen en bepaalt de kerende werking van de kade. Kortsluiting tussen het boezemwater en de grond met krimpscheuren zorgt dan voor lekken van de kade. Een langsscheur door krimp kan daarbij het water over een grote breedte en daarmee groot aantal dwarskrimpscheuren verspreiden. Een ander nadeel van een langsscheur in de kruin is dat bij een kortsluiting tussen scheur en boezemwater het water zo snel kan toestromen dat de scheur zich volledig vult, waardoor zich een horizontale waterdruk tegen de scheurwand kan opbouwen. Uit het onderzoek van Deltares volgt dat dit kan leiden tot afschuivingen. Verhoging van het boezempeil door extreme regenval vergroot de kans van kortsluiting in hoge mate omdat in de onverzadigde zone in de kruin krimpscheuren en diergangen kunnen voorkomen.

1 Inleiding

Het Hoogheemraadschap van Delfland (hierna te noemen Delfland) beheert ongeveer 400 km regionale kering. Een deel daarvan is droogtegevoelig. In tijden van droogte worden de droogtegevoelige keringen frequent(er) geïnspecteerd. Naarmate de droogte in ernst toeneemt vraagt de inspectie steeds meer capaciteit van de organisatie. Hierdoor ontstaan discussies over nut en noodzaak (van delen) van het inspectieprotocol. Dit heeft geleid tot de start van een onderzoek door Delfland naar het gedrag van de verdroogde kades op basis van beschikbare gegevens van afgelopen droogteperioden.

Doelstelling

De doelen van het onderzoek van Delfland zijn het inzicht geven in:

1. Nadere onderbouwing van nut en noodzaak van de inspectie en maatregelen die naar aanleiding van de inspecties genomen worden,
2. Welke maatregelen getroffen kunnen worden om de omvang van de inspectie-inspanning te verminderen.

Inhoudelijk vertaalt de vraagstelling zich in de volgende twee vragen:

1. Vormt de scheurvorming en vervorming van de kade tijdens droogte een veiligheidsrisico?
2. Zo ja, hoe kan de scheurvorming voorkomen worden (preventief en of adequate reparatie).

Alterra en Deltares zijn gevraagd om aan onderdelen bij te dragen. Hiertoe zijn voor zowel Deltares als voor Alterra deelvragen gedefinieerd.

Aanpak en fasering project Gedrag van verdroogde kades

Door Delfland is een aanpak gedefinieerd en een fasering aangebracht. Vijf fasen, A t/m E, zijn onderscheiden, waarbij door Alterra en Deltares fase A wordt aangevuld en de fasen B, C en D worden uitgevoerd. In het voorliggende rapport wordt het aandeel van Alterra aan de fasen B, C en D gerapporteerd.

FASE A. Beschrijving van de waargenomen verschijnselen

Fase A is voornamelijk door Delfland zelf uitgevoerd en geeft een beschrijving van de scheuren en mogelijke vervormingen zoals waargenomen in het beheergebied van Delfland. De resultaten zijn door Alterra en Deltares doorgenomen en van commentaar voorzien. Alterra richt zich daarbij specifiek op de onverzadigde zone, waarin krimpscheuren kunnen optreden, die zich (misschien) kunnen doortrekken in de verzadigde zone als bezwijkscheuren. Daarbij wordt bestaande kennis ingebracht en aangeleverd. De resultaten uit fase A vormen de basis voor fase B. De bijdrage aan fase A is apart gerapporteerd aan Delfland in de vorm van een notitie met commentaar op het rapport van Delfland (Ponsteen, 2013, Gedrag verdroogde veenkades - Analyse droogte-inspectie).

FASE B. Verklaring van ontstaan van de scheur- en vervormingspatronen

De scheur- en vervormingspatronen moeten een bodemfysische en geotechnische verklaring hebben. Alterra richt zich op de onverzadigde zone, waar de droogtescheuren ontstaan. De vraag is of de droogtescheuren zich zouden kunnen voortzetten in de verzadigde zone als bezwijkscheur. De rol van materiaalopbouw en verdrogingsmechanismen zijn onderzocht. Het onderzoek van Alterra heeft in deze fase een zwaartepunt.

FASE C. Beschrijving van mogelijke faalmechanismen

De vraag is of naast het faalmechanisme van Wilnis (verlies van horizontaal evenwicht, na ontstaan van hydraulische kortsluiting) er andere faalmechanismen zijn die door of vanwege de scheuren zouden kunnen leiden tot het falen van de kering (leidend tot doorbraak). Het zwaartepunt van deze fase ligt bij Deltares.

FASE D. Maatregelen ter voorkoming van en reparatie van scheurvorming

Vragen die aan de orde komen zijn hoe scheurvorming kan worden voorkomen door o.a. materiaalgebruik, effectiviteit berekening e.d., wijze en effectiviteit van dichten van scheuren en materiaalgebruik bij onderhoud en versterkingen van de kade. De inbreng van Alterra in de fase D is groot.

FASE E. Synthese

Het onderzoek naar het gedrag van verdroogde kades moet uiteindelijk leiden tot aanbevelingen voor onderhoud, verbeteringen, inspectie, (nood-)maatregelen en eventuele aanvullingen op toets- en ontwerpregels. De ontwikkelde kennis en inzichten worden in Fase E door Delfland geanalyseerd. Bij deze fase zijn Alterra en Deltares vooralsnog niet betrokken.

Opbouw rapport en leeswijzer

In de hoofdstukken 2 en 3 wordt het verschijnsel krimp beschreven inclusief de processen die daarbij een rol spelen. In hoofdstuk 3 wordt daarbij specifiek ingegaan op de scheurvorming door bomen. Op deze manier wordt inzicht gegeven in de aspecten die belangrijk zijn bij de krimp en scheurvorming van veenkades en kleikades. Daarmee is een theoretische basis gelegd voor een serie modelberekeningen in de hoofdstukken 4 en 5.

In hoofdstuk 4 worden een aantal theoretische kades doorgerekend. De doorgerekende kleikades zijn opgebouwd met lichte, middelzware en zware klei, vallende in de TAW categorieën 1, 2 en 3. Daarnaast wordt een veenkade doorgerekend, waarbij is uitgegaan van een bestaande veenkade (Middelburgsekade). Vervolgens zijn twee kleikades in het gebied van Delfland doorgerekend. Voor de modellering van de twee doorgerekende kades is een veldbezoek afgelegd en is informatie verzameld over de situatie, de grond, de begroeiing en beworteling en de krimpverschijnselen en scheurvorming. Delfland heeft de profielen laten inmeten en er zijn boringen verricht en grondmonsters verzameld en fysisch geanalyseerd. Het veldbezoek en de grondanalyse zijn gerapporteerd in bijlage 3 van het rapport. In hoofdstuk 4 is ook ingegaan op het effect van de gewasverdamping van het gras in relatie tot de taludhelling en de richting van die helling ten opzichte van het zuiden.

Ook in hoofdstuk 5 zijn modelberekeningen verricht voor het beheer van de kades. Beschouwd zijn een grasbekleding, gemaaid of geweid, en het effect van bomen op de uitdroging van de kade en de scheurvorming. Samen met de resultaten van hoofdstuk 4 vormt dit de basis voor het beantwoorden van de specifieke vragen van Delfland in hoofdstuk 6.

Door Delfland zijn specifiek voor Alterra per Fase een serie vragen gesteld. Deze zijn beantwoord in hoofdstuk 6. Daarvoor is de algemene kennis in de hoofdstukken 2 en 3 en de resultaten van de modelleringen in de hoofdstukken 4 en 5 gebruikt.

Tot slot zijn in hoofdstuk 7 een aantal conclusies getrokken en aanbevelingen geformuleerd.

Het rapport telt drie bijlagen: bijlage 1, waarin krimpkarakteristieken van klei en veen zijn gegeven, bijlage 2, waarin de textuurindeling zoals gebruikt in de bodemkunde wordt gepresenteerd en tot slot bijlage 3, waarin twee verslagen van het veldbezoek aan drie locaties met kleikades zijn opgenomen, waarbij de ene meer de begroeiing en beworteling beschrijft en de andere meer de bodemkenmerken en scheurvorming. Ook worden de resultaten van boringen en bemonsteringen bij de drie locaties gegeven.

2 Scheurvorming door rijping en krimp

Dit hoofdstuk geeft een overzicht van de basisprincipes van scheurvorming door rijping en krimp. Het hoofdstuk is gebaseerd op Van den Akker, 2001; Van den Akker et al., 2011; Bakker et al., 1995. We gaan ook in op rijping omdat veel grond niet volledig gerijpt is. Meestal vinden we volledig gerijpte grond alleen in de laag die dicht is beworteld.

2.1 Rijping

Slib, zoals dat droogvalt na inpoldering, en bagger die op de kant wordt gezet, hebben een groot gehalte aan gebonden water en moeten eerst rijpen voordat van grond kan worden gesproken. In eerste instantie consolideert het slib door ontwatering en krijgt een wat dichtere pakking. In de volgende fase begint naast consolidatie, rijping door uitdroging een grote rol te spelen in het dichter worden van de grond, waardoor grote bodemdaling kan optreden. De rijping door uitdroging hangt in sterke mate af van de hoeveelheid lutum en organische stof in het slib. In de eerste fase van rijping treedt geen scheurvorming op. In eerste instantie is het rijpende slib zo slap dat het water dat onttrokken wordt door drainage of verdamping volledig wordt omgezet in maaiveld daling. Pas nadat het slib steviger wordt ontstaan scheuren in de klei. De toplaag is door verdamping al snel enigszins uitgedroogd waardoor scheuren ontstaan. De scheuren zijn in het begin ondiep. Op enige diepte is de klei dan nog slechts gedeeltelijk gerijpt en slap en worden de scheuren door het eigengewicht van de bovenliggende grond dichtgedrukt (Rijniersce, 1983). Door de rijping wordt de grond steeds steviger en doordat de zuigspanningen door uitdroging de spanningen door het eigengewicht verre overtreffen, wordt de volumeverandering door rijping en krimp isotroop (alzijdig, zie kader). Op dat moment wordt de verdere volumevermindering voor ongeveer 1/3 omgezet in maaiveld daling en voor 2/3 in scheuren. De rijpingsscheuren zijn vrij stabiel en zijn in de IJsselmeerpolders vanaf ca. 40 cm diepte tot ca. 120 cm diepte nog steeds te vinden.

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 in g per 100 g droge grond

L = lutumgehalte in g per 100 g droge grond

H = organischestofgehalte in g per 100 g droge grond

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

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 (silt, zand, grind) in g per 100 g droge grond. $R = 100 - H - L$

b = verhouding van het waterabsorberend vermogen van de organische stof t.o.v. lutum.

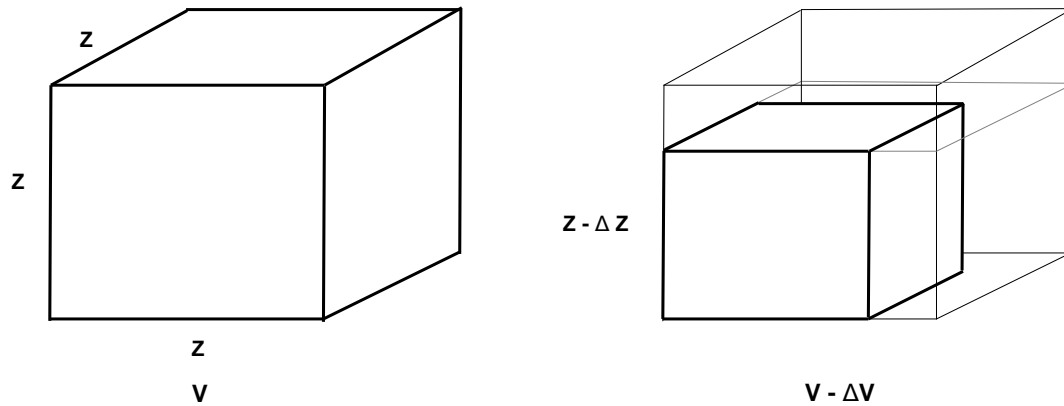
b = 3 bij humus en veraard veen

b = 6 bij weinig verweerd veen

Kader isotrope en anisotrope krimp en rijping

In figuur a is isotrope krimp uitgebeeld (Bronswijk, 1991). Isotrope krimp wil zeggen dat de krimp in alle richtingen gelijk is. In de figuur heeft de linker kubus een initieel volume $V = z^3$, de rechter kubus na krimp een volume van $V - \Delta V = (z - \Delta z)^3$ en het volumeverschil wordt dan $\Delta V = z^3 - (z - \Delta z)^3$. Door het volume na krimp te delen door het initiële volume $V = z^3$ krijgt men:

$$1 - \Delta V / V = (1 - \Delta z / z)^3 \quad (a)$$



Figuur a 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).

In het geval dat er nog geen scheuren optreden en de kubus alleen verticaal kleiner wordt, houden de horizontale zijden een lengte van z (m) en krimpt de verticale zijde tot een lengte van $z - \Delta z$. In dit geval met ééndimensionale krimp wordt vergelijking (a):

$$1 - \Delta V / V = (1 - \Delta z / z)^1 \quad (b)$$

Door Rijniersce (1983) werd de exponent in de vergelijkingen (a) en (b) de r_s -factor genoemd. De vergelijkingen (7) en (8) kunnen daarmee algemener worden geschreven als:

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

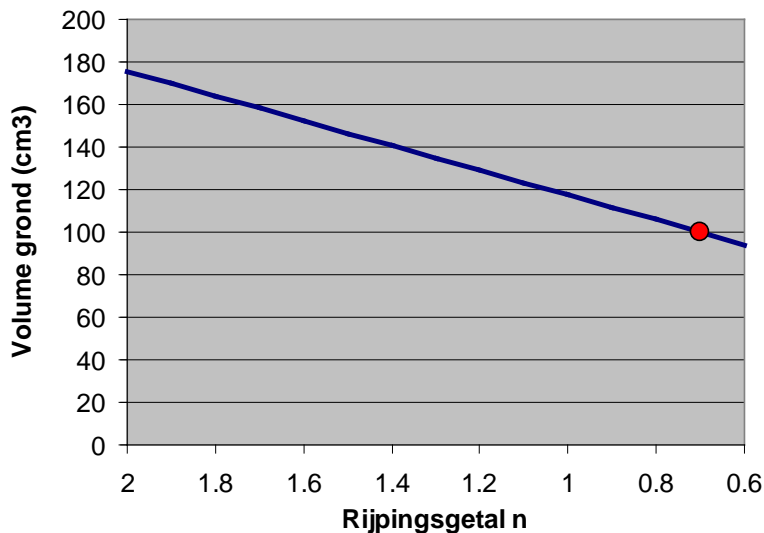
Met r_s als dimensieloze geometriefactor, waarbij voor $r_s = 1$ aangeeft dat er alleen bodemdaling optreedt en geen scheurvorming; $1 < r_s < 3$: overheersend bodemdaling maar ook scheurvorming en $r_s = 3$: isotrope krimp, evenveel horizontale als verticale krimp.

Door Pons en Zonneveld (1965) wordt een classificatieschema gegeven voor rijpende gronden (tabel 2.1).

Tabel 2.1

Classificatie van de rijpingsfactor n volgens Pons en Zonneveld (1965).

n-factor	Classificatie	Omschrijving
< 0,7	Gerijpt	Kleeft niet aan de handen, niet kneedbaar
0,7 - 1,0	Vrijwel gerijpt	Vrij stevig, kleeft een beetje, niet gemakkelijk kneedbaar
1,0 - 1,4	Half gerijpt	Redelijk zacht, kleeft, gemakkelijk kneedbaar
1,4 - 2,0	Vrijwel ongerijpt	Zacht, kleeft erg, zeer gemakkelijk kneedbaar
> 2,0	Ongerijpt	Zeer slap, bijna vloeibare modder

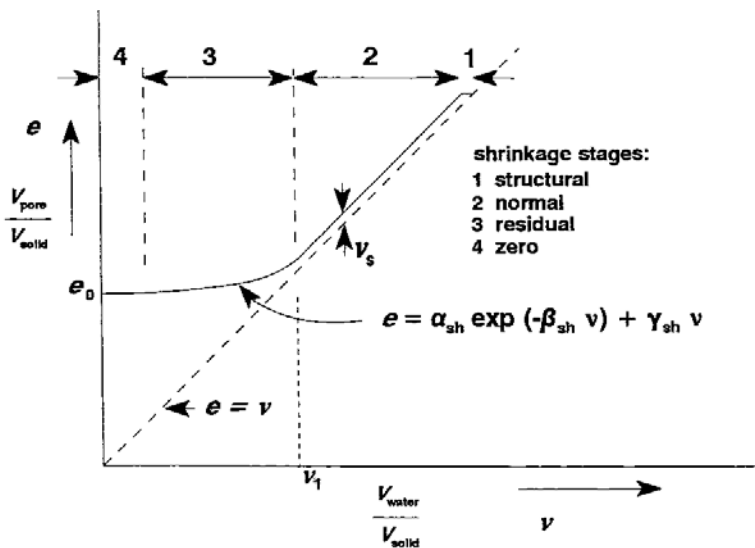


Figuur 2.1 Afname volume grond door rijping. Het gaat om een kleigrond met 35% lutum en 5% organische stof. Bij volledig ongerijpte grond ($n = 2$) is het volume 176 cm^3 . Na volledige rijping ($n = 0,7$) is het volume teruggebracht tot 100 cm^3 .

De afname van volume door rijping en daarmee de maaiveldaling en scheurvorming is groot. In figuur 2.1 is een voorbeeld gegeven van de volumevermindering van een volledig ongerijpte grond ($n = 2.0$) naar een volledig gerijpte grond ($n = 0.7$). Het is een lichte tot matig zware klei met 35% lutum en 5% organische stof. Volledig gerijpte grond met $n = 0.7$ vindt men bijvoorbeeld in de bouwvoor van akkerland. Kleigrond onder de bouwvoor op bijvoorbeeld 50 cm diepte is veelal 'vrijwel gerijpt', waarbij n in de range 1.0 tot 0.7 ligt. Uit figuur 2.1 volgt dat als de kleigrond rijpt van $n = 1.0$ naar $n = 0.7$, het volume met bijna 20% afneemt, wat voldoende is om grote scheuren te laten ontstaan. In principe worden kades en dijken opgebouwd met volledig gerijpte grond dat na opbrengen wordt verdicht. In de praktijk is de opgebrachte grond lang niet altijd volledig gerijpt en in sommige gevallen wordt zelfs 'gerijpte' bagger gebruikt. 'Gerijpte' bagger is echter in de praktijk bij lange na niet volledig gerijpt en vaak nog niet eens 'vrijwel gerijpt'. Onvoldoende gerijpte grond of bagger kan aanleiding geven tot grote scheurvorming.

2.2 Krimp van kleigronden

Kleigronden hebben als eigenschap dat ze bij het uitdrogen krimpen. Het uitdrogen van de kleigrond resulteert in krimpscheuren en maaiveldalingen. Bij bevochtiging van een uitgedroogde kleigrond zwellen de scheuren weer gedeeltelijk of geheel dicht en komt het maaiveld omhoog. Het niet-volledig opzwellen van de klei na uitdrogen, waardoor de scheuren niet dichtzwellen, wordt irreversibele krimp genoemd. In feite is irreversibele krimp het laatste stukje rijping dat de grond ondergaat. Het zwel- en krimpproces heeft belangrijke praktische consequenties, zoals het snelle transport van water en opgeloste stoffen door krimpscheuren naar de ondergrond en de toename van het waterbergend vermogen van een bodem. De relatie tussen vochtgehalteveranderingen en volumeveranderingen van een kleigrond kan worden weergegeven in de krimpkarakteristiek, aangegeven in figuur 2.2. Bij krimp worden van nat naar droog vier krimpfasen onderscheiden: structurele krimp, normale krimp, restkrimp en nulkrimp. Bij structurele krimp lopen grote poriën zoals wormgangen en scheuren leeg. Het volume vocht neemt af zonder dat het volume van de grond afneemt. In de volgende fase, de normale krimp, nemen volume water en volume grond evenveel af. Dit houdt in dat de aggregaten volledig verzadigd blijven. De poriën in de aggregaten zijn zo klein dat de capillaire werking er voor zorgt dat er geen lucht in de aggregaten kan dringen. In de derde fase, de restkrimp, komt er lucht in de aggregaten. Het volume water neemt nu sneller af dan het volume van de grond. In de laatste fase, de nulkrimp, neemt het vochtgehalte nog iets af, zonder dat het volume van de grond nog kleiner wordt.



Figuur 2.2 Krimp karakteristiek van een kleigrond. V_{pore} = poriënvolume; V_{solid} = volume vaste delen; V_{water} = vochtvolume; e = poriënratio; v = vochtratio; α_{sh} ; β_{sh} en γ_{sh} zijn dimensieloze fitparameters. Wiskundige vergelijking naar Kim (1992).

De grootte van fase 2 hangt sterk van het lutumgehalte af. Hoe zwaarder de klei hoe kleiner de poriën en hoe groter fase 2 is. Enkele van de Nederlandse kleigronden behoren tot de sterkst krimpende gronden ter wereld. Tussen verzadiging en volledige uitdroging komen volumeafnames van bodemaggregaten voor tot maximaal 49 % (Bronswijk en Evers-Vermeer, 1990). Onder Nederlandse klimaatomstandigheden zullen de drukhoogtes van het bodemvocht in een kleigrond nagenoeg altijd tussen 0 en -16000 cm liggen. De volumeafname in dit traject is maximaal 42%, waarbij in de meeste kleigronden zowel normale krimp als restkrimp optreedt. In enkele zware kleigronden treedt alleen normale krimp op, dit betekent dat in het veld de bodemaggregaten het gehele jaar door verzadigd zijn. Alleen de interaggregaat poriën zoals krimp scheuren bevatten dan lucht. In hoeverre volumeafname van de bodematrix zichtbaar wordt als maaiveld daling of als scheurvorming wordt bepaald door de geometrie van het krimp proces. Het krimp proces in een zware kleigrond over de eerste meter diepte is in veel gevallen voor een groot deel isotroop. Of het krimp proces voor een groot deel isotroop is, hangt ook sterk af van de beworteling. Op een meter diepte is de gronddruk door het eigen gewicht ca. 15 kPa. Bij boomwortels of diep wortelende gewassen kan de vochtspanning op een diepte van een meter wel -1000 cm waterdruk zijn, overeenkomende met 100 kPa. Dan zijn de korrelspanningen in een volledig verzadigd aggregaat ook 100 kPa. De gronddruk van 15 kPa van de bovenliggende grond is dan relatief weinig en zal niet voldoende zijn om de scheuren dicht te drukken of om de isotropie van het krimp proces sterk te beïnvloeden. Bij een ondiep wortelend gewas, zoals gras, zal de grond op een meter diepte lang niet zo sterk uitdrogen en zal de vochtspanning niet voldoende zijn om te zorgen dat de krimp op die diepte volledig isotroop is.

Relatie wateronttrekking en krimp

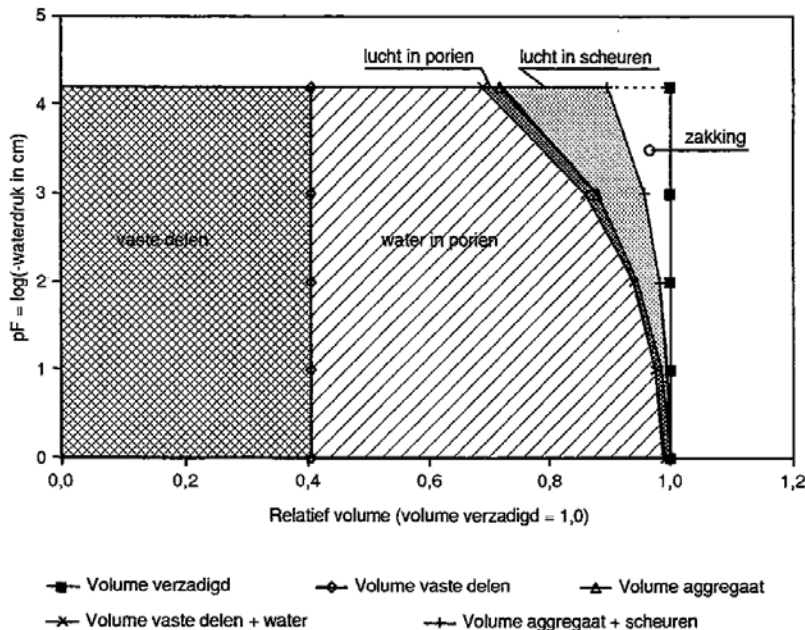
Of en hoeveel een grond of aggregaat krimpt door onttrekking van water door wortels hangt af van:

1. De hoeveelheid water die door de plant aan die grond kan worden onttrokken. Een grond kan wat dit betreft worden gekarakteriseerd door zijn waterretentie karakteristiek of zogenaamde pF-curve, waarmee het verband wordt gegeven tussen waterdruk en vochtgehalte.
2. De krimpeigenschappen van de grond. Deze zijn weer te geven in de krimp karakteristiek.

Zolang de krimp karakteristiek in figuur 2.2 parallel loopt met de $e = v$ - lijn, zijn alle poriën in de aggregaten met water gevuld en is het volume van de krimp gelijk aan het volume van de wateronttrekking. Voor kleigronden blijkt dit in hoge mate op te gaan. Een afwijking van de $e = v$ - lijn betekent dat er lucht in de aggregaten komt.

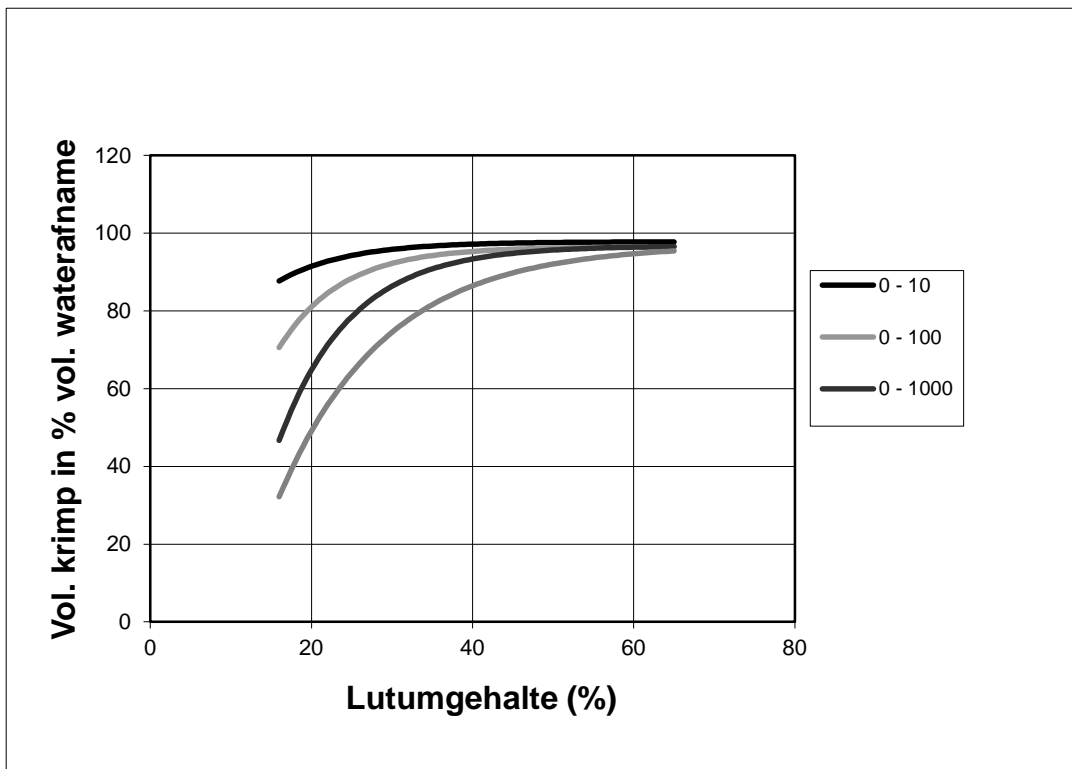
Uit de combinatie van waterretentiekarakteristiek en krimp karakteristiek volgt figuur 2.3. In deze figuur is voor een aggregaat van zware komklei (lutum 52%, organische stof 4%, zie bijlage 2 voor de

textuurklassen in de Nederlandse bodemkunde) het verloop van het volume van het aggregaat, het volume water en het volume lucht in en buiten het aggregaat gegeven als functie van de waterdruk (berekend uit metingen van Bronswijk en Evers-Vermeer, 1987 en 1990). Verder wordt voor isotrope krimp aangegeven welk deel van de krimp zich manifesteert in scheuren en welk deel in zakking. In de figuur is beginnende vanaf de Y-as en van links naar rechts gezien het aandeel in vaste delen, water en lucht in het volume gegeven. Achtereenvolgend zijn dit: de vaste delen, het water, de lucht in de aggregaten, de lucht in de scheuren en tot aan een relatief volume van 1 de lucht in de ruimte die door de zakking vrijkomt. In de zeer zware klei uit Bruchem komt, vanaf een waterdruk van -1000 cm ($pF = 3$) en lager, een langzaam groter wordend deel van het onttrokken water vrij door het gevuld raken van de poriën met lucht en dus een afnemend deel door volumeverkleining van het aggregaat. De metingen zijn uitgevoerd aan onbelaste kleikluitjes.

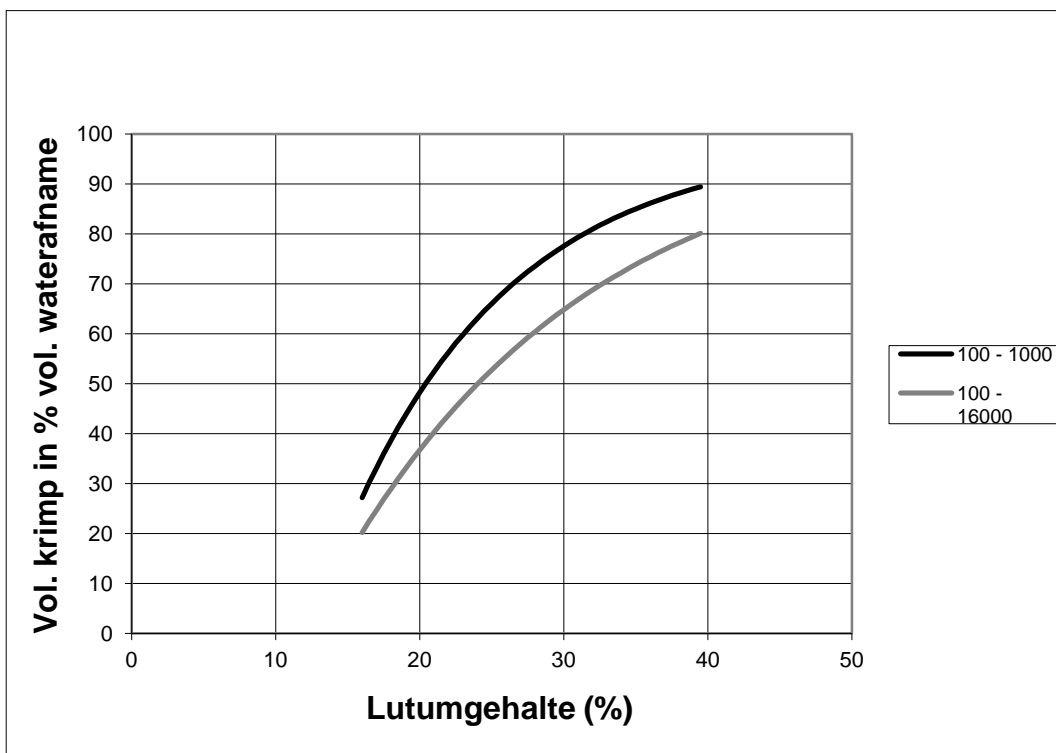


Figuur 2.3 Verdeling van het relatief volume in vaste delen, water en lucht in relatie tot de vochtspanning van een zeer zware klei uit Bruchem.

Om een indruk te krijgen over de grootte van de krimp en de wateronttrekking aan verschillende kleigronden is voor de serie gerijpte kleien, gegeven door Bronswijk en Vermeer (1987), de krimp en de wateronttrekking tussen een waterdruk van 0, -1000 en -16000 cm nader beschouwd. Een vochtspanning van -16000 cm waterdruk is het zogenaamde verwelkingspunt, waarbij plantenwortels geen vocht meer aan de grond kunnen onttrekken. Het lutumgehalte (in het onderzochte traject tussen de 18 en 65%) blijkt weinig invloed te hebben op de hoeveelheid water die wordt onttrokken bij daling van de waterdruk van 0 naar -1000 cm en naar -16000 cm (respectievelijk $0.1 \text{ m}^3/\text{m}^3$ en 0.25 tot $0.35 \text{ m}^3/\text{m}^3$). In figuur 2.4 is aangegeven welk deel van het waterverlies resulteert in krimp bij vochtspanningsverlagingen van 0 tot respectievelijk -10, -100, -1000 en -16000 cm waterdruk. Het lutumgehalte blijkt een grote invloed te hebben op de krimpeigenschappen van kleigrond. De krimp komt voor meer dan 90% overeen met de wateronttrekking bij een daling van de waterdruk van 0 naar -1000 cm in kleien met een lutumgehalte hoger dan ca. 35%. Bij lichtere klei komt een aanmerkelijk groter deel van het water vrij zonder dat dit resulteert in krimp doordat in de aggregaten lucht de plaats van het water gaat innemen. Bij verdere daling van de waterdruk tot -16000 cm blijft alleen in de kleien met een lutumgehalte $>45\%$ de krimp voor meer dan 90% gelijk aan het waterverlies.



Figuur 2.4 Volume krimp als percentage van de afname van het watervolume bij verlaging van de vochtspanning van 0 naar respectievelijk -10, -100, -1000 en -16000 cm waterdruk in relatie tot het lutumgehalte.



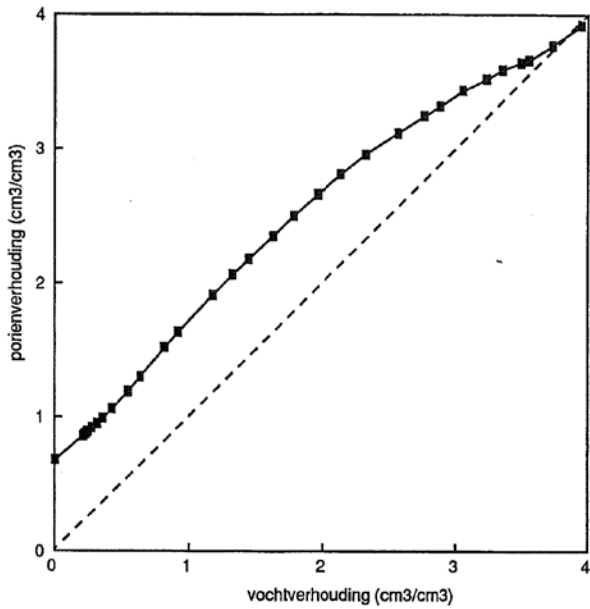
Figuur 2.5 Volume krimp als percentage van de afname van het watervolume bij verlaging van de vochtspanning van -100 tot respectievelijk -1000 en -16000 cm waterdruk in relatie tot het lutumgehalte.

In het algemeen is de beginvochtspanning echter niet 0 en/of wordt de grond door bovenliggende lagen belast. Een betere inschatting van het deel van het waterverlies dat in krimp wordt omgezet volgt dan uit figuur 2.5, waarin het waterverlies en de krimp bij een verlaging van de vochtspanning van -100 naar respectievelijk -1000 en -16000 cm waterdruk wordt beschouwd. Deze figuur geeft een goede indicatie van het deel van het waterverlies dat in krimp wordt omgezet bij sterke (tot -1000 cm waterdruk) en zeer sterke (tot -16000 cm waterdruk) uitdroging van kleigrond. Uit een vergelijking van de figuren 2.4 en 2.5 blijkt dat in het geval van een belaste kleigrond het percentage wateronttrekking dat in krimp wordt omgezet kleiner is dan in onbelaste toestand. Bij een zware klei met 50% lutum is dit echter nog steeds meer dan 90%. De gepresenteerde curven in de figuren 2.4 en 2.5 maken samen met een waterretentiekarakteristiek een schatting van maaiveldddaling en toename van het scheurvolumen door krimp door uitdroging mogelijk. Daarbij moet wel rekening worden gehouden met het feit dat met de diepte de geometriefactor van 3 naar 1 afneemt. Door Deltares wordt vaak een krimp van 0,3 - 0,6 maal het volume aan waterafname ingeschat. Dit is minder dan volgt uit figuur 2.5, maar is dan ook gebaseerd op monsters die initieel aanmerkelijk droger waren dan bij -100 cm waterdruk (persoonlijke mededeling H. de Bruijn).

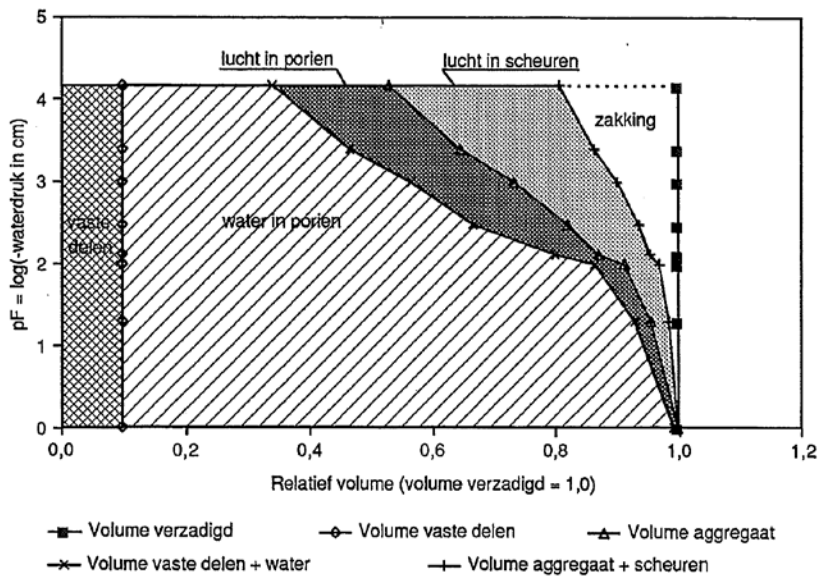
2.3 Krimp van veengronden

Van veengronden is het mogelijke waterverlies en krimp aanzienlijk hoger dan van kleigronden. Dit volgt uit de krimp-karakteristiek van een kleiige veengrond met 45% organische stof in figuur 2.6 en de verdeling van vaste delen, lucht en water tijdens het uitdrogen van een veengrond met 80% organische stof in figuur 2.7. Uit de krimp-karakteristiek in figuur 2.6 blijkt dat een opmerkelijk verschil met klei is, dat bij wateronttrekking uit verzadigd veen al snel lucht in de aggregaten komt. Dit betreft blijkbaar een aantal grote poriën in de aggregaten, want nadat deze zijn leeggetrokken komt bij deze kleiige veengrond het volume aan vochtonttrekking bijna overeen met het volume aan krimp. Deze conclusie kan worden getrokken uit het feit dat in figuur 2.6 de krimp-karakteristiek parallel gaat lopen aan de 45°-lijn (NB deze is gelijk aan de $e = v$ -lijn in figuur 2.2). Omdat in het traject met lage vochtspanningen in eerste instantie de grove poriën worden leeggetrokken, is de krimp van veen in dat stadium gering.

In figuur 2.7 blijkt voor een veengrond met 80% organische stof het traject waarin veel water aan het veen kan worden onttrokken, zonder dat zeer grote krimp optreedt (ca. 10% van het oorspronkelijke volume), te lopen tot een vochtspanning van -100 cm waterkolom. Daarna begint een traject waarbij het veen zeer veel water kan leveren waarbij ongeveer eenderde van het volume aangeleverde water wordt 'omgezet' in luchtgevulde poriën in de veenmatrix en ongeveer tweederde in scheurvolumen en maaiveldddaling. Bij zeer sterke uitdroging door wortels kan het veen tot een vochtspanning van -16000 cm waterkolom (pF 4.2) uitdrogen, waarbij het volume tot ca. 55% van het oorspronkelijke volume is gekrompen. Het volume aan scheuren en maaiveldddaling is dan 45%. Dit is ongeveer het dubbele van sterk uitgedroogde kleigrond (zie figuur 2.3). Veengrond droogt minder snel uit dan kleigrond en kan veel meer water leveren dan kleigrond. Als kleigrond al sterk is uitgedroogd en het gras gaat verdrogen blijft veengrond nog steeds water leveren en krimpen, blijft het gras water verdampen en worden maaiveldddaling en scheurvolumen steeds groter.



Figuur 2.6 Krimp karakteristiek van een kleilig veen te Zegveld, met organischestofgehalte van 45%.



Figuur 2.7 Verdeling van het relatief volume in vaste delen, water en lucht in relatie tot de vochtspanning van veen met 80% organische stof.

3 Scheurvorming door bomen

In dit hoofdstuk wordt specifiek ingegaan op de scheurvorming door bomen. Het hoofdstuk is gebaseerd op het Staring Centrum Rapport 318: Oorzaak en preventie van schade aan wegen door vochtonttrekking door bomen (Bakker et al., 1995). De schade aan wegen waaraan in dit rapport wordt gerefereerd komt precies overeen met de schade die op verschillende locaties door Delfland aan wegen en fietspaden op kades is geconstateerd. Het gaat in ieder geval om de locaties Noordkade Pijnacker - locatie 01; Polderkade in oud en Nieuw Wateringveldse polder - locatie 08; Boezemkade H en Z-polder langs de Vlaardingervaart - locatie 09.

Uit het onderzoek naar de schade aan wegen door Bakker et al. (1995) bleek de oorzaak van de schade ongelijkmatige maaiveld dalingen van vele centimeters te zijn. Bij de boom, tot op afstanden gelijk aan de boomhoogte, zakte het maaiveld tot meer dan 5 cm meer dan het maaiveld dat niet door de boom werd beïnvloed. De overgang op de grens tussen de twee maaiveldhoogten was abrupt en kenmerkte zich door een diepe, vaak brede scheur. De maaiveld dalingen werden veroorzaakt door vochtonttrekking aan (zware) klei en veen, die door sterk krimpen en voor een deel verder rijpen.

Verdamping door bomen

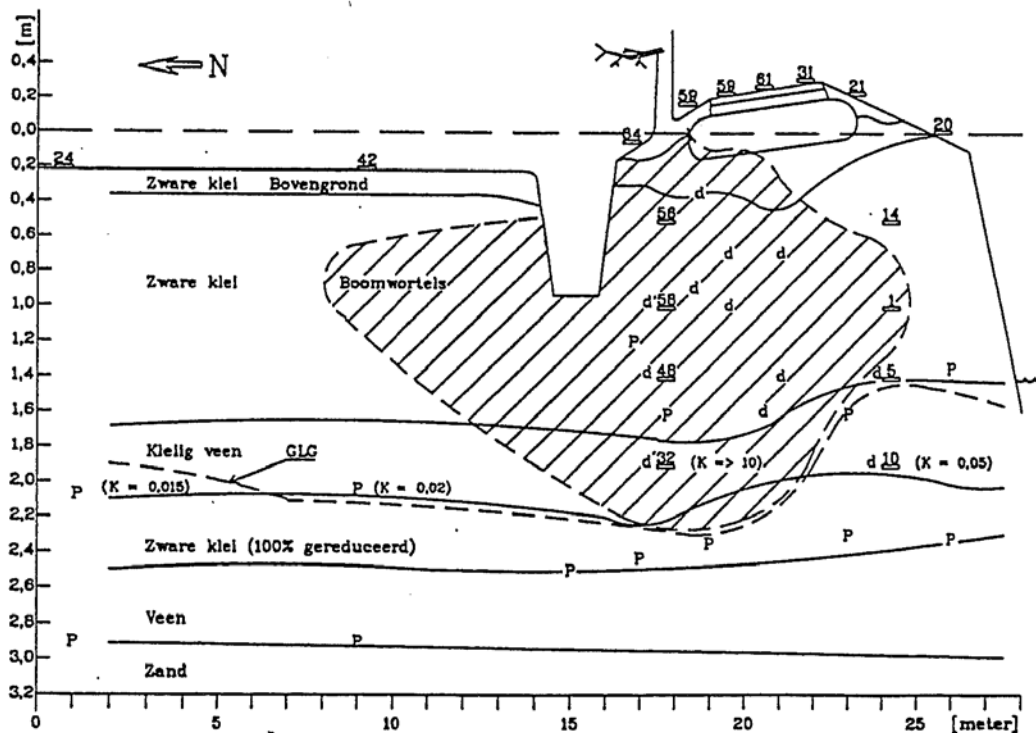
Bomen kunnen per oppervlakte grond waarop ze staan veel meer verdampen dan gras. De potentiële verdamping van gras is ca. 0,8 keer de open water verdamping, maar van solitaire bomen is dat ca. 1,4 tot 1,8 keer de open water verdamping (Bakker, 1992). Bovendien kan er onder alleenstaande bomen en bomen in een rij ook nog gras groeien, zodat nog meer water aan de grond wordt onttrokken. De omstandigheden voor het gras zijn wel slechter dan in een weiland, zodat de potentiële verdamping van het gras met 0,8 moet worden vermenigvuldigd. Al met al komt het er op neer dat bij solitaire bomen of bomen in een rij, waaronder gras groeit, de totale verdamping van bomen en gras per m² grondoppervlak 2,5 tot 3 keer zoveel is als van gras alleen. Uitgaande van de verdamping van een gemiddelde boom. Er zijn echter grote verschillen tussen bomen. Een schietwilg verdampt anderhalf maal meer water dan een gemiddelde boom, maar een acer platanoides (Noorse Esdoorn) verdampt slechts 0,6 m keer zoveel water. Voor deze verschillen in potentiële verdamping zijn meerdere oorzaken te noemen. Sommige boomsoorten hebben een lage potentiële verdamping doordat zij laat in blad komen of een gering bladoppervlak per eenheid van kroonoppervlak hebben (dus een open bladerdek). De vochtonttrekking en daarmee de drijvende kracht achter de krimp neemt daardoor af. Andere boomsoorten hebben een beperkte bewortelingsdiepte omdat de wortels slechts korte tijd onder de grondwaterstand kunnen overleven. Door de hogere grondwaterstanden in de winter sterven de diepere wortels af en blijft het wortelstelsel ondiep, waardoor enerzijds de potentiële vochtonttrekking afneemt en anderzijds potentieel sterk krimpende klei- en veenlagen die wat dieper liggen niet kunnen worden geëxploiteerd en uitgedroogd. Zeker is dat de populier en de wilg in zeer veel gevallen schade aan bijvoorbeeld funderingen en wegen veroorzaken tot afstanden gelijk aan de boomhoogte. Daarna volgen in schadelijkheid de eik, de iep en de es en daarna de kastanje, de robinia, de esdoorn, de plataan en de linde. De berk, de prunus, de appel en de peer veroorzaken relatief veel minder vaak schade en de schade is ook geringer.

Diepte en omvang van het wortelstelsel en daarmee de 'kluit'

Door Bakker et al. (1995) zijn een aantal oude kleidijken en wegen met schade door vochtonttrekking door bomen nader onderzocht. Als illustratie van de diepte en omvang van het wortelstelsel en de uitdroging gaan we nader in op de intensiefst onderzochte locatie. Dit gaat om de Hutstraat in Midden-Maasland, nabij Lith. Langs een gedeelte van een tertiaire weg op zware klei is éénzijdig een rij wilgen geplant met onderlinge afstanden van 8 meter. De bomen zijn relatief klein met een kroonddoorsnede van 5,5 meter. Per strekkende meter weg is dit dan 3 m² kroonoppervlak. Over de lengte van de weg is een scheur ontstaan. In september 1991 is een diepe profielkuil dwars op door weg gegraven. In figuur 3.1 zijn de resultaten van het onderzoek samengevat.

Aan de rechterzijde van de weg is een watervoerende sloot gesitueerd. De sloot aan de linkerkant is in de zomer droog. De klei bestaat uit een zware klei met meer dan 45% lutum. De dikte van de fundering van de weg plus het asfalt is ca. 45 cm. De bewortelingsdichtheid begint vanaf 3 meter uit de bomenrij af te nemen. Opvallend is een zeer hoge bewortelingsdichtheid boven en in de laag kleiig veen op 2 meter diepte. Daar waar geen scheuren zijn is de overgang van de zeer droge grond in de 'kluit' naar de zeer natte grond daarbuiten slechts enkele centimeters dik, dit duidt op een zeer lage onverzadigde doorlatendheid. De scheurbreedte in de zware klei is maximaal 4 cm en in het kleiige veen maximaal 8 cm. De scheuren ontstaan op de grens van gerijpte en minder gerijpte grond. Met het groter worden van de boom ontstaan nieuwe scheuren steeds verder van de boom. Onder oude, gerepareerde scheuren in het asfalt vindt men nog steeds openstaande oude scheuren tot op 2 meter diepte. Direct onder de wegfundering vindt men de oude bovenlaag met structurelementen van ca. 3 cm. In de laag daaronder worden structurelementen van ca. 30 x 30 cm gevonden. In de lengterichting vindt men onder de fundering op afstanden van ca. 1 meter scheuren dwars op de weg.

De horizontale doorlatendheid is gemeten met de boorgatenmethode. In de 'kluit' is de verzadigde doorlatendheid zeer hoog, meer dan 10 m/dag. Buiten de kluit is de doorlatendheid zeer laag, in de orde van enkele centimeters per dag (zie waarden (K) in figuur 3.1). De verticale doorlatendheid van de onderste veen- en kleilagen op 2,5 tot 3 m diepte is waarschijnlijk zeer laag. Door de lage doorlatendheden kan de toevoer van grondwater naar de kluit de onttrekking van water aan de kluit door verdamping van de boom niet bijhouden.



Figuur 3.1 Dwarsdoorsnede Hutstraat. P = eind filters peilbuizen; K = horizontale verzadigde doorlatendheid (m/dag) tussen 1,7 en 2,9 m diepte; d = locatie tensiometers; 56 = daling (mm) maaiveld of zakkaken ter plaatse tussen 2/7 tot 3/9/1991; GLG = Gemiddeld Laagste Grondwaterstand.

Hierdoor ontstaat onder de boom plaatselijk een ca. 80 cm diepe 'deuk' in het grondwater, dit maakt het voor de boom mogelijk om daar extra diep te wortelen en daar de laag kleiig veen te ontwateren. Het extra diep ontwateren door de wortels heeft extra grote zakkingen tot gevolg.

De in figuur 3.1 aangegeven zakkingen zijn ontstaan na 2 juli 1991 tot 3 september 1991. Het voorjaar van 1991 was vrij nat en de grondwaterstanden bleven tot 2 juli vrij hoog (op ca. 1,60 m onder de nullijn in figuur 3.1) en de deuk in de grondwaterstand onder de boom was nog maar 5 - 10 cm

diep. In het voorjaar lag de linkerrand van de weg 80 mm lager dan de rechterzijde. Aangenomen dat de weg oorspronkelijk horizontaal lag, betekent dit dat de permanente maaiveldval door rijping en permanente krimp onder de linkerrand van de weg 80 mm groter is dan onder de rechterrand van de weg. Uit een lengteprofiel van de weg, waarin ook gedeelten zonder bomen zijn opgenomen, valt op te maken dat de permanente zakking van de rechterrand van de weg 20 - 30 mm is. De linkerrand zou dan in het voorjaar een totale permanente zakking hebben gehad van 100 tot 110 mm, waar door de zomer van 1991 nog een extra zakking van 59 mm bovenop komt. Deze extra zakking is deels permanent (rijping) en deels reversibel (kan weer opzwellen). Opvallend is dat van deze 59 mm zakking er 31 mm ontstaan door rijping en krimp van de kleiige veen op een diepte van 1,70 - 2,20 m. De dikte van de gerijpte en gekrompen grond onder de wegfundering onder de linkerrand is ca. 2 m. Dit houdt in dat de permanente zakking door rijping in het voorjaar 1991 ca. 5% was en dat in de zomer daar ca. 3% aan extra zakking is bijgekomen. Als wordt uitgegaan van isotrope krimp en rijping, dan gelden deze waarden ook voor de horizontale richting en zou het volume scheuren ruwweg ook 5 tot 8% zijn. Hoe dit scheurvolumen zich verdeelt over kleinere en grotere scheuren is niet goed bekend. Zoals eerder aangegeven vormden zich in de zware klei pedons (kolommen) van ca. 30 x 30 cm en grotere scheuren op ca. 1 m afstand. De scheurbreedten zijn echter niet bekend. De scheurbreedte tussen de natte en droge klei op de grens van de kluit is wel opgemeten: deze was ca. 4 cm.

Geconcludeerd kan worden dat bomen een zeer grote invloed kunnen hebben op de zakking en scheurvorming in (zware) klei- en veengronden. De structuur van scheuren en scheurtjes blijft na nat worden en opzwellen bestaan en is grotendeels permanent en heeft een (zeer) hoge doorlatendheid. Het eventueel kappen van de boom leidt dus niet tot een terugkeer naar de lage waterdoorlatendheid van weleer. Tussen de wortelkluit met gerijpte en goed doorlatende grond en de sloot (of boezem) bevindt zich echter nog steeds onbewortelde grond met een veel lagere doorlatendheid. Deze grond moet de waterdichtheid van de kade waarborgen. Gaten of scheuren die een kortsluiting tussen het boezemwater en de wortelkluit vormen, moeten worden voorkomen.

4 Modellerings krimp scheuren

Zoals blijkt uit hoofdstuk 2 is de grootte van krimp scheuren afhankelijk van een vier factoren:

1. De aard van het materiaal, waarbij het vooral gaat om de hoeveelheid klei (lutum) en organische stof,
2. Het stadium waarin het materiaal verkeerd: gerijpt of ongerijpt,
3. De plaats van het materiaal in een bodem of dijk: hoe dieper, hoe groter de druk van bovenliggend materiaal en des te meer droogtekrimp wordt omgezet in verticale zakking en des te minder in horizontaal scheurvolumen. Deze toestand wordt weergegeven met de 'geometriefactor' van Rijniersce (r_s),
4. De waterspanning (negatief is zuigspanning) in de bodemmatrix die (mede) het vochtgehalte bepaalt.

Beschouwd over een periode van enkele jaren zijn factoren 1 tot en met 3 constant voor een dijk waarvan de opbouw niet wordt veranderd en waarvoor alleen gerijpt materiaal is gebruikt (zoals de voorschriften dicteren). Over langere tijd kan het organischestofgehalte van een veendijk verminderen door oxidatie (afbraak onder invloed van zuurstof). De eigenschappen van het materiaal in een dijk die deze drie factoren bepalen, moeten bekend zijn om een idee te krijgen van het volume van scheuren in dijken dat kan worden verklaard door krimp van het dijk materiaal.

De vierde factor, vochtgehalte afhankelijk van waterspanning, is hoogst variabel in een dijk die letterlijk wordt blootgesteld aan weer en wind. Van de ene kant wordt een dijk aan de buitenkant gevoed met water door neerslag en anderzijds wordt water aan de dijk onttrokken door bodemverdamping en vooral door gewasverdamping. Bij de eerste vorm van verdamping gaat het om de bovenste centimeter en bij de laatste onttrekken wortels actief water van een wat grotere diepte, afhankelijk van het gewas of de plant. In beide gevallen wordt water van onderaf aangevoerd door capillaire opstijging in het dijk materiaal. De aard van het materiaal is zeer bepalend voor de potentie van deze nalevering. De bron hiervan is het waterverzadigde dijk lichaam binnen in de dijk. Meestal voedt de boezem de dijk met water. Aangezien de peilfluctuaties in de boezem relatief gering zijn, zou hierdoor een min of meer constante freatische lijn (de scheidslijn tussen verzadigd en bovenliggend onverzadigd dijk lichaam) ontstaan.

Echter, aanvulling door neerslag en onttrekking door verdamping, zeer grillige processen in Nederland, maken de freatische lijn in de kade allesbehalve constant. Door het verloop van het neerslagoverschot gedurende de seizoenen is de overwegende jaarlijkse beweging van de freatische lijn: omhoog vanaf de herfst en omlaag vanaf het voorjaar. De diepste freatische lijn wordt meestal einde zomer bereikt, maar door de grilligheid van het weer niet altijd. Deze grilligheid en dan vooral die van de neerslag maken het voorspellen van de hoogste freatische lijn nog moeilijker.

Krimpscheuren ontstaan in het onverzadigde dijk lichaam. Het vochtgehalte daarin op enig moment wordt bepaald door:

- De voorgeschiedenis die zich uit in het initiële vochtgehalte en het bestaan van krimpscheuren;
- De hoeveelheid en de intensiteit van de neerslag;
- De infiltratie van neerslag en de percolatie daarvan naar het verzadigde dijk lichaam die worden bepaald door de doorlatendheid van het dijk materiaal, het bestaan van macroporiën als worm- en wortelgangen en krimp- en/of rijpingsscheuren, de helling van 'het maaiveld' die eventueel oppervlakkige afstroming kan bevorderen;
- De hoeveelheid verdamping, waarvoor de aard van het gewas en de diepte van de beworteling cruciaal zijn;
- De capillaire nalevering die sterk wordt bepaald door de onverzadigde doorlatendheid van het materiaal, het initiële vochtgehalte en de diepte van de freatische lijn.

Voorspellen van het vochtgehalte om krimpscheurvolumen te voorspellen, vereist daarom een inschatting van transport en berging van water vanuit de bepalende materiaaleigenschappen in een zeer dynamische omgeving. Een instrument dat de benodigde materiaaleigenschappen koppelt aan de relevante transport- en bergingsprocessen onder invloed van hoog-dynamische randvoorwaarden is het model SWAP (Soil-Water-Atmosphere-Plant). Dit is een dynamisch puntmodel voor de berekening van verticale waterstroming in de onverzadigde en verzadigde bodem, onder invloed van water aan- en -afvoerprocessen aan boven-, onder- en zijrand (drainage). Voor een gedetailleerde beschrijving van het model wordt verwezen naar Kroes et al. (2008) en Van Dam et al. (2008). SWAP kent een module om de krimp en de daaruit volgende verticale zakking en krimpscheuren te berekenen. Via de krimpscheuren kan neerslag preferent naar diepere bodemlagen stromen. Omdat de scheuren ook horizontaal met elkaar in verbinding staan, wordt ook in horizontale richting de waterdoorlatendheid in de gescheurde bovenlaag zeer groot.

Met SWAP is eerder gerekend aan dijken waarbij gebruik is gemaakt van de opties om het ontstaan van krimpscheuren en/of de versnelde afvoer van water door deze en andere macroporiën mee te simuleren:

- De infiltratiecapaciteit van de Waddenzeedijk, waarbij succesvol infiltratiemetingen voor overslagproeven zijn gesimuleerd in een dijklichaam van lichte klei met versnelde infiltratie door macroporiën (Hendriks et al., 2008);
- Kruindaling van veendijken als gevolg van reversibele krimp door uitdrogen van het veen door periodieke uitdroging als gevolg van grastranspiratie en bodemverdamping (niet gepubliceerd);
- Doorrekenen van effecten van beheerstrategieën van grasbedekking van veendijken op het vochtgehalte in de veendijken uit voornoemd gedachtestreepje (Oostindie et al., 2012).

Zoals elk model kent SWAP beperkingen. Voor deze studie die in wezen een driedimensionale werkelijkheid onderzoekt - de ontwikkeling van krimpscheuren in drie richtingen in een dijk - of in ieder geval een tweedimensionale - de ontwikkeling van een freatische lijn in het dijklichaam afhankelijk van neerslag en verdamping, en voeding vanuit de boezem - is dat in de eerste plaats het eendimensionale karakter van het model: SWAP beschrijft het verticaal watertransport in een bodemkolom onder invloed van randvoorwaarden aan drie randen (boven, onder en zij). Ook kent het model geen mechanistisch concept om volumekrimp in laterale richting te verdelen over verschillende krimpscheuren met verschillende breedten en diepten. Gezien het doel van de modellering met SWAP - het vaststellen van de grootte van het maximale scheurvolumen door krimp onder invloed van neerslag en verdamping, en gegeven een freatische lijn als onderrand - zijn deze beperkingen niet bezwaarlijk. Infiltratie van neerslag, gewastranspiratie en bodemverdamping, vochttransport in de onverzadigde en verzadigde zone, en via krimpscheuren, en de relatie vochtgehalte en krimp van de bodemmatrix worden wel realistisch beschreven.

Wel een beperking hierbij is dat SWAP een functionele beschrijving heeft van de verdeling van krimpvolume over verticale en horizontale krimp die wordt gestuurd door de functionele parameter 'geometriefactor' als functie van de diepte. De verdeling met de diepte is per rekenkolom vast in de tijd. Reden hiervoor en voor het ontbreken van een mechanistische beschrijving is kennis over het proces van ruimtelijke verdeling van de krimp en de dynamiek ervan. Nu is een aanname gedaan over het verloop in de diepte van de geometriefactor (zie 4.1).

De beperkingen van de berekeningen van de scheurvolumes is meer in de modellering dan in het conceptuele model gelegen. Onzekerheden zitten vooral in de invoerwaarden die de eigenschappen van de bodem-kolommen beschrijven en die de randvoorwaarden bepalen. Bodemfysische karakteristieken als hydraulische en krimp-karakteristieken waren voor de werkelijke dijken niet voorhanden. Daarom is gebruik gemaakt van pedotransferfuncties met als verklarende variabelen het organischestofgehalte en het lutumgehalte. Deze waren niet in (voldoende) detail (de resolutie in de diepte) bekend vanuit de profielbeschrijvingen en de monsteranalyses. Daarom zijn hierover veel aannames gedaan. Van de randvoorwaarden was vooral de positie van de freatische lijn in de diepte en in de tijd zeer beperkt bekend. Dat heeft geleid tot een aantal scenario's voor het talud met aangenomen freatische lijnen tijdens de droge periode. Ook was van het grasbeheer niet de actuele situatie bekend, waardoor is gewerkt met algemene vormen van beheer en de vertaling naar invoer-

waarden hiervoor. Tenslotte was niets bekend over de versnelde afvoer via krimpscheuren van water. Aangenomen is dat die wel optreedt.

De genoemde beperkingen hebben ons inziens een realistisch beeld van de ontwikkeling van krimp-scheur-volume onder verschillende omstandigheden niet in de weg gestaan. Het is wel duidelijk geworden welk realis-tisch volume aan scheuren kan ontstaan onder verschillende omstandigheden. In algemene zin hebben de aan-namen die zijn gedaan om onzekerheden te elimineren, geleid tot een 'worst-case'-beschrijving van de realiteit.

In deze studie is gebruik gemaakt van SWAP-versie 3.2.37 met enkele specifieke aanpassingen voor de beschrijving van de geometriefactor als functie van de diepte en voor de uitvoer van scheurbreedte en verticale krimp.

4.1 Methoden

Doorgerekende dijken

Eerst is een modellering van 'theoretische dijken' uitgevoerd waarin het gedrag van verschillend dijk-materiaal is onderzocht. Doel was vooral het onderzoeken van het scheurgedrag van de dijk-materialen onder zeer droge omstandigheden om daarmee maximale scheurbreedten vast te stellen. Het gaat om vier dijken met ieder één van de volgende materialen (zie bijlage 2 voor de textuur-indeling in de Nederlandse bodemkunde):

1. Lichte klei, vallend in TAW categorie 3.
2. Middelzware klei, vallend in TAW categorie 2.
3. Zware klei, vallend in TAW categorie 1.
4. Veen.

Vervolgens zijn twee door het hoogheemraadschap geselecteerde dijken doorgerekend. De dijken zijn gekozen op basis van waarnemingen van grote scheuren in het droge voorjaar van 2011 en het bekend zijn van een aantal kenmerken van de dijk en de eigenschappen van het materiaal. Doel was vooral het onderzoeken van de breedte van krimpscheuren onder werkelijke omstandigheden om deze te kunnen vergelijken met gemeten scheurbreedten, en zo het mogelijke aandeel van krimp in de gemeten scheuren vast te kunnen stellen. Het gaat om:

1. Locatie 98, een dijk in de Duifpolder.
2. Locatie 99, een dijk in de polder Schieveen.

De derde geselecteerde dijk in de Duifpolder (Locatie 03) is niet doorgerekend omdat deze, op basis van de beschikbare gegevens, wat betreft eigenschappen sterk leek op Locatie 98 en daarom geen aanvullende inzichten zou opleveren.

Modelopzet en -invoer

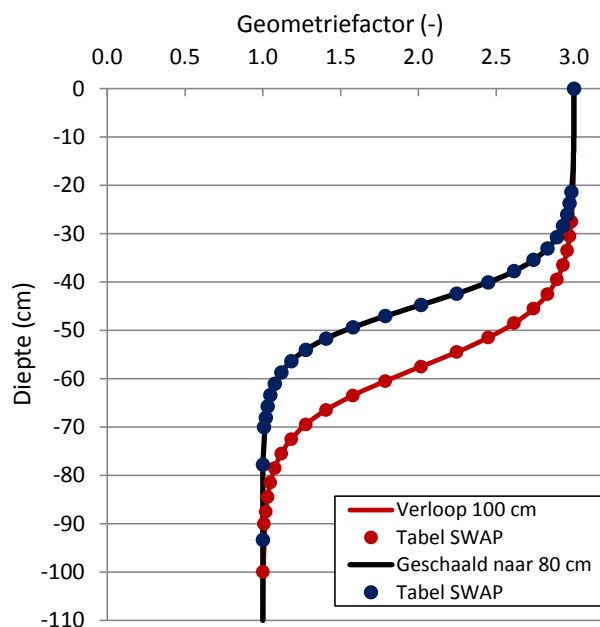
Voor de dijken zijn op grond van een profielbeschrijving en de genomen monsters SWAP-kolommen gebouwd. Eigenschappen als hydraulische karakteristieken en krimp-karakteristieken zijn verkregen door meetgegevens van bestaande monsters uit andere onderzoeken te nemen, waar beschikbaar zoveel mogelijk van dijken. De keuze van de monsters is gedaan op basis van de gemeten parameters/grootheden (zie bijlage 3.3): de gehalten aan lutum en organische stof, de volumieke dichtheid en de porositeit. Waar deze parameters ontbraken is uitgegaan van de kwalitatieve beschrijving in de boorstaten en expert judgement.

Een aantal belangrijke invoergegevens van SWAP zijn gemeten in andere studies: de hydraulische karakteristieken als waterretentiekarakteristiek en doorlatendheidskarakteristiek en de krimp-karakteristieken. Deze zijn gegeven in bijlage 1 'Krimp-karakteristieken'.

Niet alle invoergegevens van het model waren bekend uit metingen. Voor een aantal hiervan zijn aannamen gedaan op basis van expertervaring en -kennis opgedaan in andere onderzoeken. Dit zijn parameters voor de beschrijving van de geometrie van en de stroming in en door macroporiën (poriën > 100 µm) die op grond van de modellering van de Waddenzeedijk en berekeningen voor een veen-

weide in Zegveld zijn ingeschat. Een belangrijke parameter voor het simuleren van scheurbreedten is de geometriefactor die bepaalt voor welk deel krimpvolume leidt tot scheurvolumen: bij een geometriefactor van 3 is de krimp isotroop, oftewel in alle richtingen gelijk, en leidt de krimp tot een maximaal scheurvolumen, bij een geometriefactor van 1 is de krimp alleen verticaal en treedt geen scheurvorming op. Het verloop van de geometriefactor over de diepte was ook niet goed bekend vanuit de literatuur.

In de kruindalingsstudie voor veendijken is het verloop van de geometriefactor over de diepte gekalibreerd op de gemeten maaiveldvaling door reversibele krimp in een veenweideperceel in Zegveld. Hieruit is de geometriefactor als functie van de diepte voor deze studie afgeleid. De functie is beschreven met een sigmoïde kromme (S-vormige lijn) die van maaiveld tot 30 cm diepte nagenoeg de waarde 3 heeft en op 90 cm diepte de waarde 1 (figuur 4.1). Deze vorm van het diepteverloop van de geometriefactor geldt voor een opgelegde freatische lijn van 100 cm diepte (deze geldt voor de kruin van locatie 98). Verondersteld is dat tot op 10 cm boven de verzadigde zone de vol-capillaire zone heerst en dat voor die zone en dieper de geometriefactor 1 is. Voor ondiepere opgelegde freatische lijnen is de S-vorm geschaald naar de diepte van de freatische lijn plus 10 cm, zoals in het voorbeeld van figuur 4.1 voor een freatische lijn van 80 cm diep.



Figuur 4.1 Geometriefactor r_s als functie van de diepte zoals toegepast in de modellering. Het verloop met de diepte voor een freatische lijn van 100 cm diep is de basisvorm. Voor andere diepten is de vorm geschaald zoals in het figuur voor 80 cm diep. De bolletjes geven de waarden aan die als tabel in SWAP zijn ingevoerd.

Gewasparameters

Een aparte groep van invoer is het 'gewas', het gras dat op de dijk groeit. Hiervoor zijn algemene (default) waarden gebruikt voor algemene kenmerken en specifieke waarden voor bepalende parameters waarover aannamen gedaan zijn bij de theoretische dijken en die gemeten zijn (zie bijlage 3.1) of ingeschat uit expertkennis bij de werkelijke dijken. De gewasparameters zijn vooral het verloop in de tijd van de LAI (leaf area index) die een bedekkingsgraad uitdrukt, en het verloop in diepte en tijd van de wortelmasse. Het verloop in de tijd van de LAI weerspiegelt het beheer van de grasmat.

Meteorologische gegevens

Een andere belangrijke groep van invoer is de meteorologie: neerslaghoeveelheid en -duur (waaruit de intensiteit wordt berekend) en gegevens nodig voor de berekening van de verdamping. Gerekend is

met de verdampingsmethode volgens Penman-Monteith. Omdat het om verschijnselen gaat die samenhangen met droogte zijn voor de theoretische dijken twee droge jaren doorgerekend: het zeer droge jaar 1976 en het droge jaar 2003. Voor de werkelijke dijken zijn in 2011 waarnemingen aan scheuren gedaan. Daarom is voor de analyse van de werkelijk dijken het jaar 2011 doorgerekend, een jaar met een droog voorjaar. Ter vergelijking is ook het jaar 1976 doorgerekend. Voor de theoretische dijken zijn de weergegevens betrokken van KNMI-weerstation De Bilt, voor de werkelijke dijken van weerstation Rotterdam. Van dit station waren geen gegevens bekend van de globale straling in 1976. Deze zijn daarom van De Bilt genomen.

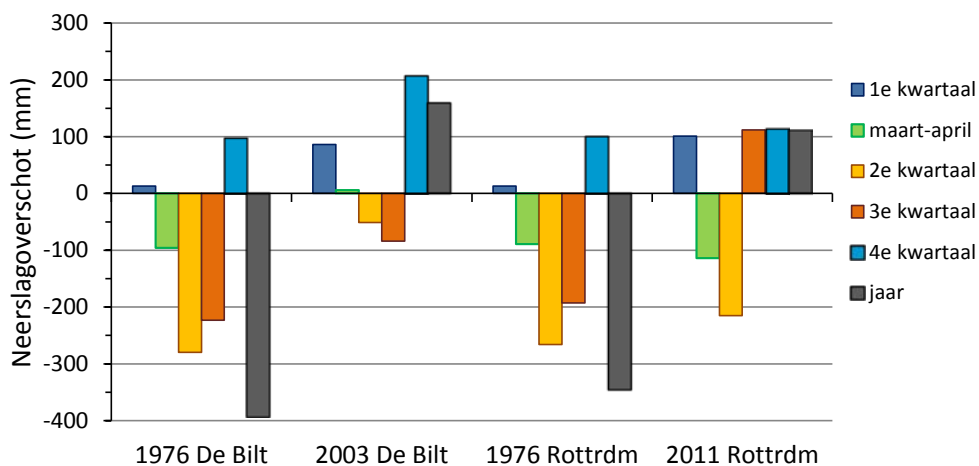
Tabel 4.1 geeft een overzicht van de waarden van kernparameters voor de vier doorgerekende weerjaren per kwartaal en voor het gehele jaar. Tevens zijn de waarden van deze parameters gegeven voor de periode maart-april. Deze periode is getoond om het droge voorjaar van 2011 te illustreren in vergelijking met 1976-Rotterdam. De periode maart-april betreft de eerste twee maanden van het groeiseizoen van dijkgras (mondelijke mededeling Joep Frissel) die vallen voor 1 mei, de veronderstelde eerste peildatum van scheurbreedten in het veld, en daarmee uitvoerdatum van de modelresultaten (zie 4.2).

Tabel 4.1

Waarden van meteorologische parameters van de vier doorgerekende weerjaren als neerslag P , potentiële evapotranspiratie ET en het neerslagoverschot als $P - ET$, alle in mm. De waarden zijn gegeven voor de vier kwartalen, het gehele jaar en voor de periode maart-april, de eerste twee maanden van de grasgroei.

Kwartaal	De Bilt meteorologie						Rotterdam meteorologie					
	1976 zeer droog			2003 droog			1976 zeer droog			2011 droog voorjaar		
	P	ET	P - ET	P	ET	P - ET	P	ET	P - ET	P	ET	P - ET
1	115	103	13	152	66	86	100	87	13	188	88	101
2	66	346	-280	173	224	-51	52	318	-266	121	336	-215
3	113	336	-223	127	210	-84	136	329	-193	393	282	112
4	183	85	98	255	48	207	196	95	101	221	107	114
Totaal	478	870	-393	707	547	159	483	828	-345	923	812	111
Maart-april	35	131	-96	101	95	6	26	115	-89	25	139	-114

Figuur 4.2 illustreert het neerslagoverschot voor de zes tijdsperioden van de vier jaren uit tabel 4.1. Te zien is dat op jaarbasis 1976-De Bilt het droogste jaar is met het kleinste neerslagoverschot of eigenlijk het grootste neerslagtekort, 12% droger dan 1976-Rotterdam. 2003 heeft het natste voorjaar maar een drogere zomer dan die van 2011, die dan ook zeer nat is met een positief neerslagoverschot van 112 mm. De maanden maart-april hebben het grootste neerslagtekort in 2011: 25 mm meer dan 1976-Rotterdam.



Figuur 4.2 Neerslagoverschot voor zes tijdsperioden in de vier doorgerekende weerjaren.

4.1.1 Theoretische dijken

Bij de berekeningen van de theoretische dijken is aangesloten op de studie voor de STOWA naar verticale kruindaling als gevolg van reversibele krimp door periodieke uitdroging als gevolg van grastranspiratie en bodemverdamping. In deze studie ging het om het vaststellen van 'worst case' scenario's en daarom is gerekend voor de twee zeer droge weerjaren 1976 en 2003. Deze jaren zijn bij de onderhavige berekeningen naar krimpscheuren aangehouden.

Ook aangehouden van de kruindalingstudie zijn waarden van andere sterk bepalende parameters voor het vochtgehalte in dijken: de gewasparameters. Drie belangrijke gewasparameters zijn op waarden gezet die een maximale vochtonttrekking door het gewas garanderen. Dit is ook gedaan met het oog op het creëren van een 'worst case'. Aanname hierbij was dat gras in krimpende bodems diep kan wortelen in scheuren en daardoor van grote diepte water uit de bodem kan onttrekken, een verschijnsel bekend vanuit de literatuur. De worteldiepte is daarom afhankelijk van de diepte van de freatische lijn op 45-55 cm gezet en de parameter die de compensatie voor droogtestress in de uitgedroogde bovengrond door diepere wortels in vochtigere lagen bepaalt op de maximale waarde van 90% compensatie. Verder is de LAI vastgezet op 3, een hoge waarde die overeenkomt met het gemiddelde van goed van water en voedingsstoffen voorzien cultuurgras.

Voor de berekeningen zijn per dijkmateriaal - klei van categorie 1-3 en veen - vier bodemkolommen opgesteld van wisselende lengte in de diepte. De lengte werd bepaald door de diepte van de freatische lijn. De diepte van de freatische lijn bepaalt de dikte van de onverzadigde zone waartoe de krimp beperkt blijft. De beschouwde freatische lijnen zijn 60, 90, 120 en 150 cm diep en hebben een bijbehorende kolomlengte (figuur 4.3). In de berekeningen is de diepste freatische lijn vastgehouden op de gegeven diepte, oftewel aangenomen is dat deze diepste freatische lijn wordt gehandhaafd door een voortdurende toestroom van water vanuit de boezem die de capillaire opstijging volledig compenseert. De geometriefactor r_s (in figuur 4.3 aangegeven als r) is bij veen per laag gelijk gesteld en in figuur 4.3 aangegeven. Voor klei is de S-curve in figuur 4.1 aangehouden.

Tabel 4.2 geeft de belangrijkste kenmerken van de vier beschouwde dijkmaterialen en de bronnen waarvan hun eigenschappen zijn verkregen. De krimpkenmerken zijn gegeven in bijlage 1. 'Krimpkenmerken'.

Tabel 4.2

Gebruikte dijkmaterialen, hun lutum- en organischestofgehalten, hun bronnen van de belangrijke eigenschappen voor de modellering met SWAP van de 'theoretische dijken' (hydraulische karakteristieken = waterretentie- en doorlatendheidskarakteristiek).

Dijkmateriaal		Lutum (mas-% mineraal)	Organische stof (mas-% droge stof)	Bronnen eigenschappen	
				Krimp	Hydraulische karakterist.
Klei categ. 1	Zwaar	57	4,7	meting	meting: Waardenburg ¹
Klei categ. 2	Middel	35	1,0	meting	meting: Andelst ²
Klei categ. 3	Licht	20	4,1	pedotransf.	meting: Lekdijk Bergamb. ³
Veen Middelburgse kade ^{4, 5}					
	diepte (cm)	Lutum ⁵	Organische stof ⁴		
horiz. 1	0-30	13	43,2	meting ⁴	meting ⁴
horiz. 2	30-60	18	40,3	meting ⁴	meting ⁴
horiz. 3	60-90	21	38,1	meting ⁴	meting ⁴
horiz. 4	90 ->	21	45,1	meting ⁴	meting ⁴

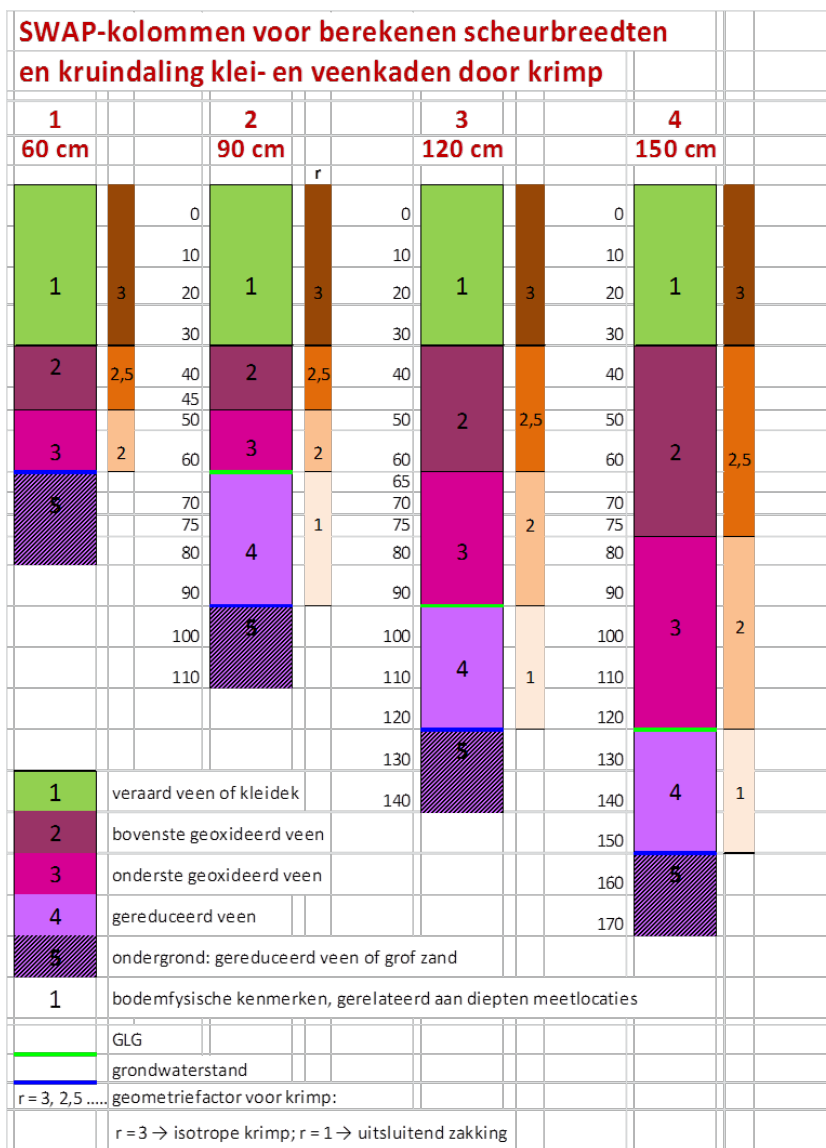
¹ Van der Salm et al. (2006);

² Smelt et al. (2003);

³ Akker, 2001;

⁴ Pleijter en Van den Akker, 2005;

⁵ Grontmij, 2002.



Figuur 4.3 Schematisering van de doorgerekende klei- en veenprofielen met verschillende diepten van de freatische lijn (grondwaterstanden). Bij de kleiprofielen bestaat het gehele profiel uit dezelfde kleisoort met gelijke eigenschappen over het gehele profiel. Voor de geometriefactor is bij klei de S-curve in figuur 4.1 gebruikt.

4.1.2 Werkelijke dijken

Voor beide dijken zijn drie posities doorgerekend: op de kruin, op het talud en aan de teen. Omdat hierbij net als bij de theoretische dijken de opgelegde freatische lijn sterk bepalend is voor de modelresultaten en deze voor het talud nogal onzeker was, zijn twee varianten voor het talud doorgerekend: freatische lijn 100 cm lager en een 50 cm hoger dan die van de kruin (tabel 4.3). Deze twee varianten kunnen ook worden beschouwd als twee verschillende posities hoog of laag op het talud. De diepten van de freatische lijnen waren niet in detail bekend. Bij gebrek aan actuele en lokale informatie zijn ze afgeleid van peilbuiswaarnemingen op locatie 98 in de periode eind mei-begin juli 2008 van Lankelma (zie Duifpolder_Lankelma, pagina 73 - 77) (2008) en Van Mos (2008). Hieruit is een globaal beeld verkregen van de hoogte van de freatische lijn onder droge omstandigheden op kruin, het talud en aan de teen (tabel 4.3). Wel waren gegevens beschikbaar van verschillende buizen uit verschillende onderzoeken (bv. PRS/BCC, Hoogheemraadschap van Delfland, 2008), maar dat bleken na bestudering stijghoogten te zijn van dieper water in plaats van freatische waterstanden. Omdat er in het algemeen een verschil in stijghoogte is tussen filters op verschillende diepten, waren deze gegevens niet bruikbaar.

Tabel 4.3

Diepten (cm) van de freatische lijn ten opzichte van het plaatselijke maaiveld in de droge periode van de vier posities op de twee dijken.

Dijk	Kruin	Talud -100	Talud +50	Teen
Locatie 98	100	200	50	80
Locatie 99	110	210	60	60

Anders dan bij de theoretische dijken is bij de werkelijke dijken zo goed mogelijk de werkelijkheid benaderd en niet een 'worst case' nagestreefd. Dat is gedaan door de profielopbouw te baseren op de boorbeschrijvingen van de uitgevoerde boorprofielen en de materiaaleigenschappen op de analyses van de grondmonsters (Mos, 2013). Relevante beschikbare analyseresultaten waren lutum- en organischestofgehalten, natte en droge volumieke massa en watergehalte. Hiermee is een poriëngehalte berekend. Deze informatie was per dijk beperkt tot de kruin, waar monsters zijn genomen op twee diepten, namelijk van 10 - 40 cm en 50 - 87 cm diepte bij Locatie 98 en van 10 - 41 cm en 50 - 85 cm diepte bij Locatie 99. Bij Locatie 98 was het organischestofgehalte van het bovenste monster 4,7% en dat van het onderste monster 4,2%. Het lutumgehalte van beide monsters was ca. 21%. Bij Locatie 99 was het organischestofgehalte van het bovenste monster 4,3% en dat van het onderste monster 3,6%. Het lutumgehalte van beide monsters was circa 24%.

De hydraulische karakteristieken zijn genomen van monsters uit andere onderzoeken die op grond van lutum- en organischestofgehalten overeenkwamen (tabel 4.4). Voor de lagen boven, tussen en onder de twee bemonsterde lagen zijn op grond van de boorbeschrijvingen keuzen gemaakt voor de aard van het materiaal. Voor de zware klei in de ondergrond is Staringreeks Bouwsteen O12 genomen (Wösten et al., 2001).

Krimp karakteristieken voor klei zijn bepaald met een pedotransferfunctie met lutum- en organische stofgehalte als verklarende variabelen, die is opgesteld voor een studie waarin de Nederlandse kleigronden zijn doorgerekend met SWAP voor de uitspoeling van pesticiden via krimpscheuren (Tiktak et al., 2010).

Een gemis kan zijn dat bij de 'werkelijke dijken' geen echte veendijk wordt gemodelleerd. Dit wordt echter ondervangen doordat bij de 'theoretische dijken' de veendijk een werkelijke dijk is, namelijk de Middelburgsekade. De grote bewortelingsdiepte van 45 - 55 cm die bij deze veendijk is aangehouden is niet onrealistisch. Bij de veendijk in Wilnis zijn dergelijke waarden voor de bewortelingsdiepte ter plekke vastgesteld.

Tabel 4.4

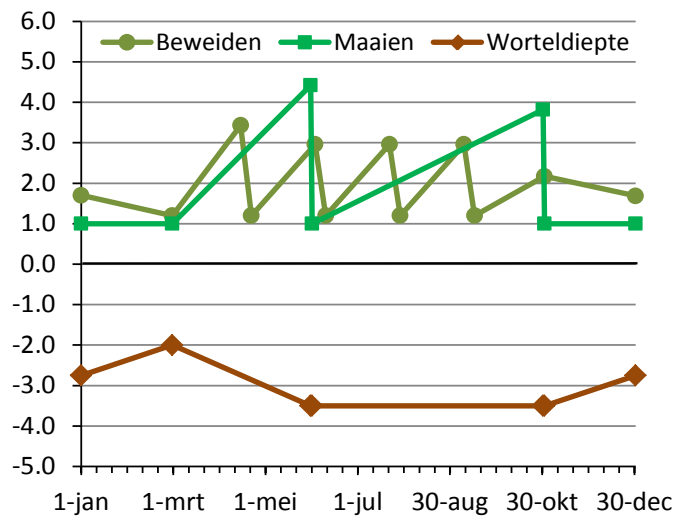
Gebruikte vier dijkmaterialen en hun lutum- en organischestofgehalten, en hun bronnen van de belangrijke eigenschappen voor de modellering met SWAP van de 'werkelijke dijken' (hydraulische karakteristieken = waterretentie- en doorlatendheidskarakteristiek).

Kade		Lutum	Organische stof	Bronnen eigenschappen	
Laag/diepte		(mas-% mineraal)	(mas-% droge stof)	Hydraulische karakteristiek	
98 kruin/talud					
1.	0-10	Wortelzone 1	17	4.3	Lekdijk (Van den Akker, 2001)
3.	10-40	Wortelzone 2	17	4.3	Lekdijk (Van den Akker, 2001)
4.	40-50		25	4.0	Lekdijk (Van den Akker, 2001)
5.	50-90		40	3.6	Andelst (Smelt et al., 2003)
6.	90-140		50	1	O12 Staringreeks (Wösten et al., 2001)
99 kruin/talud					
1.	0-10	Wortelzone 1	35	4.3	Lekdijk (Van den Akker, 2001)
2.	10-30	Wortelzone 2	25	4.3	Lekdijk (Van den Akker, 2001)
3.	30-50		25	4.3	Lekdijk (Van den Akker, 2001)
4.	50-100		26	3.6	Andelst (Smelt et al., 2003)
5.	100-150		50	1	O12 Staringreeks (Wösten et al., 2001)

Tabel 4.5

Verloop in de tijd van de LAI ($m^2 m^{-2}$) van de grasbedekking van de dijken bij beweiden en maaien, en van de worteldiepte (cm).

Beweiden		Maaien		Worteldiepte
1 jan.	1,70	1 jan.	1,00	27,5
1 maart	1,20	1 maart	1,00	20,0
15 april	3,43			
22 april	1,20	31 mei	4,42	35,0
3 juni	2,96	1 juni	1,00	35,0
10 juni	1,20			
22 juli	2,96			
29 juli	1,20			
9 sept.	2,96			
16 sept.	1,20	31 okt.	3,82	35,0
1 nov.	2,17	1 nov.	1,00	35,0
31 dec.	1,69	31 dec.	1,00	27,5



Figuur 4.4 Boven: verloop in de tijd van de LAI ($m^2 m^{-2}$) bij beweiden en maaien. Onder: verloop van de worteldiepte (dm) in de tijd.

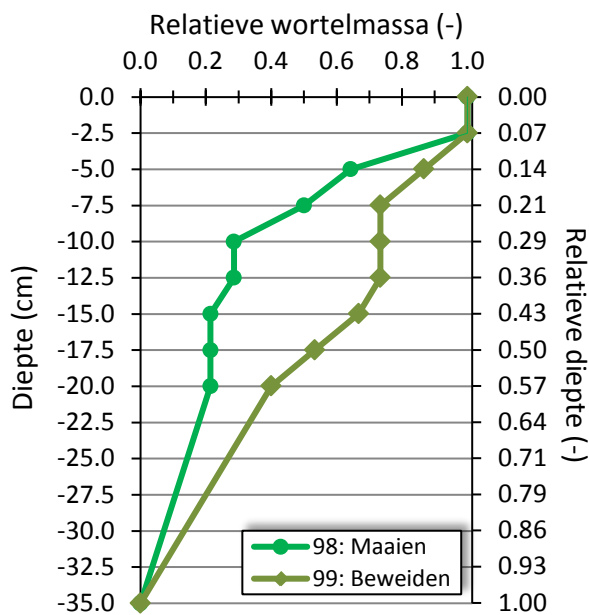
Een belangrijk aspect van de modellering van de werkelijkheid was de beschrijving van de grasbedekking conform de werkelijkheid. Uit onderzoek van de plantensamenstelling op beide dijken en op grond van andere aanwijzingen werd duidelijk dat op Locatie 98 het gras werd gemaaid en op Locatie 99 beweiden (zie bijlage 3, verslag Joep Frissel). Dit heeft consequenties voor het verloop van de LAI in de tijd. Op basis van de algemene kennis van Joep Frissel over de begroeiing van dijken en het beheer daarvan is de beschrijving van de LAI in de tijd voor beide beheerstrategieën opgenomen zoals weergegeven in tabel 4.5. De indeling is onder andere gebaseerd op een groeiseizoen dat begint op 1 maart en eindigt op 1 november.

Een ander belangrijk aspect van de grasbedekking is het verloop van de worteldiepte in de tijd en het verloop van de wortelmassa met de diepte. In de veldwaarnemingen op beide dijken is vast komen te staan dat de worteldiepte minimaal 30 cm is maar dat na 20 cm diepte de massa heel snel afneemt (zie bijlage 3). Daarom is een maximale worteldiepte van 35 cm aangehouden voor beide dijken. Tabel 4.6 geeft de verdeling van de massa met de diepte. SWAP interpoleert lineair tussen de gegeven waarden.

Tabel 4.6

Verloop met de diepte van de relatieve wortelmasse voor de twee dijken. Omdat de worteldiepte verloopt met de tijd zijn de absolute waarden van de worteldiepte slechts een voorbeeld, namelijk die van de situatie met maximale worteldiepte.

Worteldiepte		Relatieve wortelmasse (-)	
Absoluut (cm)	Relatief (-)	Locatie 98	Locatie 99
0,0	0,000	1,000	1,000
2,5	0,071	1,000	1,000
5,0	0,143	0,643	0,867
7,5	0,214	0,500	0,733
10,0	0,286	0,286	0,733
12,5	0,357	0,286	0,733
15,0	0,429	0,214	0,667
17,5	0,500	0,214	0,533
20,0	0,571	0,214	0,400
35,0	1,000	0,000	0,000



Figuur 4.5 Verloop met de diepte van de relatieve wortel-massa voor de twee dijken met beheer maaien en beweiden.

Het verloop in de tijd van de worteldiepte is bij beide dijken: 20 cm op 1 maart, 35 cm op 1 juni tot 1 november, waarna de wortels afsterven en de diepte afneemt tot 20 cm op 1 maart van het volgend jaar. Tussen deze waarden interpoleert SWAP lineair.

4.1.3 Invloed van hellingshoek en expositie ten opzichte van de zon

Het vermoeden bestaat dat een zuidelijke helling aanmerkelijk meer en eerder zal uitdrogen dan een horizontaal oppervlak. Voor een helling op het noorden geldt juist het omgekeerde. Bij inspectie van klei- en veenkades zou hier dan uitdrukkelijk rekening mee moeten worden gehouden. In deze paragraaf wordt om deze reden hierop ingegaan.

Bartholomeus (2004) heeft met SWAP de effecten van een oppervlak onder een helling in combinatie met de expositie van die helling ten opzichte van de zon berekend voor potentiële en actuele verdamping van gras. Daarvoor heeft hij een nieuwe module in SWAP ingebouwd. Daarbij heeft hij de expositie ten opzichte van de zon uitgedrukt in de windstreken zuid (Z), zuidoost (ZO), oost (O), noordoost (NO) en noord (N). Hij beredeneert dat in zijn methodiek zuidwest gelijk is aan zuidoost en noordwest gelijk is aan noordoost. Hij geeft onder andere een tabel met berekende potentiële

verdamping in de zomer voor de combinatie van de hellingshoeken 15, 30 en 45 graden en de bovengenoemde vijf windstreken. Uit deze tabel blijkt dat voor alle hoeken de windstreek oost overeenkomt met een helling van 0 graden of een vlak terrein. Op basis van dat gegeven zijn de vermenigvuldigingsfactoren voor potentiële verdamping van tabel 4.7 berekend. Deze factoren zijn gebruikt om een aantal combinaties van hellingshoek en windstreek voor de werkelijke dijken door te rekenen. Hierbij is de door SWAP berekende potentiële verdamping steeds vermenigvuldigd met de betreffende factor.

Tabel 4.7

Vermenigvuldigingsfactoren voor potentiële verdamping afgeleid uit Bartholomeus (2004). De factoren voor west, zuidwest en noordwest komen overeen met die van respectievelijk oost, zuidoost en noordoost.

Oriëntatie Windstreek	Hellingshoek		
	15°	30°	45°
Z	1,04	1,04	1,04
ZO	1,03	1,05	1,04
O	1,00	1,00	1,00
NO	0,96	0,91	0,89
N	0,95	0,86	0,84

Het blijkt dat bij een oriëntatie van de helling op oost bij alle hoeken resulteert in een factor 1. Oost komt dus overeen met een horizontaal vlak en kan dienen als referentie. Bij de oriëntaties noord en noordoost heeft een steilere hellingshoek een vrij grote invloed. Bij Zuid heeft een steilere hellingshoek geen invloed en bij zuidoost een beperkte invloed. De factoren zijn bij zuid en zuidoost bijna aan elkaar gelijk en zijn daarom bij de modellering samengenomen.

De hellingen die bij de hellingshoeken van 15°, 30° en 45° horen, zijn respectievelijk 1 : 3,73; 1 : 1,73 en 1 : 1. Door Ponsteen (2013) zijn in een inventarisatie van geïnspecteerde kades in het beheergebied van Delfland de voorkomende hellingen gepresenteerd als in tabel 4.8.

Tabel 4.8

Hellingen van boezemkades met scheuren in het Hoogheemraadschap van Delfland zoals geregistreerd in tabel 2.11 van Ponsteen (2013).

Scheuren per helling binnentalud	Aantal geregistreeerde waarnemingen
1:2	10
1:2,5	21
1:3	57
1:3,5	21
1:4	12
1:5	28
Vaststellen na verbetering	17
Totaal	166

Ponsteen (2013) geeft aan dat er in de waarnemingen geen relatie is te vinden tussen scheuren en de taludhelling van het binnentalud. Daaruit kan worden geconcludeerd dat het aantal geregistreeerde waarnemingen ruwweg aangeeft hoe vaak een helling voorkomt. Ponsteen (2013) geeft verder aan dat een taludhelling van 1 : 3 waarschijnlijk de meest voorkomende is. Geconcludeerd kan worden dat een hellingshoek van 45° veel te steil is en daardoor buiten beschouwing moet worden gelaten. Een hellingshoek van 30° (helling 1 : 1,73) is bijzonder steil, maar zou als 'worst case' kunnen dienen. Een hellingshoek van 15° (helling 1 : 3,73) kan dienen als een gemiddelde helling.

De modellering richtte zich in eerste instantie op de 'worst case'-situatie met een hellingshoek van 30°. Daarbij is eerst gekeken wat het effect daarvan was bij een talud met een 2 m diepe freatische lijn. Vervolgens is bij dezelfde hoek gekeken naar een talud met een 0,5 m diepe freatische lijn. Op

basis van de effecten bij de steilste realistische hellinghoek van 30° zijn interessante combinaties van een windstreek met een hellingshoek van 15° nader beschouwd.

4.2 Resultaten en discussie

4.2.1 Theoretische dijken

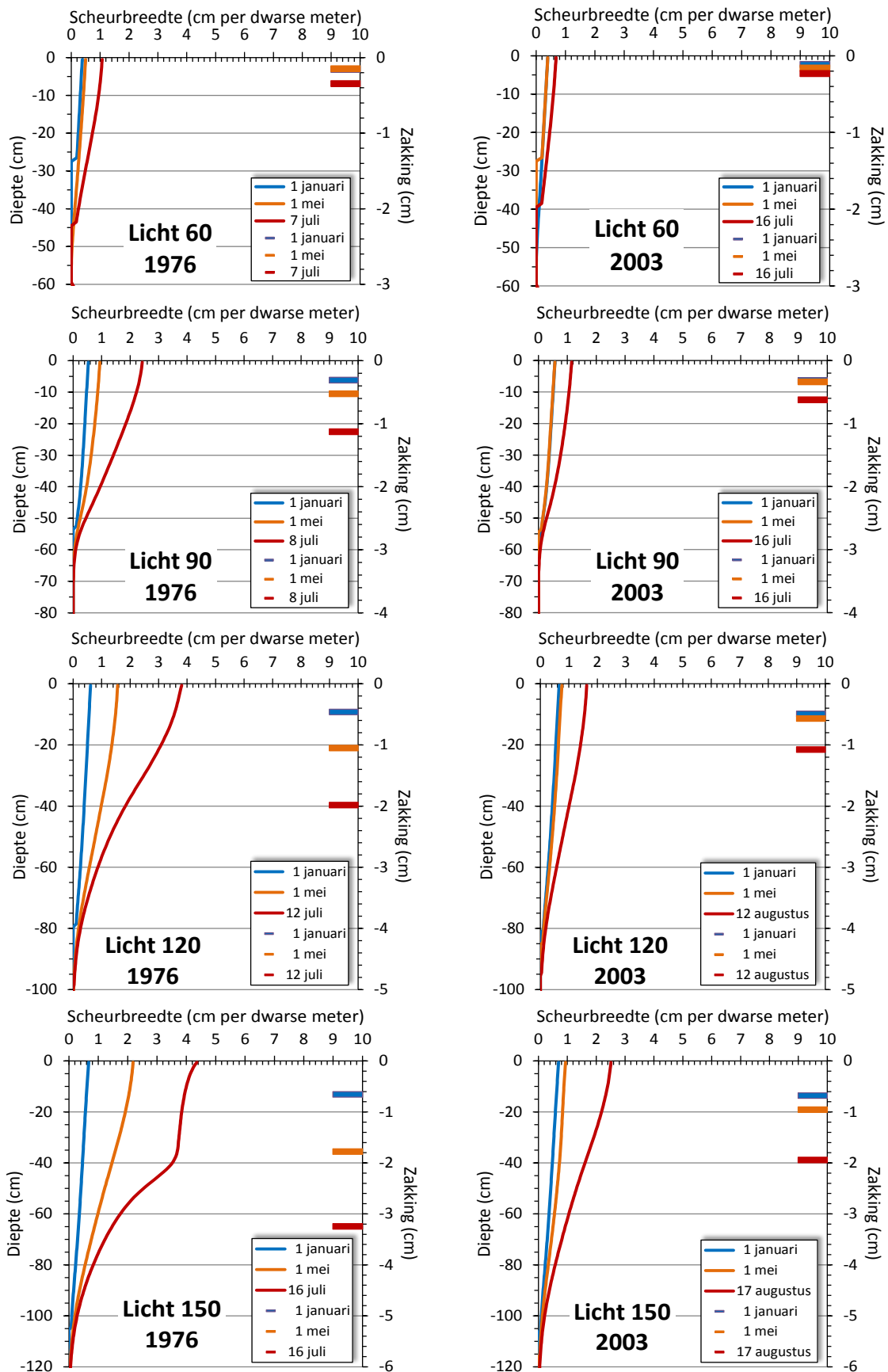
De resultaten voor de acht berekeningen per dijkmateriaal, als vier kolommen maal twee weerjaren, zijn gegeven in de figuren 4.5-4.8. De grafieken bevatten zowel de scheurbreedten (linker y-as) als de zakking (rechter y-as). Deze grootheden zijn beide gegeven voor drie tijdstippen: 1 januari als referentiedatum, 1 mei als datum waar-op inspecties van de kades wellicht al beginnen en de datum waarvoor het grootste scheurvolumen of de grootste zakking wordt berekend. De datum staat aangegeven in de legenda omdat deze per kolom-jaar-combinatie kan verschillen. Zo wordt zichtbaar wat er in de periode vanaf 1 mei nog kan gebeuren in beide jaren.

De scheurbreedte is weergegeven in 'cm per dwarse meter'. Omdat het bij veen- en kleikades meestal gaat om scheuren in de langsrichting van de kades, is de richting dwars op de scheur en kade de relevante richting om de krimp te beschouwen. In de gegeven scheurbreedte is de totale krimp van één dwarse meter gegeven in centimeters, waarmee die maat ook het percentage krimp in de dwarse richting aangeeft. In de langsrichting treedt eveneens krimp op. Deze zal, zoals in een horizontaal veld ook geldt voor de dwarse richting, verdeeld zijn over vele kleine scheurtjes die bodempolygonen van bepaalde diameter van elkaar afscheiden. Voor de dijken is niet bekend hoe het geometrische patroon van de krimpscheuren er uitziet.

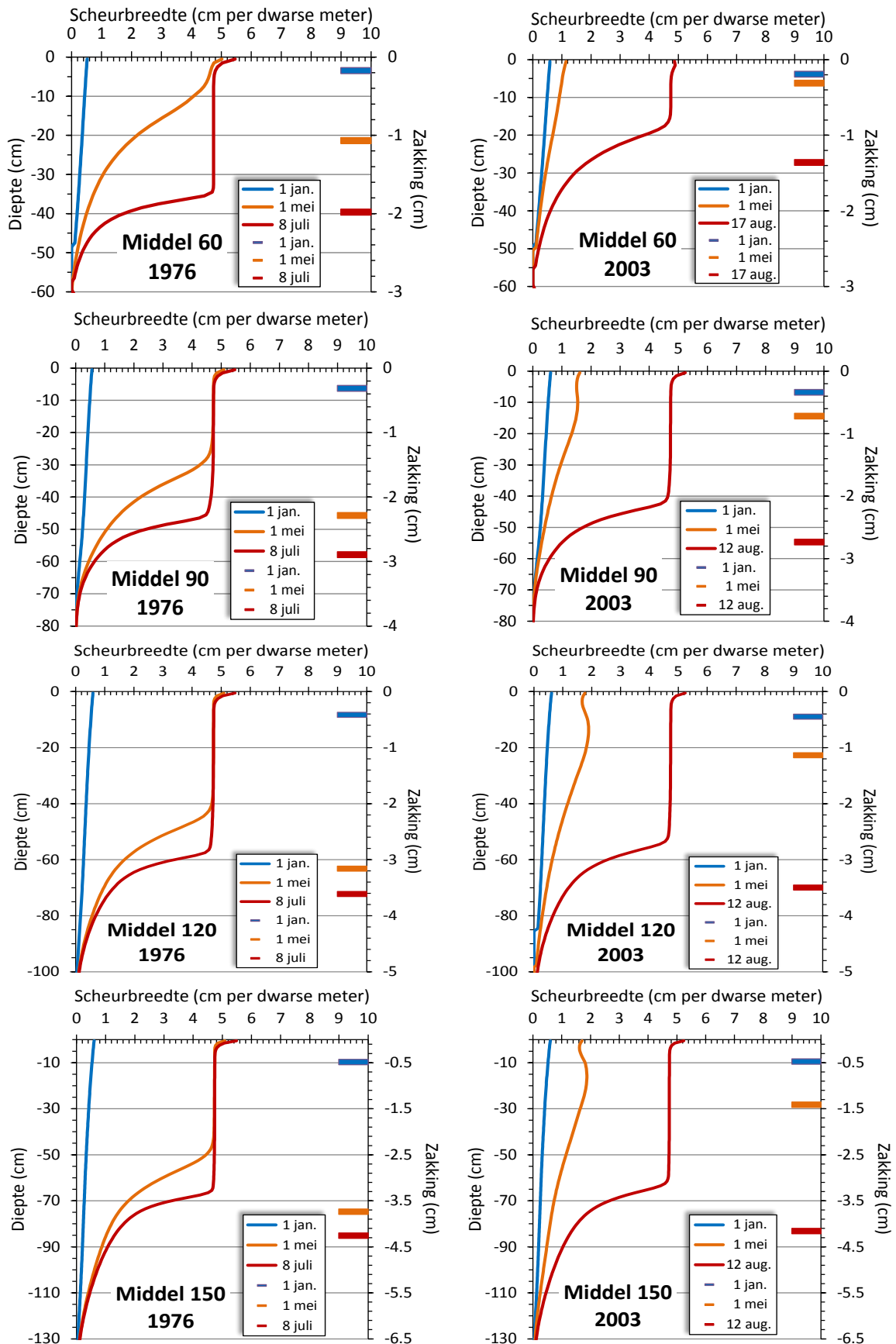
Het meest opvallende verschil tussen de dijkmaterialen in de figuren 4.5-4.8 is het meer vloeiender patroon van de kleisoorten in vergelijking met het veen. Dit is het gevolg van de homogene 'bodempopbouw' van de kleiprofielen die bestaat uit slechts één materiaal waardoor bodemeigenschappen constant zijn in de diepte. Verschillen in scheurbreedte zijn dan volledig het gevolg van verschillen in vochtgehalte en in de waarde van de geometriefactor. Bij het veenprofiel gaat het om een gelaagde profielopbouw waarin veensoorten met verschillende eigenschappen elkaar afwisselen. Verschillen in krimpkenmerken (zie bijlage 1) worden daardoor duidelijk zichtbaar: horizonten 2 en 4 vertonen krimpkenmerken die in het natte traject dicht bij de normaal-krimp-lijn liggen dan beide andere en daarmee grotere krimp vertonen. Karakteristiek 1 geeft de minste krimp, vooral in het droge traject. Dat maakt de enorme 'trendbreuk' in scheurbreedte op 30 cm diepte duidelijk. De bovenste 30 cm blijft ondanks de drogere omstandigheden sterk achter bij de volgende 30 cm.

Een ander hoogst relevant verschil tussen klei en veen is dat de scheurbreedte en de zakking bij veen zo'n drie keer groter zijn dan bij de meest krimpende klei (de zware van categorie 1): de scheurbreedte is 20 cm bij veen tegen 6 cm bij zware klei, en de zakking 12 cm bij veen tegen 5 cm bij zware klei. De kleien gedragen zich keurig naar de aard van hun krimpeigenschappen, die toeneemt van Licht naar Zwaar. De laatste heeft zo'n beetje een maximale krimpkenmerk: van verzadigd tot 30% van verzadiging, pure normale krimp waarbij elke volume-eenheid vochtverlies gelijk staat aan een eenheid poriënvolumeverlies.

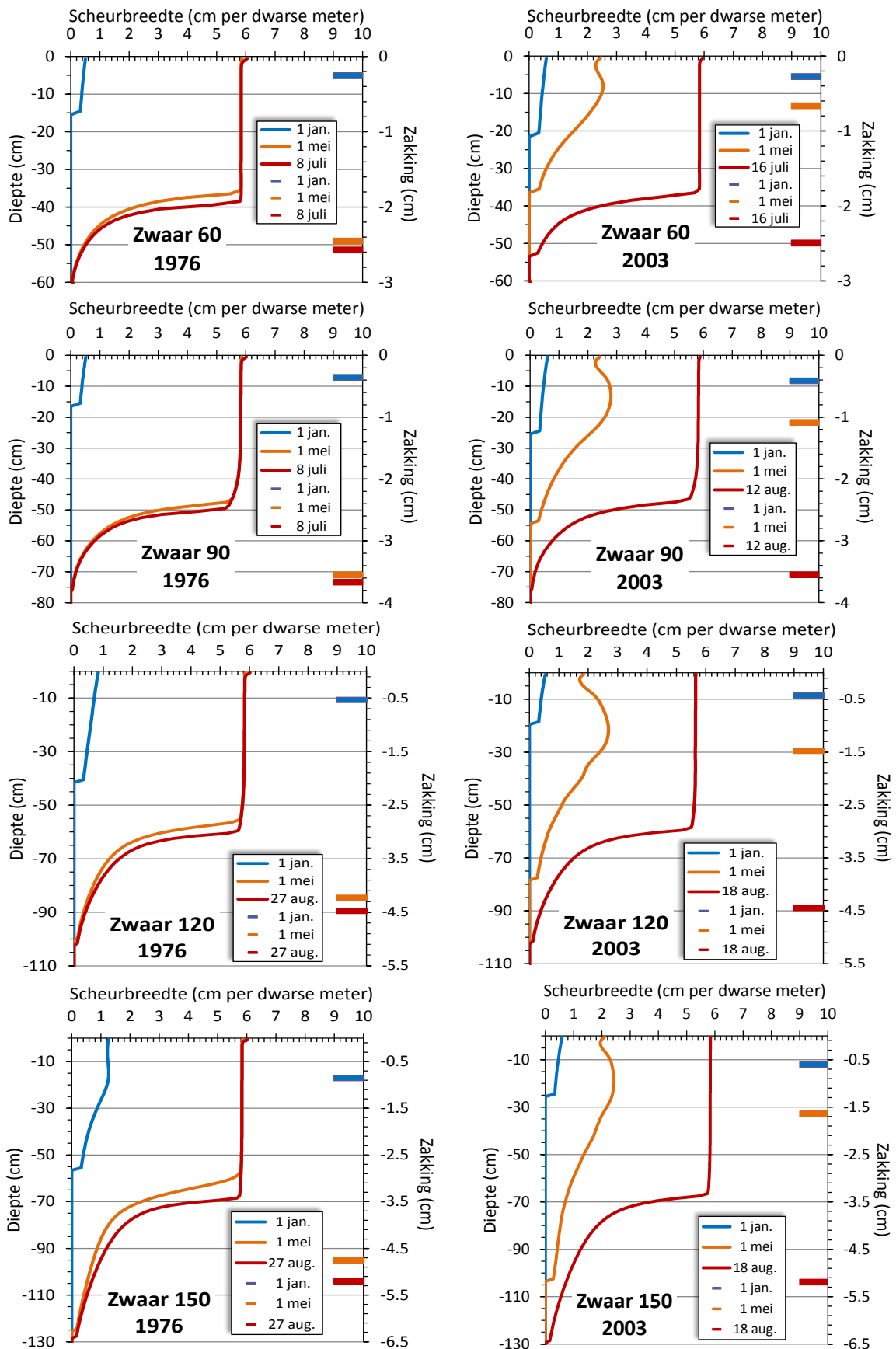
Ook opvallend is dat bij klei Licht de scheurbreedten zeer geleidelijk afnemen met de diepte, terwijl dat bij beide andere kleien ook met sprongen gebeurt. Dat heeft vooral te maken met de hydraulische kenmerken van deze grondsoort waarvan vooral het vochtneleverend vermogen richting het verdampende gewas van belang is. Bij beide andere kleien groeit de bovengrond bij alle kolommen - die verschillende freatischelijsdiepten weergeven - uiteindelijk naar dezelfde scheurbreedte aan 'maaiveld'. Deze kleien worden in de bovengrond uiteindelijk even droog, ook bij vergelijking tussen beide weerjaren (die overigens duidelijk maken dat 1976 veel droger is dan 2003). Dat laatste is ook al zichtbaar in mei: bij Middel en Zwaar is in 1976 al op 1 mei de maximale scheurbreedte bijna bereikt. Ondanks het grote verschil in krimpkenmerk tussen Zwaar en Middel eindigen de scheurbreedten bij beide kleien toch op waarden die niet heel erg ver uit elkaar liggen. De breedten zijn het product van de combinatie van krimp- en hydraulische kenmerken. De krimpkenmerk alleen is niet alles bepalend.



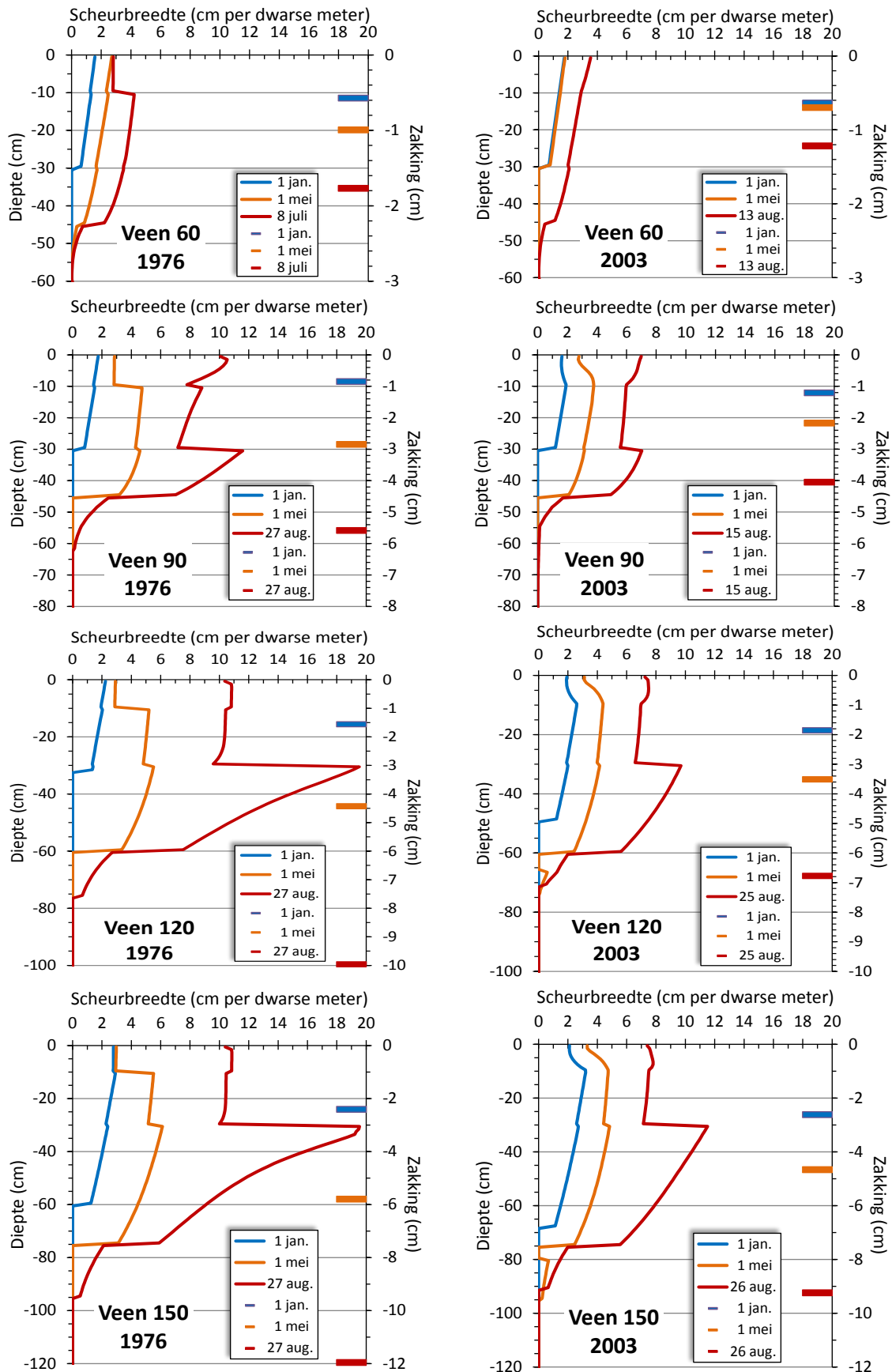
Figuur 4.5 Berekende scheurbreedten en kruinzakking van Lichte klei: categorie 3.



Figuur 4.6 Berekende scheurbreedten en kruinzakking van Middelsware klei: categorie 2.



Figuur 4.7 Berekende scheurbreedten en kruinzakking van Zware klei: categorie 1.



Figuur 4.8 Berekende scheurbreedten en kruinzakking van Veen, Middelburgsekade.

4.2.2 Werkelijke dijken

De resultaten voor beide dijken zijn weergegeven in de figuren 4.9 en 4.10. Opvallend in vergelijking met de theoretische dijken is dat bij de werkelijke dijken de scheurbreedte ruwweg lineair afneemt met de diepte. Bij de theoretische dijken is er een diep traject vanaf maaiveld van ongeveer 40-70 cm waarbij de scheurbreedte vrij constant blijft op de maximale waarde. De lengte van dat constante traject is afhankelijk van de diepte van de freatische lijn: hoe dieper deze lijn, hoe langer het constante traject. In dit traject heeft de klei blijkbaar zijn maximale droogte bereikt gegeven de wateronttrekking door het gras en de potentie van de klei tot capillaire nalevering. Meer krimpen kan het dijkmateriaal niet meer onder die omstandigheden. Uitzondering zijn de lichte klei en de veendijk die wel dit constante traject laten zien voor de bovenste 30 cm tot de laagovergang met sterk wisselende eigenschappen van beide lagen rond de overgang.

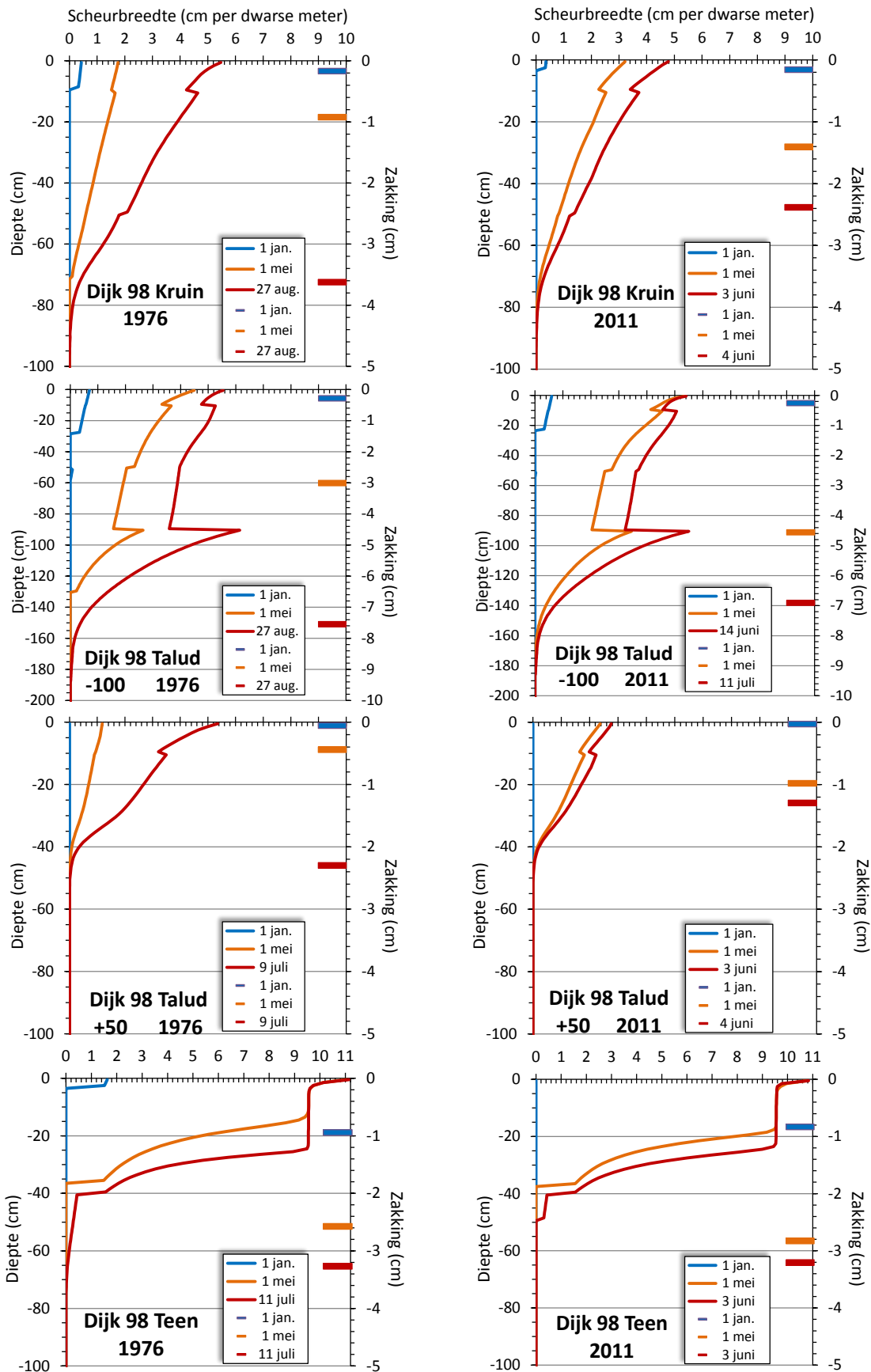
De werkelijke dijken laten nergens zo'n diep constant traject zien. Wel een korter constant traject tot ruim 20 cm bij het kleiige veen aan de teen van Locatie 98 en een traject van ongeveer de helft van die lengte bij de venige klei in de teen van Locatie 99. Daar is blijkbaar wel een evenwichtstoestand bereikt.

De reden voor de verschillen tussen theoretische en werkelijke dijken is de veel geringere vochtonttrekking door het gras bij de werkelijke dijken. Deze dijken kunnen daarom ook in een extreem droog jaar als 1976 niet ver genoeg uitdrogen om het scheurniveau van de theoretische dijken te bereiken. Het maximale niveau van de scheurbreedte aan maaiveld dat in beide soorten dijken wordt bereikt ligt voor het kleimateriaal in hetzelfde bereik van 5-7 cm. Het kleiig veen van de teen van Locatie 98 bereikt met 10 cm aan maaiveld een grotere breedte dan de theoretische veendijk bovenin. Maar wel slechts de helft van de grootste scheurbreedte in de tweede laag op een diepte van 30 cm in 1976. De krimpkaracteristieken van de verschillende dijkmaterialen verklaren deze grote verschillen.

Opvallend is dat op 1 mei 2011 al bijna de maximale scheurbreedte van dat jaar wordt bereikt die slechts weinig kleiner is dan de maximale breedte in 1976. De vroege scheur legt in 2011 al de basis voor de uiteindelijke breedste scheur in juni. In juli 2011 begint het weer flink te regenen dat het hele derde kwartaal doorgaat met uiteindelijk een neerslagoverschot van 112 mm in dit zomerkwartaal. Alleen bij het talud met een diepe freatische lijn van 2 m wordt de breedste en diepste scheur later in het seizoen - 14 juni bij dijk 98 en op 11 juli bij dijk 99 - gehaald. Dit heeft in het model te maken met het dieper en daardoor sneller en in grotere hoeveelheden wegsluizen van neerslagwater door krimpscheuren. Dit is een *bypass* van het bovenste deel van het profiel dat daardoor droger blijft.

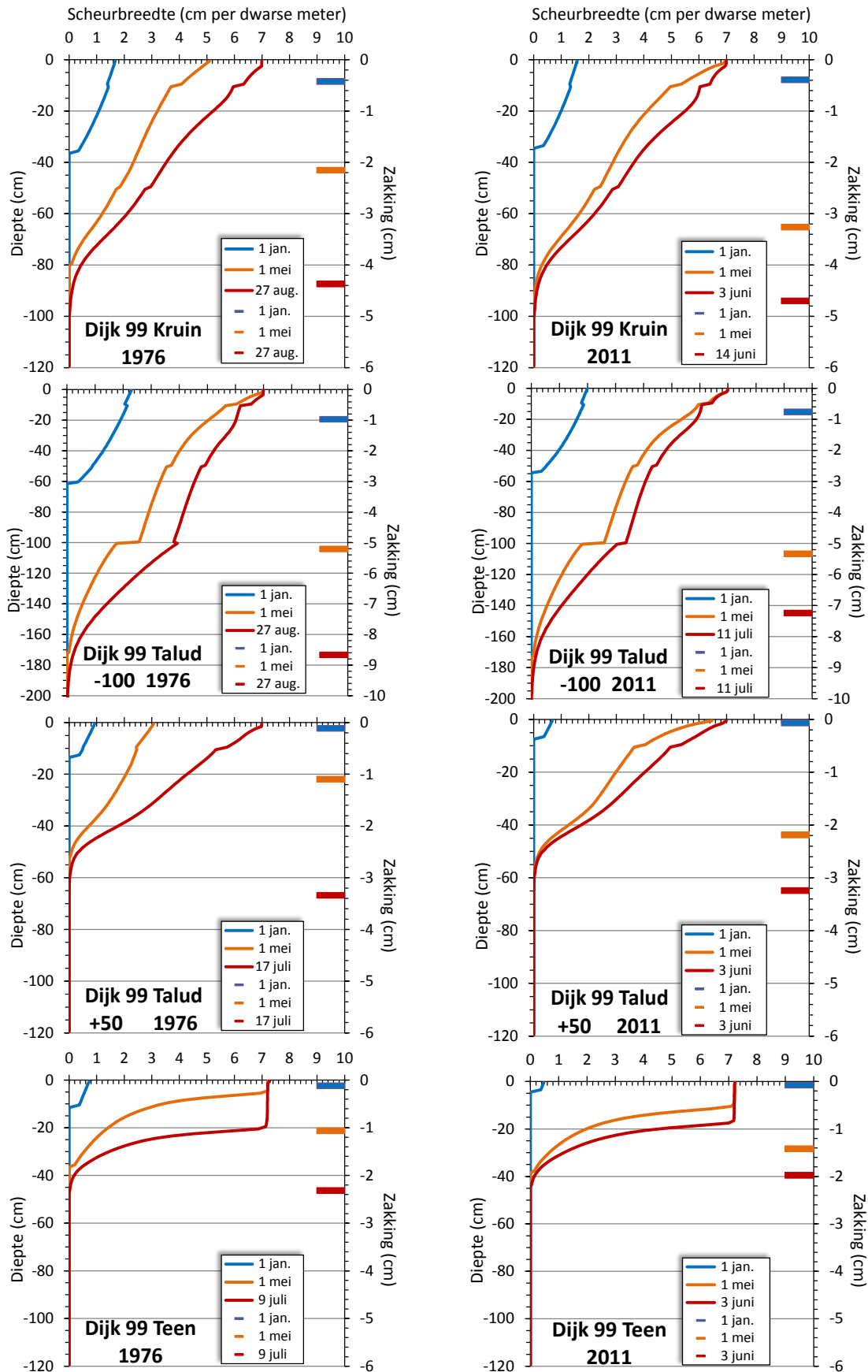
Alleen bij de simulaties met de diepe freatische lijn op circa 2 m wordt de onderliggende zware klei op 90 cm (dijk 98) en 100 cm (dijk 99) diepte in zo'n mate en tot zo'n diepte uitgedroogd dat de scheurbreedte aan de top van die laag groter is dan de maximale scheurbreedte van het bovenliggende materiaal, hoewel dat materiaal verder uitdroogt. Deze grotere scheurbreedte is duidelijk het gevolg van de extremere krimpkaracteristiek van die zwaardere klei.

Op Locatie 99 zijn in 2011 scheuren gerapporteerd met een lengte groter dan 10 m, een breedte groter dan 100 mm en een diepte groter dan 100 cm (kenmerk 0045#903_Schieveen_kv232e_2174200) en een lengte kleiner dan 1 m, een breedte van 10 - 25 mm en een diepte groter dan 100 cm (kenmerk 0044#902_Schieveen_kv232e_2174400). De grootste gemeten breedte (> 100 mm) is duidelijk meer dan de breedte die in figuur 4.10 wordt aangegeven in 'cm per dwarse meter'. Op foto 4 van 0045#903_Schieveen_kv232e_2174200 zijn twee parallelle brede scheuren te zien die (geschat) op iets meer dan één meter afstand van elkaar liggen. Het lijkt er op dat de berekende breedte wat kleiner is dan of dezelfde orde van grootte heeft als de gemeten breedte. Een grotere gemeten dan berekende scheurbreedte kan samenhangen met een grotere werkzame dwarse breedte (meer 'dwarse meters') bij de metingen, of met krachten dwars op de scheurbreedte, of met beide. De gemeten scheurdiepte van meer dan 100 cm wijst in dezelfde richting. Dit komt in de modellering in figuur 4.10, goed overeen met de scheurdiepte in de droogste situatie (diepste freatische grondwaterstand, Dijk 99, Talud -100).



Figuur 4.9 Berekende scheurbreedten en kruinzakkingen van dijk Locatie 98 voor de drie posities op de dijk.

De rapportage van de scheuren bij Locatie 98 is minder duidelijk en maakt geen goede vergelijking tussen gemeten en berekende scheurbreedten mogelijk.



Figuur 4.10 Berekende scheurbreedten en kruinzakkingen van dijk Locatie 99 voor de drie posities op de dijk.

4.2.3 Invloed van hellingshoek en expositie ten opzichte van de zon dit is 4.2.3

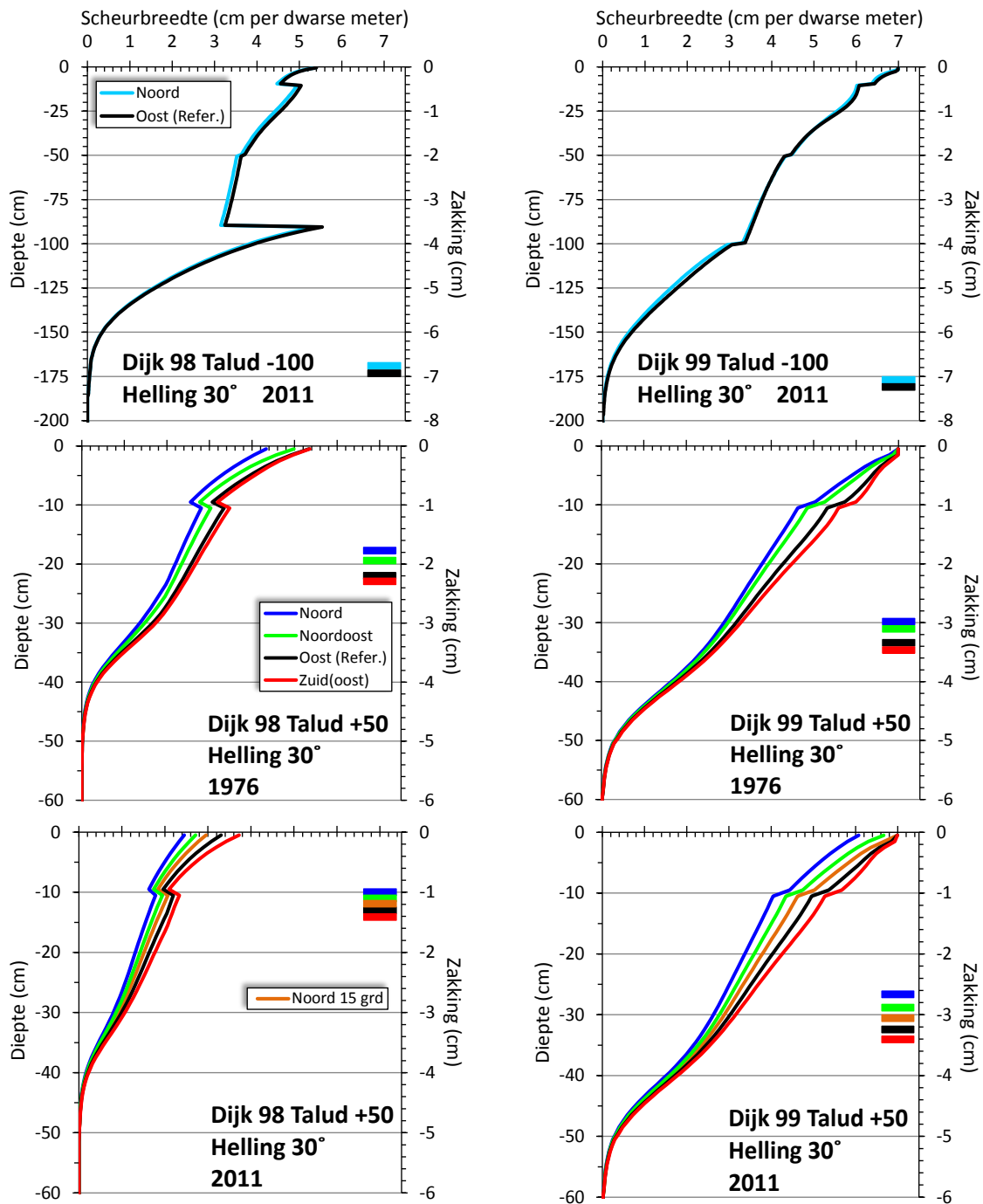
De berekeningen zijn uitgevoerd voor de jaren 1976 en 2011 voor de kades op de locaties 98 en 99 en alleen gedaan voor de uiteindelijke grootste scheurbreedte in deze beide jaar. Omdat het effect van de hellingshoek en de expositie ten opzichte van de zon bij flauwe hellingen al snel nihil is, zijn de berekeningen alleen gedaan voor een hellingshoek van 30° en een enkele keer voor 15° . Een hellingshoek van 30° komt overeen met een helling van 1 : 1,7. Dit is uitzonderlijk steil en geeft dus een 'worst case'. De resultaten zijn gepresenteerd in figuur 4.11.

Een eerste berekening met scheurvorming in het talud met een diepste freatische lijn van circa 2 m liet zien dat alleen de extreemste windstreek 'noord' met het grootste effect (de grootste verkleining want kleinste vermenigvuldigingsfactor) een zichtbaar verschil met de referentie (oost) geeft en alleen in 2011, niet 1976. De andere windrichtingen zijn niet getoond omdat deze niet zichtbaar verschillen met oost. Dus bij een diepe freatische lijn treedt alleen in het relatief nattere jaar 2011 nog enig verschil in scheurbreedte op. In het extreem droge 1976 zijn er helemaal geen verschillen in scheurbreedten.

Een tweede serie berekeningen betrof een ondiepe freatische lijn. Daardoor blijft het profiel wat natter, met als gevolg dat dan bij een hellingshoek van 30° alle windstreken wel duidelijk zichtbare verschillen in maximale scheurbreedte geven. Bij zuid en zuidoost treedt dan een geringe vergroting van scheurbreedte op en bij noord en noordoost een wat duidelijkere verkleining van de scheurbreedte. Dit komt overeen met de vermenigvuldigingsfactoren in tabel 4.7. De noordhelling heeft ook hier het grootste effect, met in 1976 een verkleining van de scheurbreedte van circa 15%, wat overeenkomt met de vermenigvuldigingsfactor van 86%. Bij locatie 98 is dat bovenin het profiel aan de oppervlakte en bij locatie 99 op 10 cm diepte. In 2011 is het effect groter: 20-25%.

Voor 2011 is ook met een hellingshoek van 15° gerekend voor een expositie van de helling richting noord. De verschillen in vochtgehalte en scheurbreedte tussen noord en oost (referentie) worden dan sterk beperkt en zijn veel kleiner dan bij een hellingshoek van 30° . Een hellingshoek van 15° komt overeen met een voor een kleidijk vrij gemiddelde helling van 1 : 3,73.

De conclusie is dat naarmate de omstandigheden natter zijn door een hoge freatische lijn en/of het weer, het effect van een helling en de expositie van die helling ten opzichte van de zon groter is. Reden is dat een beetje extra verdamping of juist wat minder verdamping onder nattere omstandigheden meer effect heeft op het verschil in vochtgehalte en daarmee op de scheurbreedte. Wordt vervolgens de droogteperiode langer en intenser, dan raakt de grond aan de zuidzijde het eerst uitgedroogd en wordt de verdamping daar minder. De noordzijde verdampt dan nog een tijdje op de oude voet verder en droogt dan verder uit richting het vochtgehalte aan de zuidzijde, waarbij de verschillen in vochtgehalte en daarmee scheurbreedten tussen zuid en noord afnemen. Bij een veel voorkomende helling van 1 : 3 zijn bij een extreem droge zomer de verschillen in scheurbreedte uiteindelijk zeer gering. Wel zal de maximale scheurbreedte op de zuidzijde iets eerder worden bereikt. Dit tijdsverschil zal alleen tussen de noord- en zuidzijde merkbaar uitmaken



Figuur 4.11 Berekende scheurbreedten en kruinzakkingen van dijken Locaties 98 en 99 voor het talud bij twee diepten van de freatische lijn, twee hellingshoeken en vijf exposities ten opzichte van de zon uitgedrukt in een windstreek. Van hellingshoek 15° is alleen de relevante windstreek 'noord' getoond. Expositie oost is de referentie want deze geeft een zelfde potentiële verdamping als een vlak terrein. Expositie vier 'zuid' en vijf 'zuidoost' zijn gelijk. Verder zijn de ontbrekende windstreken 'noordwest' en 'zuidwest' gelijk aan respectievelijk 'noordoost' en 'zuidoost'.

5 Effect van grasbeheer en begroeiing op vochtgehalte en scheurbreedte bij uitdrogende kleikades

Deze studie sluit aan op een eerdere studie naar het effect van beheersmaatregelen voor de grasbedekking op vochtgehalten bij uitdrogende veendijken (Oostindie et al., 2012). In die studie zijn met het SWAP-model vijf maatregelen doorgerekend voor een veendijkprofiel zonder kleidek en een zelfde profiel afgedekt met een kleilaag. Die berekeningen zijn uitgevoerd voor vier worteldiepten en bij drie verschillende grondwaterstanden. Uit deze studie volgde dat bij weiden een veenkade minder snel uitdroogt dan bij maaien.

Bij de studie naar het effect van maaien of beweiden op het vochtgehalte bij uitdrogende kleikades hebben we gebruik gemaakt van de ervaringen uit de studie met de veenkades. De beheersscenario's zijn beperkt tot maaien en beweiden. Hiervoor is het 'algemene beheer' genomen dat is omschreven in subparagraaf 4.2.1. Uit deze omschrijving wordt duidelijk dat het beheer samenhangt met twee kenmerken van het gras: de Leaf Area Index (LAI, een functionele maat voor de bodembedekking) en de verdeling van de wortelmassa met de diepte. Het is niet duidelijk of beide kenmerken een causale relatie hebben met het beheer. Voor de LAI zal dat zeker gelden, maar de verdeling van de wortelmassa zal sterk worden bepaald door de bodemeigenschappen van de wortelzone. In het vervolg van de studie is aangenomen dat alleen de LAI wordt bepaald door het beheer. De verdeling van de wortelmassa is bij beide dijken gelijk gehouden voor de beheersscenario's. Als een vorm van referentie is een extra scenario doorgerekend waarin de LAI de constante waarde van 3 heeft. Dit is een gemiddelde waarde in de tijd van cultuurgras.

Naast het beheer van de grasbedekking van kades is begroeiing met andere planten dan gras relevant. Vooral bomen kunnen diep wortelen (zie hoofdstuk 3) en het profiel tot grote diepte sterk uitdrogen. Bij de inspectie van kades door HH Delfland zijn bij bomen dan ook grote scheuren waargenomen. In de onderhavige studie is daarom een aanvullend scenario doorgerekend met een boom op de grens tussen kruin en talud. Hierbij is gebruik gemaakt van informatie uit de studie van Bakker et al. (1995).

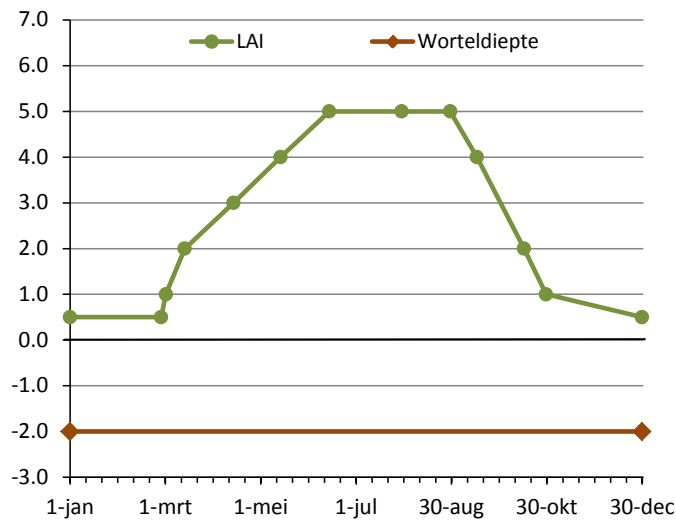
De scenario's zijn voor beide dijken doorgerekend met SWAP voor de jaren 1976 en 2011 met de meteorologische gegevens van Rotterdam uit tabel 4.1. Voor de drie beheersscenario's zijn als uitgangspunt de modelkolommen van de kruin van beide dijken genomen. Voor het scenario met een boom is de modelkolom van het talud met een freatische lijn van 100 cm dieper dan die van de kruin genomen, wat neerkomt op ongeveer 2 m diep. Uitgangspunt hierbij was het gegeven uit Bakker et al. (1995) dat een boom tot 2 m diep kan wortelen en in droge tijden ook tot die diepte de grondwaterstand zal verlagen.

Voor de kenmerken van de boom is in eerste instantie informatie gehaald uit Bakker et al. (1995), ervan uitgaande dat een wilg een veel voorkomende boom is voor een dijk. Verder is bekend dat de wortels van wilgen goed tegen wisselende grondwaterstanden kunnen, waarbij de wortels langere tijd onder de grondwaterstand kunnen staan. De verdamping van wilgen is bijzonder hoog, waarbij veel water aan de grond wordt onttrokken, met als gevolg grote krimp en zakking. De gegevens over verdamping zijn in de eerste plaats het gemeten verloop van de LAI voor de maanden april tot september (tabel 5.1, figuur 5.1). Het relatieve verloop voor de rest van het jaar is verkregen van de grondwatermodellering met SWAP van het nationale instrument STONE (Wolf et al., 2003). De worteldiepte is constant gehouden op 2 m, omdat de wortels van een wilg onder de grondwaterspiegel niet afsterven.

Tabel 5.1

Verloop in de tijd van de LAI en van de worteldiepte van de gemodelleerde boom.

Datum	LAI ($m^2 m^{-2}$)	Worteldiepte (m)
1 jan.	0.5	2,0
28 feb.	0.5	2,0
3 mrt	1.0	2,0
15 mrt	2.0	2,0
15 april	3.0	2,0
15 mei	4.0	2,0
15 juni	5.0	2,0
31 juli	5.0	2,0
31 aug.	5.0	2,0
17 sept.	4.0	2,0
17 okt.	2.0	2,0
31 okt.	1.0	2,0
31 dec.	0.5	2,0



Figuur 5.1 Verloop in de tijd van de LAI ($m^2 m^{-2}$) en van de worteldiepte (m) van de gemodelleerde boom.

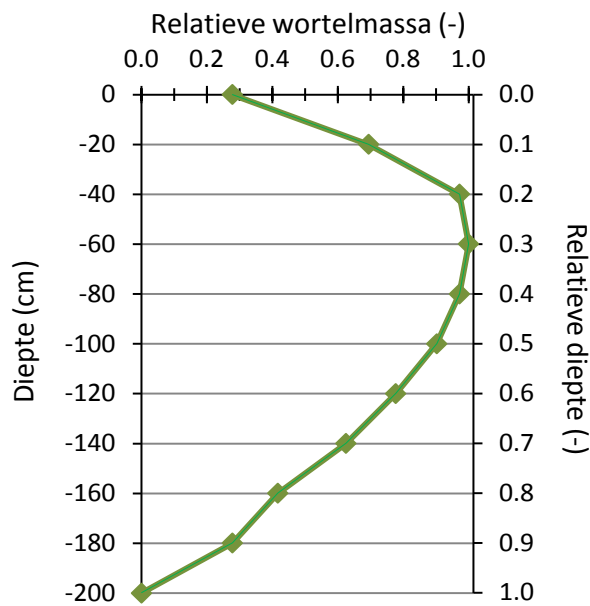
Het verloop met de diepte van de relatieve wortelmassa is afgeleid van de wilg van Bakker et al. (1995) zoals weergegeven in figuur 3.1 (tabel 5.2, figuur 5.2). De overige invoergegevens voor het beschrijven van de verdamping van de boom zijn afgeleid uit STONE.

De effecten van grasbeheer op de verzadigingsgraad zijn geanalyseerd in paragraaf 5.1. De effecten van grasbeheer en begroeiing met bomen op de scheurbreedte zijn geanalyseerd in paragraaf 5.2. De verzadigingsgraad is een maat voor het relatieve vochtgehalte van een kadeprofiel en daarmee een relatieve maat voor de krimp in het profiel en het lichter worden van het profiel. Dit laatste is eigenlijk alleen van belang voor kades bestaande uit veen. Voor kades bestaande uit klei is vooral de diepte en breedte van krimpscheuren van belang.

Tabel 5.2

Verloop met de diepte van de relatieve wortelmasa van de gemodelleerde boom.

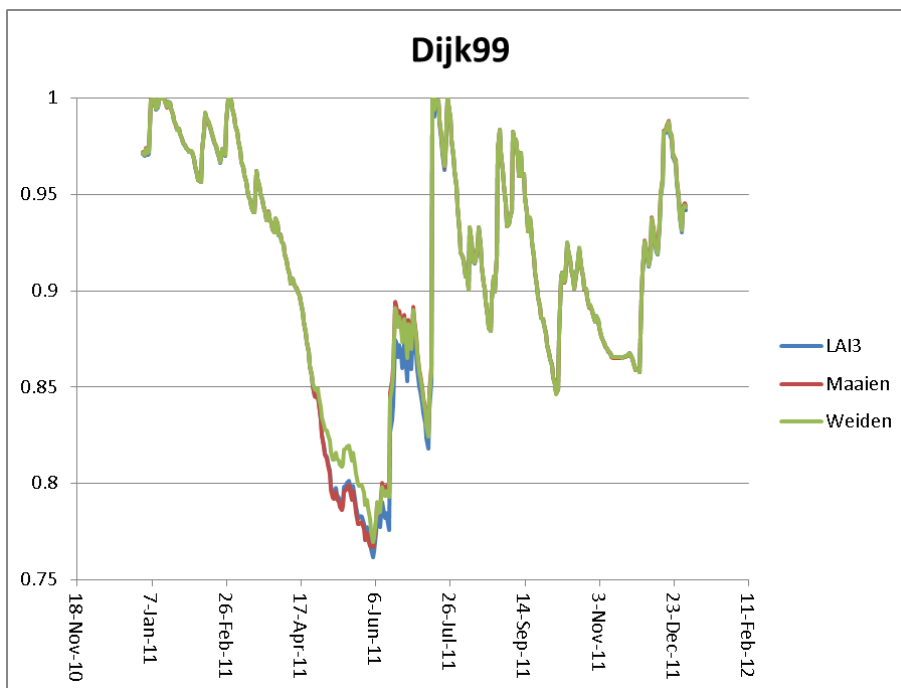
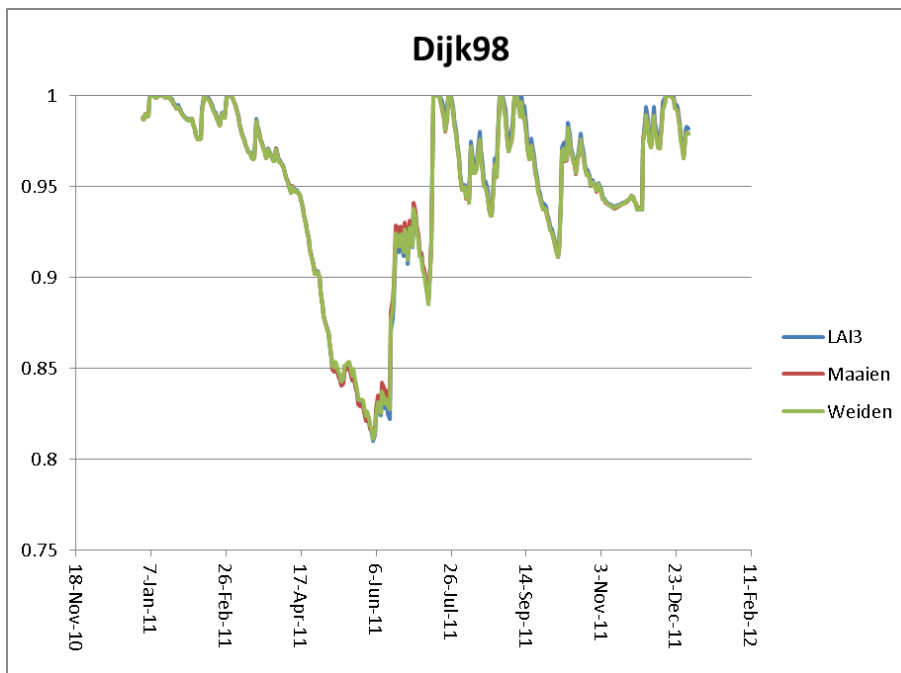
Worteldiepte		Relatieve wortelmasa (-)
Absoluut (cm)	Relatief (-)	
0	0,0	0,28
20	0,1	0,69
40	0,2	0,97
60	0,3	1,00
80	0,4	0,97
100	0,5	0,90
120	0,6	0,78
140	0,7	0,63
160	0,8	0,42
180	0,9	0,28
200	1,0	0,00



Figuur 5.2 Verloop met de diepte van de relatieve wortel-massa van de gemodelleerde boom.

5.1 Verzadigingsgraad

In de eerdere studie naar veenkades (Oostindie et al., 2012) is de verzadigingsgraad van een bodemprofiel gedefinieerd als de hoeveelheid vocht die een gedeelte van het bodemprofiel bevat gedeeld door de hoeveelheid die het kan bevatten bij totale verzadiging. Deze definitie van de verzadigingsgraad is in onderhavige studie ook gebruikt om het effect van de verschillende beheersmaatregelen te kunnen nagaan. Als representatieve dikte waarvoor de gemiddelde verzadigingsgraad wordt berekend, is net als bij de veenkades de bovenste 100 cm van het profiel gebruikt. Het bleek dat de effecten van de beheersmaatregelen voor beide jaren een identiek beeld gaven. Daarom wordt hier alleen 2011 gepresenteerd en besproken.



Figuur 5.3 Het verloop van de verzadigingsgraad van de bovenste 100 cm in 2011 voor Dijk 98 en Dijk 99 bij de referentiesituatie LAI3 en bij de beheersmaatregelen 'Maaien' en 'Weiden'.

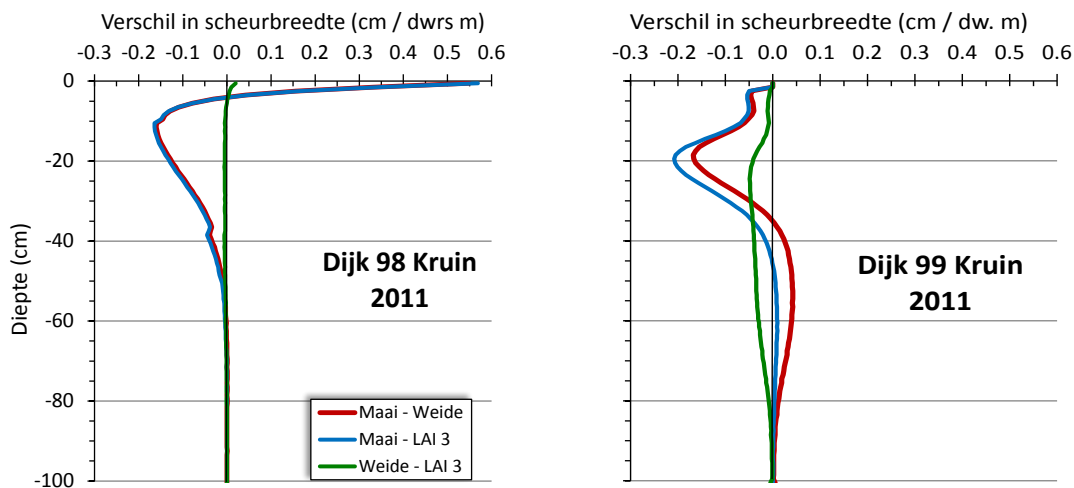
Het verloop van de berekende verzadigingsgraad in 2011 is weergegeven in figuur 5.3 voor de dijken 98 en 99. Voor dijk 98 blijkt er vrijwel geen effect te zijn van een ander beheerpatroon. De lijnen liggen vrijwel op elkaar. Alleen in juni en juli zijn er een paar dagen met minieme verschillen. De verzadigingsgraad daalt tot 0,81 in juni. Bij dijk 99 daalt de verzadigingsgraad verder tot 0,76. Ook bij deze dijk zijn tussen een contante LAI van 3 en maaien minimale verschillen zichtbaar. Beweiden levert wel een hogere verzadigingsgraad op in juni en juli.

Een verklaring voor het feit dat bij de veenkades wel een effect van beweiden optrad en bij de kleikades niet, is dat het veen voortdurend en vrij gemakkelijk water kan blijven leveren, terwijl de vochtanvoer bij de klei gelimiteerd is door de beperktere hoeveelheid die er in zit en door de lage doorlatendheid waardoor de capillaire nalevering beperkt is. Het gras zal op de kleikade dan ook

eerder last hebben van de droogte en misschien zelfs verdorren, waardoor de verdamping beperkt wordt. Het verdorren heeft wel als nadeel dat de erosiebestendigheid achteruitgaat. Ook zal uiteindelijk de grasmat moeten worden hersteld om de groei van kruiden te beperken en om een sterke gesloten grasmat te creëren.

5.2 Scheurbreedte

De berekende scheurbreedten zijn gegeven in de figuren 5.4 en 5.5. De verschillen tussen de drie beheersvarianten zijn dermate klein dat in figuur 5.4 niet de absolute breedten zijn getoond, maar de verschillen tussen de scheurbreedten van de scenario's met grootste scheurbreedten. De absolute waarden van het basisscenario - maaien bij dijk 98 en weiden bij dijk 99 - zijn gegeven in de figuren 4.9 en 4.10.

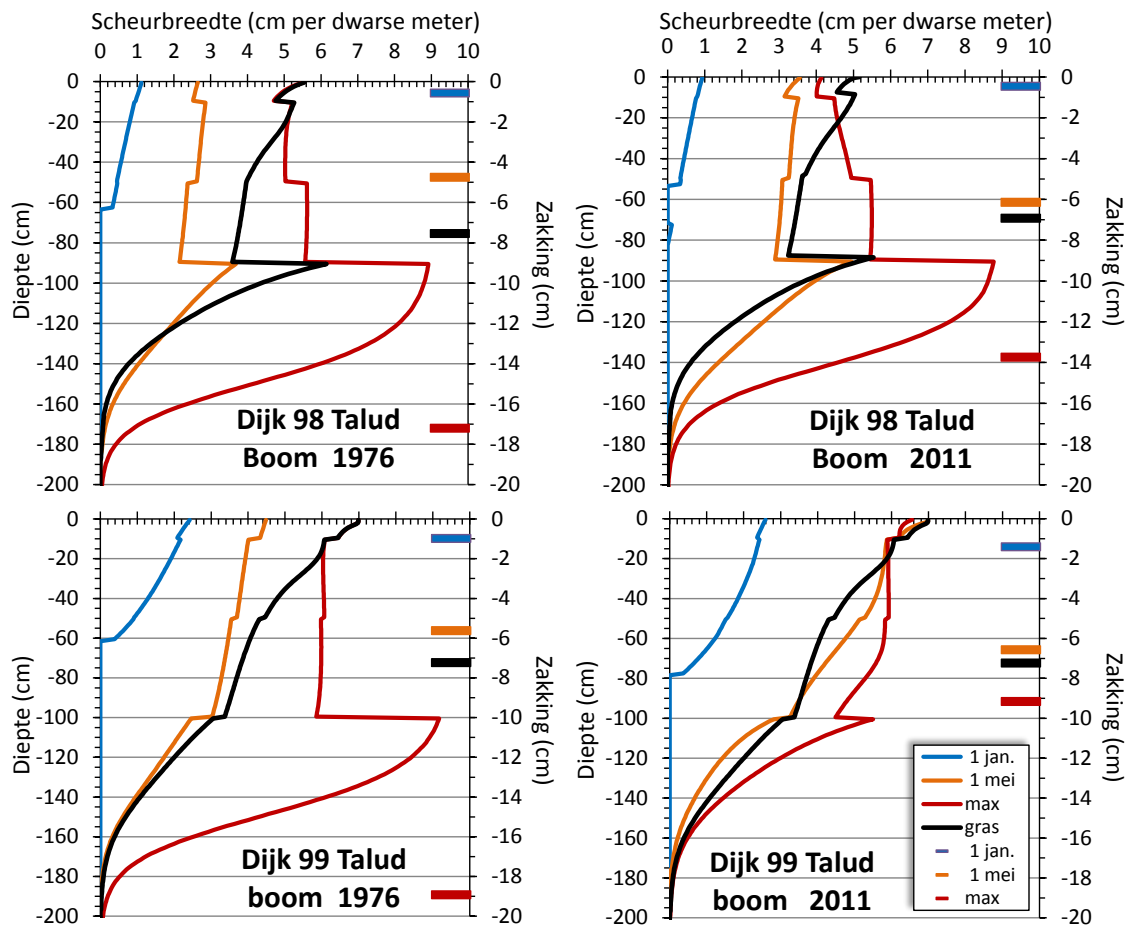


Figuur 5.4 Berekende verschil in scheurbreedten tussen de twee beheersscenario's en de referentie LAI3 voor beide dijken op de kruin voor het jaar 2011.

De verschillen tussen de drie scenario's zijn net als bij de verzadigingsgraad klein, in de orde van enkele millimeters. Alleen aan maaiveld bij dijk 98 is er een substantieel verschil van ruim een halve centimeter tussen maaien enerzijds en weiden en LAI3 anderzijds. Bij deze dijk is het verschil tussen de laatste twee nihil. Ook bij dijk 99 is het verschil tussen weiden en LAI3 het kleinst. Worden de verschillen van deze dijk geïntegreerd over de diepte uitgedrukt dan geeft dat:

- Maaien minus weiden: $-1,38 \text{ cm}^2$.
- Maaien minus LAI3: $-3,74 \text{ cm}^2$.
- Weiden minus LAI3: $-2,36 \text{ cm}^2$.

Deze getallen kunnen het beste worden vergeleken met de verzadigingsgraad. Het effect van beheer op de scheurbreedte geeft de kleinste verschillen tussen maaien en weiden, en de grootste tussen maaien en LAI3. Verder is duidelijk dat maaien de geringste scheurbreedte geeft, ook bij dijk 98, en LAI3 de grootste. Dit is anders dan bij de verzadigingsgraad waarbij in de periode van de grootste scheurbreedte (3 juni) weiden de meest afwijkende is van de drie scenario's en de grootste verzadigingsgraad geeft. Hoewel de verschillen tussen scenario's bij beide grootheden klein zijn, kan hier uit worden geconcludeerd dat de verzadigingsgraad niet een zuivere maat is voor de scheurbreedte. Hierin mist het verloop met de diepte.



Figuur 5.5 Berekende scheurbreedten en kruinzakkingen van dijken 98 en 99 bij begroeiing met een boom. Ter vergelijking is de voor de diepte van de freatische lijn vergelijkbare situatie voor gras getoond: talud bij freatische lijn van 2 m diep. In de legenda staat max voor de datum met maximale scheurbreedte en kruinzakking bij de boom: 27 augustus 1976 en 11 juli 2011.

Figuur 5.5 laat zien dat bij gelijke freatische lijn een boom in vergelijking met gras vooral diepere scheuren en een grotere scheurbreedte in de diepte geeft. De overgang bij beide dijken naar zwaardere klei met een groter krimpvermogen op 90 en 100 cm diepte is nu zeer geprononceerd zichtbaar. In 1976 is vanaf maaiveld tot en met de top van de onderliggende zware klei de maximale krimp bereikt. Dat is de krimp die geldt bij de minimale waterspanning van -6000 cm waarbij bomen nog water aan de bodem kunnen onttrekken. Voor 2011 geldt dat nog niet. In het droge voorjaar van 2011 bereiken bomen al scheurbreedten van de orde van de maximale breedten van gras bij dezelfde freatische lijn.

6 Beantwoording vragen

In de offerteaanvraag zijn een aantal vragen aan Alterra geformuleerd. In dit hoofdstuk worden deze beantwoord. In veel gevallen wordt hierbij verwezen naar hoofdstukken in dit rapport en naar de literatuur.

6.1 FASE B, Verklaring van ontstaan van de scheur- en vervormingspatronen

De volgende vragen zijn voor FASE B geformuleerd:

- a. Verklaring scheur- en vervormingspatronen vanuit cultuurtechnische optiek.
- b. Beschrijving optredende fenomenen.
- c. Krimpgevoeligheid soorten veen en klei. Zowel verticaal als horizontaal. Hierbij moet de relatie met de geometrie en opbouw van de kade worden beschouwd.
- d. Verwachtingen doorgaande ontwikkeling van de scheurvorming in de tijd.
- e. Verwachtingen zelfde waarnemingen bij een volgende droogteperiode. Komen dezelfde scheuren terug of worden het vergelijkbare scheuren op/rondom dezelfde locatie.
- f. Verloop breedte scheuren over de diepte. Hoe kunnen voor het oog niet zichtbare scheuren worden gedetecteerd?
- g. Omschrijving factoren van invloed op het ontstaan en ontwikkelen van scheuren.

a. Verklaring scheur- en vervormingspatronen vanuit cultuurtechnische optiek

In veel gevallen lopen de scheuren min of meer in de lengterichting van de kade. Dit kan worden verklaard uit het feit dat de grond aan de boezemzijde door infiltratie vanuit de boezem voortdurend natter blijft dan de grond aan de polderzijde. De ervaring leert dat de krimpende grond zich als het ware lostrekt van de nattere, minder krimpende grond (Hoofdstuk 2, Bakker et al., 1995).

Vaak ziet men ook de scheur langs een verhard of onverhard pad lopen. Hier speelt een rol dat dit een overgang is van stevig materiaal (verharding, platgetreden grond) naar minder hard materiaal (de grond), dat oppervlakkig bijeen wordt gehouden door een graszode. Verder zal de grond onder de verharding of de kale, platgetreden grond minder snel uitdrogen doordat de onderliggende grond min of meer van boven is afgesloten en er geen gewasverdamping optreedt.

Op het talud speelt verder dat deze onder een helling staat, terwijl de scheuren loodrecht op die helling staan. De 'kolommen' grond (pedons) tussen die scheuren kunnen door de zwaartekracht hellingafwaarts vervormen, waarbij enerzijds scheuren worden dichtgedrukt en anderzijds scheuren verder open kunnen gaan staan.

Op een aantal kades zijn scheurpatronen te herkennen die grofweg lijken op de kenmerkende vijf- en zeshoekige patronen die men ziet bij drogend slib of bagger en bij basaltgesteente. Dit duidt op aanbrengen van niet volledig gerijpte grond of bagger, waardoor bij uitdrogen verdere rijping en daarmee gepaard gaande grote scheuren ontstaan. Deze scheuren overheersen dan volledig een onderliggend scheurpatroon van de oorspronkelijke kade. Op de foto's van de inspectie is dit te zien bij de locaties 03, Middelwatering Kwakelweg en locatie 04, Zuidgaag. Bij het veldbezoek van Alterra en Delfland aan de drie nader te onderzoeken locaties werd bij de locatie 3, Commandeurspolder, ook dit typerende scheurpatroon gezien. Een dergelijke niet volledig gerijpte bovenlaag is gevoelig voor deels (oppervlakkig) afschuiven en erosie door afstromend water.

b. Beschrijving optredende fenomenen

Zie hoofdstuk 2: Scheuren door rijping en krimp. Zie inspectierapport en commentaar op inspectierapport.

c. *Krimpgevoeligheid soorten veen en klei. Zowel verticaal als horizontaal. Hierbij moet de relatie met de geometrie en opbouw van de kade worden beschouwd.*

Zie hoofdstuk 2: Scheuren door rijping en krimp en de hoofdstukken met modelberekeningen. De krimpgevoeligheid is een grondeigenschap die afhangt van het vochtgehalte bij circa -30 cm waterkolom, het lutumgehalte en het organischestofgehalte. Hoe hoger elk van die gehalten is, des te krimpgevoeliger is de grond. Het vochtgehalte bij circa -30 cm waterkolom is een maat voor de rijpheid van de grond. Ongerijpte of deels gerijpte grond heeft een hoog vochtgehalte en kan door rijping en krimp nog veel water verliezen en daarbij veel krimpen. De krimp door rijping is irreversibel en de resulterende scheuren zijn permanent. Veel van de krimp is isotroop (alzijdig), alleen dieper in het profiel, waar de grond natter is (en daardoor slapper), de zuigspanningen klein zijn en het eigengewicht een rol gaat spelen, verandert de alzijdige krimp meer en meer naar alleen verticale krimp, waardoor er op die diepte geen krimp- en rijpingsscheuren ontstaan.

d. *Verwachtingen doorgaande ontwikkeling van de scheurvorming in de tijd*

De 'cultuurtechnische' scheurvorming wordt bepaald door rijping en krimp door droogte. Verdergaande scheurvorming is te verwachten als de grond verder uitdroogt dan ooit tevoren. Dit kan verschillende redenen hebben:

- Er treedt een langdurigere en drogere periode op dan ooit tevoren (denk hierbij ook aan klimaatverandering);
- De bewortelingsdiepte van de begroeiing gaat dieper dan eerst (doordat deze begroeiing bijvoorbeeld verandert van gras naar dieper wortelende kruiden, struiken of bomen die steeds groter worden);
- Aanvoer van infiltrerend water vanuit de boezem vermindert (doordat er bijvoorbeeld een afsluitend damwand wordt aangebracht of het boezempeil verlaagd);
- Het freatisch vlak in de kade wordt verlaagd (door bijvoorbeeld het aanbrengen van een sloot langs de teen of het verlagen van het polderpeil of verlaging van de grondwaterstand onderaan de kade door bomen en struiken die steeds groter worden).

e. *Verwachtingen zelfde waarnemingen bij een volgende droogteperiode. Komen dezelfde scheuren terug of worden het vergelijkbare scheuren op/rondom dezelfde locatie*

Vele algemene waarnemingen in de praktijk wijzen er op dat steeds dezelfde scheuren terugkomen en zelfs permanent zijn. Ook bij de veldinspectie door Alterra en Delfland op drie locaties dit voorjaar viel dit weer op. Dit valt te verklaren uit het feit dat grond die in dijken wordt verwerkt bijna nooit volledig bestaat uit gerijpte grond en de grond ook meestal niet echt volledig uitgerijpt is. Droogt die grond sterk uit, dan rijpt deze iets verder en komt bij opzwellen niet volledig terug. De scheur is dan permanent. Zelfs al zou een scheur volledig dichtzwellen of worden opgevuld met grond of tuinaarde, dan nog blijft het een zwakke plek.

f. *Verloop breedte scheuren over de diepte. Hoe kunnen voor het oog niet zichtbare scheuren worden gedetecteerd?*

Krimp en daarmee de breedte van de scheur op een bepaalde diepte wordt gedomineerd door de krimpgevoeligheid van de grondlaag op die bepaalde diepte (zie c) en hoe droog die grond is, Daarnaast wordt met de diepte het eigengewicht van de grond steeds belangrijker (zie c). Bij een weinig krimpgevoelige grond op een krimpgevoelige grondlaag kan de oppervlakkige scheur in de bovenlaag dus minder breed zijn dan daaronder. Er kunnen ook scheuren ontstaan in een krimpende laag onder een (weinig) krimpende en scheurende laag, waardoor de scheur in de krimpende laag onzichtbaar blijft. Bij een min of meer homogene grond met dezelfde krimpgevoeligheid over grotere diepte, zal de scheur in het algemeen met de diepte steeds smaller worden omdat met de diepte de grond meestal vochtiger (minder droog) is en dus minder gekrompen. Door beworteling tot een bepaalde diepte kan de grond tot die diepte sterk zijn uitgedroogd, waardoor tot die diepte de scheurbreedte min of meer constant is, Verder wordt de invloed van het eigengewicht met de diepte steeds groter, waardoor de scheur wordt dichtgedrukt.

Uit de inspectie van drie kades door Alterra en Delfland dit voorjaar blijkt dat scheuren kunnen worden overgroeid door de graszode, waardoor de scheuren onzichtbaar of slecht vindbaar worden. Anderzijds maken muizen gebruik van de scheuren en maken deze groter, waardoor deze beter zichtbaar worden.

Met het detecteren van niet zichtbare scheuren hebben we geen ervaring. Oplossingsrichtingen zouden kunnen zijn infraroodopnamen, grondradar, geluidsgolven. Bedacht moet worden dat krimp zich niet alleen uit in krimpscheuren, maar ook in maaiveldaling (kruindaling). De mate van kruindaling geeft aan dat er een evenredig volume aan scheurvorming optreedt. Ook zullen delen van de kade die sterk uitdrogen (bijvoorbeeld bij bomen) sterker dalen dan de nattere delen (bijvoorbeeld onder een verharding of langs de boezem). Bij een overgang van nattere grond naar drogere grond vormt zich vaak een scheur, waarbij de nattere kant hoger ligt dan de drogere kant.

g. Omschrijving factoren van invloed op het ontstaan en ontwikkelen van scheuren.

De volgende factoren hebben een (grote) invloed op de scheurvorming:

- Krimpgevoeligheid van de grond (zie c)
- Klimaat/weer
- Begroeiing en gewasverdamping
- Bewortelingsdiepte
- Diepte freatisch vlak
- Doorlatendheid grond
- Capillaire opstijging/nalevering
- Beheer (frequentie maaien cq. beweiden)
- Infiltratie vanuit de boezem (wel of geen afsluitende damwand)

De verschillende factoren komen in de diverse hoofdstukken en antwoorden op de vragen uitgebreid aan de orde. Er zal daarom hier niet verder op in worden gegaan. De oriëntatie van het binnentalud heeft weinig invloed op de scheurvorming. De verdroging van een talud op de noordzijde treedt in de tijd gezien enigszins langzamer op.

6.2 FASE C, Beschrijving van mogelijke faalmechanismen

Het zwaartepunt van fase C ligt vooral bij Deltares. Alterra is op een aantal punten vooral aanleverend. In deze fase is vooral ingegaan op de algemene vraag of de scheurvorming kan worden verklaard uit de krimp door uitdroging (Hoofdstuk 4). De algemene conclusie van hoofdstuk 4 is dat de in de praktijk geconstateerde scheuren wat betreft scheurvolumen goed te verklaren zijn uit de modellering.

Verder is ook ingegaan op het effect van bomen (hoofdstuk 3) op veenkades. De conclusie is dat bomen een zeer groot effect kunnen hebben op de uitdroging en scheurvorming van kleikades. Door de rijping en uitdroging van klei en veen neemt de doorlatendheid in het bewortelde deel van de grond zeer sterk toe. De verschillen tussen boomsoorten zijn groot. Wilg en populier kunnen de meeste krimp en rijping veroorzaken.

De specifiek geformuleerde vragen waren:

- a. Hoe verloopt het mechanisme dat leidt tot de scheurvorming?
- b. Tijdseffect. Hoe snel verloopt dit mechanisme?
- c. Hoe is het toekomstperspectief te voorspellen, gegeven het te verwachten neerslagtekort en SPI waarde?

a. Hoe verloopt het mechanisme dat leidt tot de scheurvorming?

Hiervoor wordt verwezen naar de hoofdstukken 2 en 3 en de praktische uitwerking hiervan in de modelleringen in de hoofdstukken 4 en 5.

b. Tijdseffect. Hoe snel verloopt dit mechanisme?

Dit hangt sterk af van de verdamping en neerslag. In hoofdstuk 4 wordt het proces gemodelleerd en wordt ingegaan op het verloop van de krimp en kruindaling. Een kenmerkend verschil tussen de veenkades en de kleikades is dat het proces bij de veenkades veel langer kan doorgaan dan bij de kleikades. Dit komt omdat het veen veel meer water kan leveren en veel meer kan krimpen. Het vermoeden bestaat dat bij veen de graswortels uiteindelijk ook veel dieper gaan wortelen dan in de klei (bij de veenkade in Wilnis was de bewortelingsdiepte ca. 50 cm). Bij de kleikades is op een

gegeven moment de aanvoer via capillaire opstijging maatgevend voor de verdamping. Door de lage waterdoorlatendheid van klei verdroogt uiteindelijk het gras, terwijl bij het veen het gras nog groen blijft en door blijft verdampen (bij Wilnis was het gras nog vitaal en groen).

c. *Hoe is het toekomstperspectief te voorspellen, gegeven het te verwachten neerslagtekort en SPI waarde?*

Klimaatmodellen geven inderdaad aan dat in de toekomst zomers met langere en drogere perioden worden verwacht. Het voorspellen van het toekomstperspectief voor de consequenties voor klei- en veenkades kan goed gebeuren met de modellen die in de hoofdstukken 4 en 5 zijn gebruikt. Daarbij is het wel aan te raden om eerst de resultaten van de modelberekeningen te toetsen en te verifiëren in de praktijk en om meer aandacht te besteden aan de optredende freatische grondwaterstand. Bij de modellering wordt de freatische waterstand nu op een aantal gekozen waarden vastgezet.

Bedacht moet worden dat het toekomstperspectief voor klei- en veenkades sterk verschilt. Zoals aangegeven in het antwoord op vraag b gaat de vochtonttrekking aan de kleikade en daarmee de scheurvorming, naar een limiet doordat een trage aanvoer via de slecht doorlatende klei en uiteindelijk ook het verdrogen van het gras limiterend wordt. Een langere droogteperiode voegt dan weinig toe aan de (diepere) scheurvorming. Bomen en struiken kunnen veel dieper wortelen en veel meer water aan een kade onttrekken dan gras. Een langere en drogere periode kan dan wel een grote invloed hebben op vochtonttrekking en scheurvorming in een kleikade. Daarbij moet ook worden bedacht dat bomen in de loop der tijd steeds groter worden. Een gemiddeld droger klimaat met een gemiddeld dieper freatisch vlak kan bomen extra mogelijkheden voor (diepere) beworteling en exploreren van krimpgevoelige klei- en veenlagen.

Veenkades zijn veel gevoeliger voor klimaatverandering dan kleikades. Door de grote hoeveelheid water in veen kan de begroeiing veel langer doorgaan met de verdamping voordat verdroging optreedt en de verdamping wordt geremd. Ook is de beworteling in veen gemakkelijker en gaat dieper dan in klei. Anders dan bij klei speelt bij veen dat door het uitdrogen het veen zo licht wordt dat de stabiliteit van de kade in gevaar komt en 'opdrijven' een bezwijkmechanisme wordt. Door de klimaatverandering neemt ook de oxidatie van het veen toe. Verwacht wordt dat de oxidatie eind van deze eeuw ongeveer met 75% is toegenomen. Hierdoor neemt niet alleen de omvang en gewicht van de veenkade in de loop der tijd significant af, maar zakt het maaiveld bij de teen van de kade met 1 tot 2 cm per jaar. NB ook bij kleikades heeft de teen in een groot aantal gevallen een bodemprofiel bestaande uit veen of veen met een dunne minerale deklaag, met alle gevolgen van dien voor de stabiliteit en de maaiveldvaling.

6.3 FASE D, Maatregelen ter voorkoming van en reparatie van scheurvorming

Door Delfland zijn voor deze fase D de volgende specifieke vragen gesteld:

- a. Welke maatregelen die in het dagelijks beheer getroffen kunnen worden zijn mogelijk om het ontstaan van scheurvorming te voorkomen of te beperken.
- b. Wat is de meerwaarde van bevochtiging (beregening) tijdens droge perioden. Wat is de meerwaarde van toevoegmiddelen hierbij en welke risico's kent deze maatregel.
- c. Op welke wijze kunnen scheuren worden gedicht en hoe effectief is dit?
- d. Welk type begroeiing en/of plantensoorten en/of gebruik van de droogtegevoelige kade is ongewenst in relatie tot scheurvorming. Welk (maai)beheer moet aangehouden worden en in welke situaties.
- e. Waar dient, vanuit cultuurtechnische invalshoek, op te worden gelet bij inspecties, uitgaande van een nuttig effect van inspecties.

a. *Welke maatregelen die in het dagelijks beheer getroffen kunnen worden zijn mogelijk om het ontstaan van scheurvorming te voorkomen of te beperken.*

Veel kades worden op een bepaald moment opgehoogd of aangevuld. Geconstateerd is dat de grond die hiervoor wordt gebruikt niet altijd geschikt is (zie bijvoorbeeld bijlage 3, locatie 3). Bij het ophogen

moet men een compromis vinden tussen erosiegevoeligheid en scheurvorming. De grond moet in ieder geval zo ver mogelijk gerijpt zijn (rijpingsfactor nabij de 0,7). Bagger is in de meeste gevallen bij lange na niet zo ver gerijpt als wenselijk is en moet eigenlijk per definitie niet worden gebruikt. Hoe minder lutum en organische stof in het ophoogmateriaal zit, des te minder rijping en krimp zal optreden. Vooral een laag organische -stofgehalte is van groot belang. De in de voorschriften toegelaten maximale 5% organische stof is aan de hoge kant.

Andere maatregelen (beregening, maai- en weidebeheer en begroeiing) staan in de vragen b en d en worden daar beantwoord.

b. Wat is de meerwaarde van bevochtiging (beregening) tijdens droge perioden. Wat is de meerwaarde van toevoegmiddelen hierbij en welke risico's kent deze maatregel.

Met tijdige beregening kan ernstige scheurvorming worden voorkomen. Bedenk wel dat de scheuren op zich al aanwezig zijn. De beregening heeft vooral als effect dat extreme scheurvorming wordt voorkomen, dat het gewicht van de kade op peil blijft en de begroeiing niet verdord. Bij de aanwezigheid van bomen wordt voorkomen dat de bomen dieper gaan wortelen en nieuwe, nog niet volledig gerijpte bodemlagen gaan exploiteren. Vooral als deze diepere bodemlagen bestaan uit zware klei of veen, kunnen bij bomen en struiken grote zakkingen en extra brede en diepe scheuren ontstaan. Het als het ware door beregening of bevloeiing opvullen van de 'deuk' in de grondwaterstand kan de diepergaande beworteling stoppen en er voor zorgen dat krimpgevoelige lagen niet worden uitgedroogd.

Uit de modelberekeningen blijkt dat in droge tijden het gras te weinig water heeft om de potentiële verdamping te halen. Extra water gaat dus in eerste instantie altijd naar het gras, als het tenminste in de bodemmatrix van de wortelzone kan infiltreren en niet door afstroming of preferent transport via scheuren snel uit de bereikbaarheid van het gras verdwijnt. Kenmerkend voor dijken is dat het water dat verticaal in de scheuren infiltreert vervolgens via het netwerk van scheuren preferent onder een helling ondergronds het talud afstroomt. Beregenen met een lage intensiteit over langere periode, waarbij het water de kans krijgt om in de grond zelf (de matrix) te worden opgenomen ('opgezogen') is dus veel effectiever dan incidenteel in korte tijd veel water aanbrengen met bijvoorbeeld een brandslang vanaf een boot op de boezem. Dit laatste zal bovendien vaak gebeuren als de droogte al enige tijd heeft aangehouden. De grond is dan al sterk gescheurd en waarschijnlijk hydrofoob (waterafstotend), waardoor deze zeer moeilijk te bevochtigen is. Beregening om dan nog de grond nat te krijgen en scheuren laten dicht zwellen is dan een illusie. Preventief beregenen om ernstige scheurvorming en extreme uitdroging te voorkomen is mogelijk, maar moet tijdig en met een zeer hoge (onhaalbare?) discipline worden uitgevoerd en volgehouden. Uit verschillende proeven blijkt dat toediening van middelen om de hydrofobie te voorkomen of op te heffen effectief zijn (zie o.a. de bijlagen 1 - 3 in Stowa rapport 2004-39 'Onderzoek naar maatregelen voor versnelde herbevochtiging van verdroogde veenkades en vertraagde verdroging van veenkades'). De gebruikte middelen zijn niet schadelijk voor mens, bodemleven of het milieu en zijn niet nadelig voor de stabiliteit van de dijk.

Alleen zeer intensieve en langdurige beregening van een dijk zou theoretisch enig risico kunnen opleveren. Zoals eerder aangegeven is een zeer intensieve beregening met grote hoeveelheden water niet effectief en zou niet moeten worden toegepast. Gebeurt dit toch, dan zou theoretisch erosie kunnen optreden. De erosiegevoeligheid van de grond is echter al laag en zeker klei wordt door uitdroging meer erosiebestendig. Door grote hoeveelheden water op een kade te pompen zou theoretisch een verticale lengtescheur in de kruin kunnen vollopen, waardoor een horizontale hydrostatische druk op de scheurwand wordt uitgeoefend, wat op zich een bestaand bezwijkmechanisme kan opwekken (zie rapportage Deltares). Omdat de scheurwand zeker niet volledig ondoorlatend is, moet zijn grote hoeveelheden water nodig en een voortdurende aanvoer. Een dergelijke (domme) actie wordt onwaarschijnlijk geacht.

c. Op welke wijze kunnen scheuren worden gedicht en hoe effectief is dit?

De inspectie van de scheuren tijdens het veldbezoek (zie bijlage 3) liet zien dat het vullen van de scheuren met potgrond slechts tot zeer geringe diepte was gelukt en weinig effectief was. Ditzelfde bleek te gelden voor het frezen van de scheuren.

Bedacht moet worden wat het doel van het opvullen van de scheuren is. Repareren in de zin dat weer een bepaalde sterkte kan worden overgebracht lijkt ons een onbegonnen zaak, omdat een hechting realiseren tussen het breukvlak en het opvulmateriaal moeilijk lijkt. Krimpscheuren zijn ook geen constructieve scheuren die wijzen op beginnen van bezwijken. Wel creëren de scheuren ruimte voor verschuivingen in de kade. Zo zouden diepe scheuren onderaan het talud ruimte kunnen scheppen voor het afschuiven van een bovenlaag. Opvullen van de scheur zou dit dan kunnen voorkomen. Uit de waarnemingen blijkt echter dat dit in de praktijk niet goed lukt (zie bijlage 3). Opvullen van een scheur in de kruin zal de kade niet steviger maken. Verder kan door het volledig opvullen van een krimpscheur bij het opzwellen horizontale krachten worden opgeroepen, die een scheur juist in de diepte doet uitbreiden.

Opvullen lijkt zinvol te zijn om de instroom van water in de scheur sterk te beperken om te voorkomen dat piping optreedt of de scheur volledig met water wordt gevuld en een horizontale belasting op de scheurwand uitoefent. Uit de waarnemingen (bijlage 3) blijkt dat het volledig vullen van een scheur met teeltaarde in de praktijk in ieder geval bij deze gevallen niet goed is gelukt. Door zeer zorgvuldig de scheur te vullen tot een diepte van ca. 30 - 50 cm of de scheur tot deze diepte open te frezen en te vullen zou de infiltratie de scheur in de *bypass* van water aan de wortelzone al sterk kunnen worden verminderd. Het vulmateriaal moet dan niet te doorlatend zijn: bijvoorbeeld een mengsel van fijn zand en turf/tuinaarde. Het dichtzwellen hoeft dan waarschijnlijk ook geen probleem te zijn omdat het materiaal in de scheur zowel naar onderen verder de scheur en boven uit de scheur kan worden geperst. De veldwaarnemingen (bijlage 3) lieten zien dat de graszode over de scheur groeit. Wellicht bevordert je dat door vullen van de scheur. Er zijn misschien wel meer mogelijkheden om scheuren op te vullen, maar dit zou proberenderwijs moeten worden uitgezocht.

d. Welk type begroeiing en/of plantensoorten en/of gebruik van de droogtegevoelige kade is ongewenst in relatie tot scheurvorming. Welk (maai)beheer dient aangehouden te worden en in welke situaties.

Gras is min of meer het ideale gewas op een veen- of kleikade. De bewortelingsdiepte is van nature beperkt en daardoor worden diepere lagen niet beworteld en uitgedroogd. Een gesloten grasmat is bovendien zeer erosiebestendig. Voorkomen moet worden dat zich diepwortelende gewassen op een kade vestigen. Bomen en struiken kunnen een kade sterk uitdrogen en grote zakkingen en scheuren veroorzaken. De doorlatendheid van de door boomwortels gerijpte grond is zeer hoog, onder ander door de vele krimpscheuren.

In hoofdstuk 5 is nader ingegaan op weide- of maai-beheer. Voor veenkades blijkt weidebeheer de beste oplossing te zijn om de verdamping te beperken. Bij de kleikade blijkt het verschil tussen weidebeheer en maai-beheer slechts gering te zijn. Het voornaamste is dat kort houden van het gras de verdamping het meest beperkt. Dit voorkomt ook dat andere plantengroei een kans krijgt. Wel wordt de erosiegevoeligheid bij kort gehouden gras groter. Er zal daarbij een compromis moeten worden gezocht tussen de beperking van de verdamping en de erosiegevoeligheid.

Een gezonde grasmat met een dichte beworteling is zowel voor erosiebestendigheid als voor gelijkmatige infiltratie van neerslagwater gunstig. Een dichte graszode remt oppervlakkige afstroming en daarmee verlies van water voor vernatten van het dijkmateriaal. Het nut van beregening zou daarom wel eens vooral gelegen kunnen zijn in het onderhouden van de grasmat.

e. Waar dient, vanuit cultuurtechnische invalshoek, op te worden gelet bij inspecties, uitgaande van een nuttig effect van inspecties.

Als het duidelijk is dat het een krimpscheur is en niet een bezwijkscheur, zou de aandacht veel meer moeten uitgaan naar mogelijke lekkage van de kade. De krimpscheuren vormen wegen voor preferente stroming van water. De kans dat de kade gaat lekken en op die manier door interne erosie gaat bezwijken is waarschijnlijk veel groter dan bezwijken door afschuiven langs een glijcirkel. Lekwater zal zich hoogstwaarschijnlijk vooral verzamelen bij de teen van de kade. Er zou dus meer op de teen van de kade moeten worden gelet om te zien of daar natte plekken gaan optreden. Vooral bij bomen of waar vroeger bomen hebben gestaan kunnen problemen gaan optreden.

Een bijzonder aandachtspunt vormt de eventuele aanwezigheid van water in een langsscheur in veelal de kruin. Dit wijst op een kortsluiting tussen deze langsscheur en de boezem. Zoals aangegeven in de rapportage van Deltares vormt dit potentieel een bezwijkmechanisme door de hydrostatische druk die op de scheurwand wordt uitgeoefend. Dit bezwijkmechanisme kan verder worden geïnitieerd door hevige regenval, waardoor de scheur met toestromend regenwater (verder) wordt gevuld. Een ernstige situatie kan ontstaan als door hevige regenval het boezempeil met decimeters stijgt. Via scheuren in de onverzadigde zone op de kruin en via eventuele diergangen kan dan een kortsluiting tussen het verhoogde boezemwater en de langsscheur ontstaan, waardoor het door Deltares beschreven bezwijkmechanisme kan optreden. Kortsluiting is extra gevaarlijk, omdat, in tegenstelling tot de situatie met hevige regenval, bij kortsluiting water kan blijven toestromen om eventuele 'lekkage' van de scheur via dwarse zijscheuren te compenseren. Op deze manier kan een hoge hydrostatische druk op de scheurwand worden opgebouwd.

Wat betreft de algemene opzet van de inspectie van de kades zou meer aandacht moeten worden besteed aan grondwaterstanden in de kade (het freatisch vlak) en aan de grondslag. Beide bepalen in hoge mate de scheurgevoeligheid en de diepte van de scheur. Daarnaast zou meer naar scheurdiepten en bewortelings-diepten moeten worden gekeken. Op deze manier zou de gevoeligheid van de kade voor scheurvorming in het algemeen, maar vooral voor diepe scheurvorming, kunnen worden vastgesteld. Delen van de kades die voor wat betreft diepe scheurvorming weinig gevoelig zijn, zouden dan minder intensieve inspectie behoeven en de aandacht zou zich meer kunnen concentreren op de gevoelige kades.

7 Conclusies en aanbevelingen

7.1 Conclusies

Hier worden vooral algemene conclusies vermeld. In de beantwoording van de vragen in hoofdstuk 6 worden de conclusies verder geïnterpreteerd.

De grote vochtonttrekking door het gras die wordt gehaald bij de modellering van de theoretische dijken door de grote worteldiepte en grote compensatie voor droogtestress, wordt bij de werkelijke dijken niet gehaald. Reden is de geringere worteldiepte en compensatie voor droogtestress bij de werkelijke dijken. Een 'werkelijke' veenkade is niet doorgerekend, maar de 'theoretische' veenkade is feitelijk een werkelijke veendijk (namelijk de Middelburgsekade) met een voor een veenkade realistische, normale bewortelingsdiepte van het gras van circa 50 cm.

De maximale scheurbreedte aan maaiveld ligt voor zowel de theoretische dijken als de werkelijke kleidijken in de orde van 5-7 cm per meter dwarse breedte. Het verschil tussen de beide soorten dijken is de ontwikkeling van de scheurbreedte in de diepte die bij de veel drogere theoretische dijken veel groter is. De scheurbreedte is bij de veenkade aanmerkelijk groter dan bij de kleikades, namelijk aan maaiveld maximaal circa 11 cm en op circa 30 cm diepte bijna 20 cm per meter dwarse breedte.

Bij de middelzware en zware klei concentreert de krimp zich bovenin het profiel en bereikt daar zijn maximum. Dit beperkt in eerste instantie de scheurdiepte. Bij een diepe freatische grondwaterstand en voortgaande uitdroging wordt de scheurdiepte uiteindelijk toch nog groot.

Hoe zwaarder de klei, hoe groter de krimp. Veen krimpt echter nog beduidend meer dan de zwaarste klei.

Bij een droog voorjaar kan bij een kleikade al vroeg een scheurbreedte worden bereikt die slechts weinig kleiner is dan de maximale scheurbreedte in een zeer droog jaar.

Uit een vergelijking tussen gemodelleerde en gemeten krimp in 2011 bij Locatie 99 blijkt globaal gezien dat de overeenkomst redelijk goed is. Voor een betere toetsing van de modellering ten opzicht van de realiteit zijn echter meer en gedetailleerdere metingen noodzakelijk, waarbij de scheurbreedte in de diepte en de onderlinge afstand tussen de scheuren moeten worden opgemeten. Ook zal de diepte van het freatisch vlak en van de beworteling goed moeten worden vastgesteld.

De invloed van een helling en de richting van die helling ten opzichte van het zuiden op de grasverdamming blijkt vrij beperkt te zijn. Alleen een helling richting het noorden resulteert in significant minder verdamping en uitdroging van het profiel. Bij langere droogte is op een gegeven moment de verdamping bij het zuidtalud geremd en bereikt het noordtalud uiteindelijk eenzelfde verdroging als het zuidtalud.

De verschillen in uitdroging van de kleikades zijn bij de verschillende beheervarianten voor het gras minimaal, dus het is de vraag of hierin veel energie moet worden gestoken. Een grasbeheer waarbij wordt gestreefd naar het zo kort mogelijk houden van het gras door frequent maaien of beweiden levert de minste verdamping op en verdroging van de kleikade. Het gras wordt hierdoor wel erg kwetsbaar en zal snel verdrogen. Voor de verdamping is dit gunstig, echter voor de erosiebestendigheid ongunstig. Men moet dus een compromis vinden tussen de beperking van de verdamping en de erosiebestendigheid van de kade.

Een boom op een kleikade veroorzaakt veel diepere en in de diepte veel bredere scheuren dan een grasbedekking. Bij een boom is een duidelijk kortere periode van droogte nodig om het profiel sterk uit te drogen en de maximale scheurbreedte te bereiken. Bij Locatie 98 werd in het droge voorjaar van

2011 al dezelfde scheurbreedte bereikt als in het extreem droge jaar 1976. Om deze reden moet extra aandacht worden besteed aan bomen op een kade.

Een lange lengtekrimpscheur in de kruin van de kade, die zich kan vullen met water door hevige regenval of kortsluiting tussen het boezemwater en de scheur, maakt een bezwijkmechanisme mogelijk dat is aangedreven door de horizontale waterdruk op de scheurwand. Een groot gevaar is dan ook verhoging van het boezemwaterpeil door hevige regenval, waardoor dwarse scheuren en diergangen in de onverzadigde zone op de kruin kortsluiting tussen boezemwater en lengtescheur kunnen veroorzaken.

7.2 Aanbevelingen

Het onderzoek heeft zich vooral toegespitst op kleikades. Dezelfde aandacht zou ook moeten worden besteed aan veenkades.

Het veldbezoek heeft veel inzicht opgeleverd, terwijl dit in het oorspronkelijke projectplan niet was gepland. Aanbevolen wordt om bij meer locaties dergelijke en zelfs intensievere veldonderzoeken te doen.

Momenteel worden scheurbreedten gegeven in cm per dwarse meter, omdat niet goed bekend is hoe deze scheurbreedte zich verdeelt. Aanbevolen wordt om dit in de praktijk nader te onderzoeken.

Het was opvallend hoe weinig feitelijk bekend is over de bovenste 1 tot 2 m grond bij de kades. Ook het freatisch vlak was slecht bekend. Voor de scheurvorming en de modellering daarvan zijn deze gegevens essentieel. Aanbevolen wordt om dit beter te onderzoeken en te inventariseren. Bij de meest kwetsbare kades, die bij de DIGInspectie de ernstigste scheuren vertonen, wordt dit sterk aangeraden.

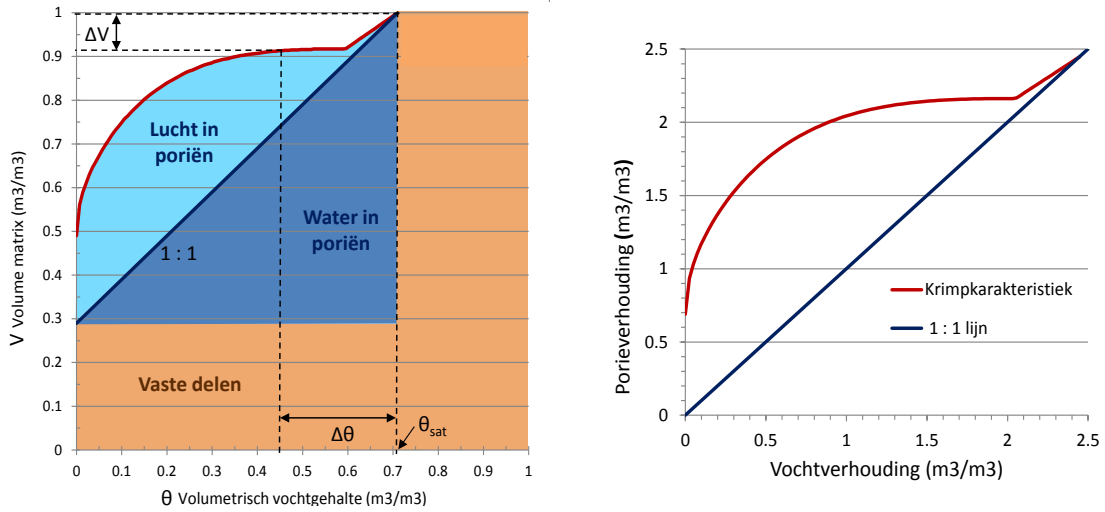
Aanbevolen wordt om meer aandacht te besteden aan bomen op kades, kortsluiting tussen lange langs-scheuren en boezemwater, natte plekken aan de teen van de kades, scheuren en holen in de (on)verzadigde zone in de kruin en verhoging van het boezempeil bij hevige regenval.

Referenties

- Akker, J.J.H. van den, 2001. Een inventarisatie van bodemfysische materiaalmodellen zoals toegepast in het landbouwkundig onderzoek. Rapport Delft Cluster samengesteld door Alterra, Research Instituut voor de Groene Ruimte, Wageningen, 47 blz.
- Akker, J.J.H. van den, J. Beuving, R.F.A. Hendriks en R.J. Wolleswinkel, 2007a. 5510 Maaiveldaling, afbraak en CO₂ emissie van Nederlandse veenweidegebieden, Leidraad Bodembescherming, afl. 83. Sdu, Den Haag, 32 p.
- Akker, J.J.H. van den, T. Hoogland, H.A.M. Hakvoort, A. Roelevink en A.A. Veldhuizen, 2011. Verbetering watersysteemmodellering: Kleischeuren. Rapport HKV-LIJN IN WATER PR2049. 62 p.
- Akker, Jan J.H. van den, Tom Hoogland, Hans Hakvoort en Frederik Stoppelenburg, 2011. Berging in kleischeuren in de Flevopolders. *Stromingen* 16 (2011), nummer 3, blz. 15 – 31.
- Bakker, J.W., 1992. Techniques to promote plant growth applied to urban sites. In: H.J.W. Verplancke et al. (eds.). *Water saving techniques for plant growth*. Kluwer Ac. Pub., pp. 223,228.
- Bakker, J.W., J.J.H. van den Akker, P. Cornelissen en D. Boels, 1995. Oorzaak en preventie van schade aan wegen door vochtonttrekking door bomen. Wageningen, DLO-Staring Centrum. Rapport 318. 104 p.
- Bartholomeus, R., 2004. Implementation of a global radiation routine in SWAP and its application to inclined surfaces. Thesis MSc Hydrology and Water Quality at Wageningen University.
- Bronswijk, J.J.B. en J.J. Evers-Vermeer, 1987. Krimpkaracteristieken van kleigronden in Nederland. Wageningen, ICW-rapport 22. 58 p.
- Bronswijk, J.J.B. en J.J. Evers-Vermeer, 1990. Shrinkage of Dutch clay soil aggregates. *Netherlands Journal of Agricultural Science* 38: 175-194.
- Dam, J.C. van, P. Groenendijk, R.F.A. Hendriks en J.G. Kroes, 2008. Advances of modeling water flow in variably saturated soils with SWAP. *Vadose Zone J.*, Vol.7, No.2: 640-653.
- Grontmij Advies & Techniek, 2002. Grond voor kades. Praktijkonderzoek naar de ontwikkeling van fysische kwaliteitseisen voor grond in boezemkades. STOWA-rapportnr 2002-38, Utrecht.
- Hendriks, R.F.A., 2004. An analytical equation for describing the shrinkage characteristics of peat soils. In J. Päivänen (Ed.) *Wise use of Peatlands, Proceedings of the 12th International Peat Congress*, Tampere, Finland.
- Hendriks, R.F.A., J.J.H. van den Akker en E.W.J. Hummelink, 2008. Inverse modellering van verticale-infiltratieproeven op de Waddenzeedijk bij de Boonweg. Modelsimulaties van veldmetingen aan de verticale doorlatendheid van de Waddenzeedijk bij de Boonweg en aanvullende laboratorium-metingen aan monsters van deze dijk, ter verkrijging van parameters voor modellering van overslagproeven op de dijk. Alterra-rapport 1833.
- Kim, D.J., 1992. Characterization of swelling and shrinkage behaviour, hydraulic properties and modelling of water movement in a physically ripening marine clay soil. PhD thesis, Catholic University Leuven.
- Kroes, J.G., J.C. Van Dam, P. Groenendijk, R.F.A. Hendriks ennd C.M.J. Jacobs, 2008, SWAP version 3.2. Theory description and user manual, Report 1649, Wageningen UR, Alterra, Wageningen.
- Lankelma Geotechniek Zuid, 2008. Kades Duifpolder te Maasland, resultaten terreinonderzoek. Rapport 56409.
- Mos Grondmechanica, 2008. Het onderzoeken en toetsen van 9 km boezemkade, verdeeld over 6 kadestrekkingen te Maasland, Schipluiden, Vlaardingen – Duifpolder. Rapport R019608-RH_3.
- Mos Grondmechanica, 2013. Onderzoek op 3 locaties: 1. Middelwatering, 2. Vlaardingevaart, 3. Berkelsche Zweth te Maasland, Schipluiden, Rotterdam. Rapport RG1301271-RH_1.
- Oostindie, K., J. G. Wesseling, R.F.A. Hendriks, J. Coen, J. Ritsema en J.J.H. van den Akker, 2012. Effecten van beheersmaatregelen op vochtgehalten bij uitdrogende veendijken. Alterra. Notitie Alterra.
- Pons, L.J. en I.S. Zonneveld, 1965. Soil ripening and soil classification. ILRI publ. no. 13. Wageningen.
- Ponsteen, W., 2013. Gedrag verdroogde veenkades - Analyse droogte inspectie. Rapport Hoogheemraadschap van Delfland.

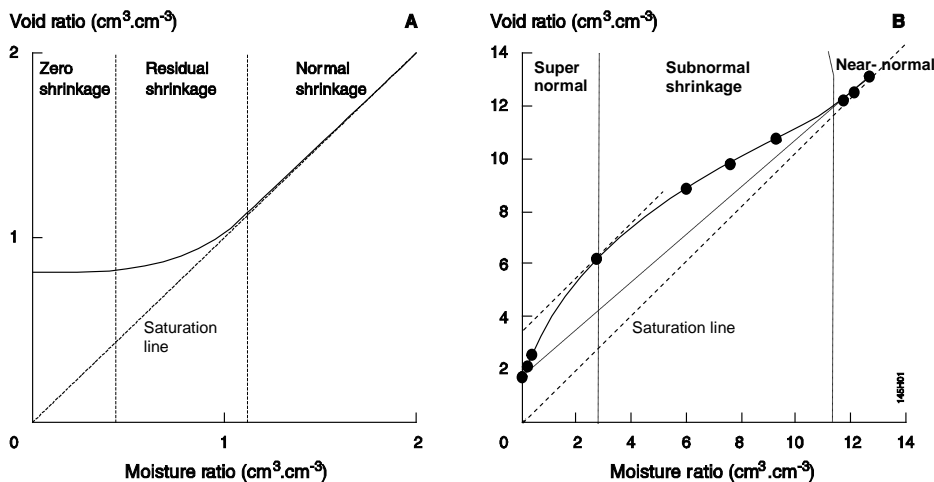
-
- Pleijter, M. en J.J.H. van den Akker, 2005. Bodemkarakteristieken van verdroogde veenkades; meetgegevens, interpretatie en schematisatie van dwarsprofielen. Toelichting bij een Excel-database geleverd aan GeoDelft. Kenmerk 05/ALT440/AKR/VKL. Samengesteld door Alterra, Wageningen.
- Rijniersce, K., 1983. Een model voor de simulatie van het fysische rijpingsproces van gronden in de IJsselmeerpolders. Proefschrift Wageningen; Van Zee tot Land no. 52. 156 blz.
- Salm, C. van der, J. Dolfing, J.W. van Groenigen, M. Heinen, G. Koopmans, J. Oenema, M. Pleijter en A. van den Toorn, 2006. Diffuse belasting van oppervlaktewater met nutriënten uit de veehouderij; Monitoring van nutriëntenverliezen uit grasland op zware klei in Waardenburg. Wageningen UR, Alterra, Rapport 1266, Wageningen, 104 pp.
- Smelt, J.H., R.F.A. Hendriks, L.J.T. van der Pas, A.M. Matser, A. van den Toorn, K. Oostindie, O.M. van Dijk-Hooijer, J.J.T.I. Boesten en R.P. Scorza Jr., 2003. Transport of water, bromide ion, nutrients and the pesticides bentazone and imidacloprid in a cracking, tile drained clay soil at Andelst; Report 289, Wageningen UR, Alterra, Wageningen, 213 pp.
- Steur, G.G.L. en W. Heijink, 1991. Bodemkaart van Nederland 1 : 50 000. Algemene begrippen en indelingen. Staring Centrum, Wageningen.
- Tiktak, A., J.J.T.I. Boesten, R.F.A. Hendriks en A.M.A. van der Linden, 2010. Losses of plant protection products from tile-drained soils in the Netherlands. Development of a PEARL scenario. RIVM Report 607407003/2010. Bilthoven.
- Wösten, J.H.M., G.J. Veerman, W.J.M. de Groot en J. Stolte, 2001. Waterretentie- en doorlatendheidskarakteristieken van boven- en ondergronden in Nederland: de Staringreeks. Vernieuwde uitgave 2001. Wageningen UR, Alterra, Rapport 153, Wageningen
- Zuur, A.J., 1958. Bodemkunde der Nederlandse bedijkingen en droogmakerijen. Deel C. Het watergehalte, de indroging en enkele daarmee samenhangende processen. Colledictaat LUW - Wageningen.

Bijlage 1 Krimpcharacteristieken



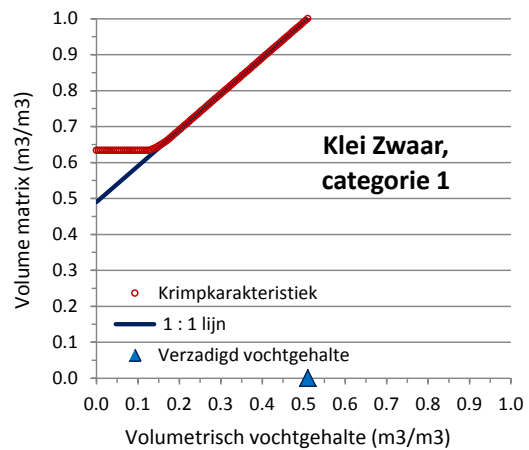
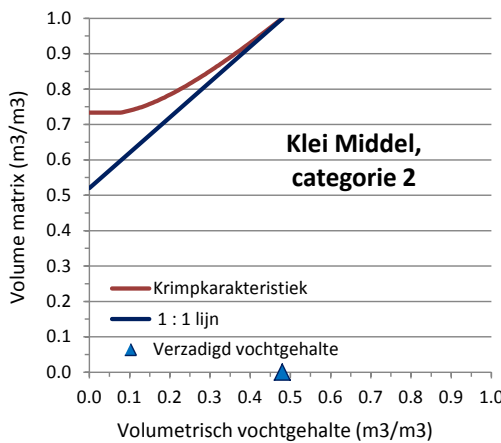
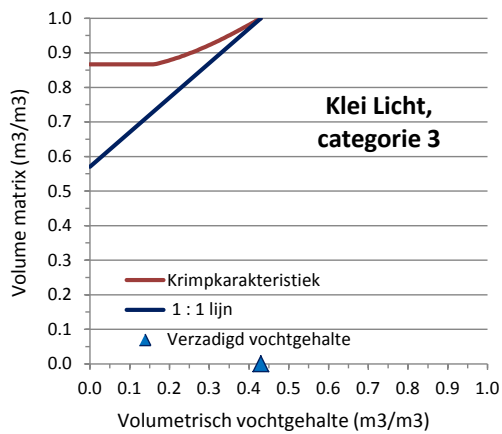
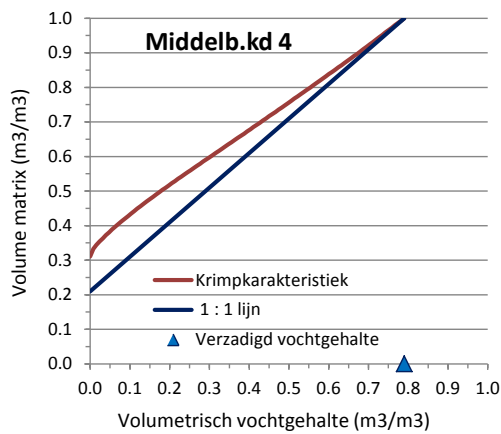
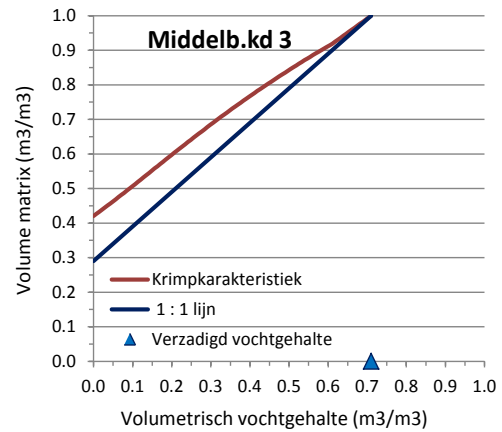
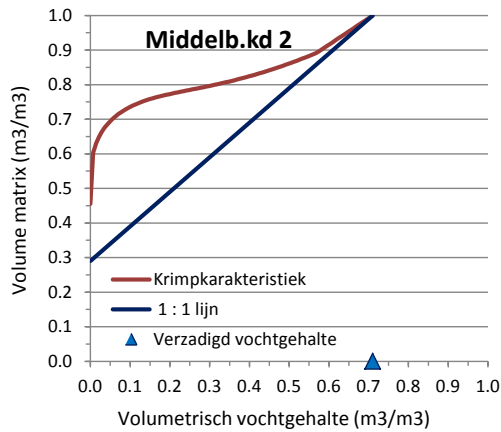
Twee wijzen van weergeven van de krimpcharacteristiek van **Middelburgsekade 1**: rechts de meest gebruikelijke wijze met porieverhouding uitgezet tegen vochtverhouding, Vochtverhouding is het volume vocht ten opzichte van het volume van de vaste delen en porieverhouding is het volume van poriën ten opzichte van het volume van de vaste delen. Links een meer toegankelijke wijze waarbij het relatieve volume van de bodemmatrix is uitgezet tegen het vochtgehalte relatief ten opzichte van het volume van de bodemmatrix bij verzadiging ($\theta = \theta_{\text{sat}}$). Hierin is ΔV de vermindering van het relatieve volume, de relatieve krimp dus, als gevolg van een vermindering van het bodemvocht met $\Delta\theta$.

Krimpcharacteristieken van klei (A) en veen (B) verschillen sterk. Beide vertonen drie stadia van krimp (uit: Hendriks, 2004), Normal shrinkage, of normale krimp is het stadium waarbij 1 volume-eenheid vochtverlies gelijk is aan 1 volume-eenheid porieverlies. Venige klei en kleilig veen hebben krimpcharacteristieken die liggen tussen die van klei en veen.



Krimpkaracteristieken gebruikt in de modellering weergegeven op de meer toegankelijke wijze.

Nummers verwijzen naar de profieldelen van de kolommen van figuur 1, Middelburgsekade 1, zie vorige pagina.



Bijlage 2 Textuurindeling in de bodemkunde (Steur en Heijink, 1991)

De korrelgrootteverdeling wordt uitgedrukt in massaprocenten van een aantal slib- en zeeffracties, berekend "op de minerale delen". Daaronder verstaat men het over een 2 mm zeef gezeefde en bij 105° C gedroogde monster, na verwijdering van de aanwezige organische stof en koolzure kalk. Bij de indeling worden drie z.g. hoofdfracties onderscheiden:

- de lutumfractie: fractie < 2 μm (<0,002 mm)
- de siltfractie: fractie 2-50 μm (0,002-0,05 mm)
- de zandfractie: fractie 50-2000 μm (0,05-2 mm)

} 100% "minerale delen"

De fractie die groter is dan 2000 μm (2 mm) wordt grind genoemd.

Niet-eolisch materiaal (o.a. rivier- en zeeklei) met meer dan 8% lutum en in enkele gevallen ook met minder dan 8% lutum, wordt ingedeeld en benoemd naar het lutumgehalte (tabel 1). Bij gronden met een abnormaal hoog zandgehalte wordt de term *zandig* vóór de naam van de lutumklasse gevoegd; is het siltgehalte bijzonder hoog, dan wordt de term *siltig* voorgevoegd.

Tabel 1 *Indeling en benaming naar het lutumgehalte*

% lutum	naam	samenvattende naam	
0 - 5	kleiarm zand	}	zand ¹
5 - 8	kleiig zand		
8 - 12	zeer lichte zavel	} lichte zavel	} zavel
12 - 17,5	matig lichte zavel		
17,5- 25	zwارة zavel		
25 - 35	lichte klei	} zware klei	} klei
35 - 50	matig zware klei		
50 -100	zeer zware klei		

¹ Tevens meer dan 50% zandfractie (50-2000 μm).

Materiaal dat *door de wind* is afgezet, in hoofdzaak dus duinzand, dekzand en löss, wordt ingedeeld naar het leemgehalte (tabel 2). Ook voor andere grondsoorten met een betrekkelijk laag lutumgehalte, al zijn het geen windafzettingen, wordt meestal de indeling naar het leemgehalte gebruikt.

Tabel 2 *Indeling en benaming naar het leemgehalte*

% leem	naam	samenvattende naam	
0 - 10	leemarm zand	} lemig zand	} zand ¹
10 - 17,5	zwak lemig zand		
17,5- 32,5	sterk lemig zand		
32,5- 50	zeer sterk lemig zand		
50 - 85	zandige leem	}	} leem
85 -100	siltige leem		

¹ Tevens minder dan 8% lutum.

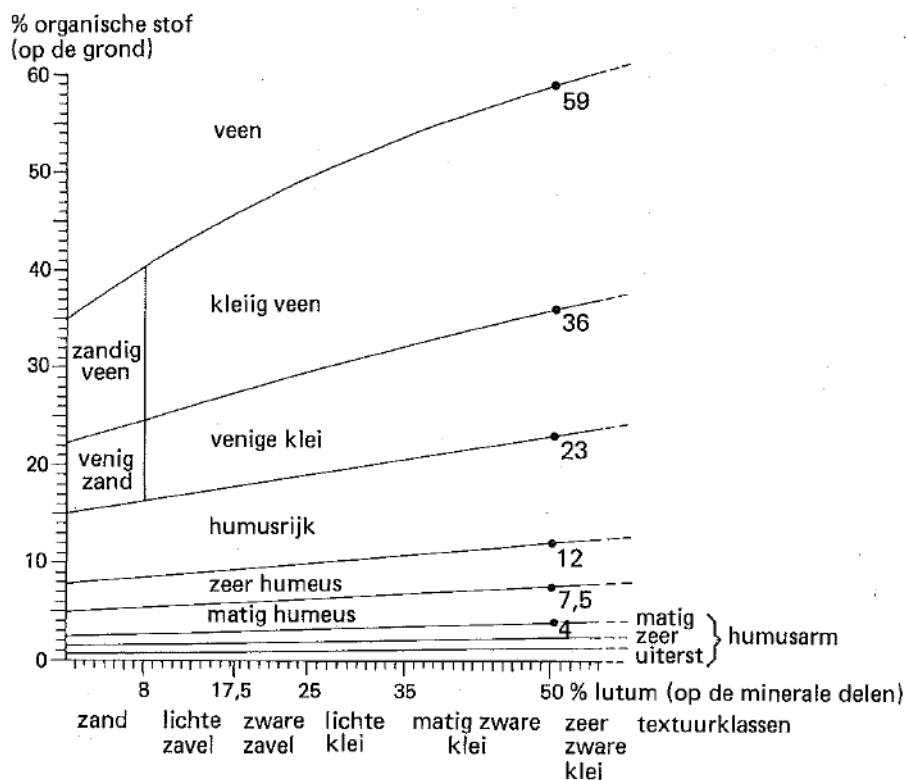
De *grofte* van het zand wordt met de mediaan van de zandfractie (M50) aangegeven (tabel 3). Dat is die korrelgrootte waarboven en waarbeneden 50% van de massa van de zandfractie (50-2000 μm) ligt.

Tabel 3 Indeling en benaming naar de mediaan van de zandfractie

M50 tussen	naam	samenvattende naam
50 en 105 μm	uiterst fijn zand	} fijn zand
105 en 150 μm	zeer fijn zand	
150 en 210 μm	matig fijn zand	
210 en 420 μm	matig grof zand	} grof zand
420 en 2000 μm	zeer grof zand	

Veengronden: indeling naar het gehalte aan organische stof

De indeling van veengronden berust op de massafractie organische stof berekend op de grond en op het lutumgehalte berekend op de minerale delen. Men spreekt ook wel van het humusgehalte.



veen¹
zandig veen²
kleiig veen²
venig zand²
venige klei²

} moerig

humusrijk
zeer humeus
matig humeus
matig humusarm
zeer humusarm
uiterst humusarm

} mineraal³

¹ geen indeling naar textuur

² geen verdere indeling naar textuur

³ textuurindeling volgens tabel 1 of 2

Bijlage 3 Veldbezoek Delfland, onderzoek verdroogde kades

B3.1 Verslag bezoek Delfland, in verband met gedrag van verdroogde kades.

*Joep Frissel (Alterra, Wageningen Universiteit en Researchcentrum)
Mei 2012*

Inleiding

Het waterschap Delfland heeft een selectie gemaakt van drie kleikaden (kleikade op ondergrond van veen); het gaat om de Duivenpolder, Schieveen en de Commandeurspolder. Het Waterschap heeft Alterra gevraagd een snelle inventarisatie van de erosiebestendigheid en van de diepte van doorworteling van de grasmat op deze drie locaties uit te voeren.

Werkwijze

Op 8 mei 2013 hebben we drie locaties in de regio van Waterschap Delfland bezocht, samen met Wim Ponsteen van het Waterschap. De locaties zijn op vooral visueel beoordeeld. Er is gekeken naar het percentage bedekking van de vegetatie, aanwezigheid van ruigtesoorten en sporen die duiden op de aanwezigheid van mollen of muizen. Er is ook gekeken naar het percentage kruiden in de vegetatie, en is – als het is waargenomen - mos genoteerd. De structuur van de zode is vastgesteld, en grote en kleine open plekken zijn genoteerd. Als laatste is de doorworteling van de zode bepaald volgens de manier beschreven in het Voorschrift Toetsen op Veiligheid. (VTV, 2007).

Resultaten

Hieronder zijn de genoteerde parameters weergegeven.

Dijk 1

Polder Schieveen, locatie Delfland 99, binnentalud.



Foto 1 *Overzicht locatie Schieveen.*

De dijk ziet er groen uit en de zode is aaneen gesloten. Het waterpeil in de boezem is hoog. Er zijn opvallend veel sporen en gaten/holletjes van mollen en/of muizen waargenomen rondom de locatie waar de vroegere scheur gelopen heeft. Het gaat om een lengte van circa 150 meter. De scheur is opgevuld.



Foto 2 Spoor van gaten in de lengterichting van de dijk, ter hoogte van de oude scheur.

De dijk wordt beweide met schapen, er zijn zowel dwars- als lengtescheuren zichtbaar. Aangenomen wordt dat dit droogtescheuren zijn, omdat het enkele weken niet noemenswaardig geregend heeft. De zode heeft een bedekking van 80%. 20% is bedekt door kruiden. De ruigte soort Akkerdistel is waargenomen. Wortels werden waargenomen tot minimaal 30 centimeter diepte. De doorworteling is op basis van drie steken (VTV, 2007) over de gehele diepte tot 20 cm goed, echter na 25 cm diepte in zeer kleine hoeveelheden.



Foto 3 Doorworteling tot circa 30 cm diepte

Op de dijk komt het vegetatietype soortenarme Kamgrasweide voor, met onder andere Engels raaigras (*Lolium perenne*), Kweek (*Elytrigia repens*), Straatgras (*Poa annua*), Rood zwenkgras (*Festuca rubra*) en Kroppaar (*Dactylus glomerata*). Verder komen er enkele kruiden voor.



Foto 4 Lengtescheur van circa 25 cm lang.

Dijk 2

Duifpolder, locatie Delfland 98, boven op de dijk.



Foto 5 Overzicht Duifpolder, locatie Delfland 98.

De dijk ziet er op het dijktalud groen en vrij ruig uit, de zode is pollig, maar aaneen. Bovenop oogt de dijk vrij kaal. Over de dijk loopt een wandelpad (NS-wandelroute). Het waterpeil in de boezem is hoog. De dijk (talud) wordt waarschijnlijk twee keer per jaar gehoid. Bovenop de dijk zijn lengtescheuren zichtbaar, aangenomen wordt dat dit droogtescheuren zijn, omdat het enkele weken niet noemenswaardig geregend heeft. De bovenzijde van de dijk heeft een vegetatieve bedekking van 70%, waarvan 10% door kruiden. Boven op de dijk zijn de ruigtesoorten Akkerdistel en Brandnetel waargenomen. Wortels werden waargenomen tot minimaal 30 centimeter diepte. Echter na 7,5 cm diepte in zeer kleine hoeveelheden. De doorworteling is op basis van drie steken (VTV, 2007) over de gehele diepte tot 20 cm slecht.



Foto 6 Buitenkant dijktalud met ruige vegetatie met Glanshaver Brandnetel.



Foto 7 Bovenzijde dijk met lengtescheur en doorworteling bepaling.



Foto 8 Bepaling van doorworteling, met rechts (zode) veel wortels, en links (circa 20 diepte) weinig wortels.

Op de dijk komt het vegetatietype Soortenarme hooiland voor, met Glanshaver (*Arrhenatherum elatius*), Kropaar, Engels raaigras, Zachte dravik (*Bromus hordeaceus*), kweek en Straatgras. Als kruiden worden de ruigte soorten Brandnetel en Akkerdistel waargenomen, en nog enkele andere kruiden. Aanbevolen wordt om het dijktalud een keer extra te maaien, zodat ruigtesoorten geen kans krijgen om uit te breiden. Bij verdere verruiging van het dijktalud zal het vegetatietype overgaan naar Ruig hooiland, wat slecht is voor de kwaliteit van de zode en voor de erosiebestendigheid van de grasmat.

Dijk 3

Commandeurspolder, locatie Delfland 03, binnentalud.



Foto 9 Overzicht Commandeurspolder, locatie Delfland 03.

De dijk ziet er groen en gloeiend uit, de zode is pollig, maar aaneen. Het waterpeil in de boezem is hoog. De dijk wordt beweid door schapen, op het moment zijn er geen schapen aanwezig. Bovenop de dijk en op het binnentalud zijn lengtescheuren zichtbaar, aangenomen wordt dat dit droogtescheuren zijn, omdat het enkele weken niet noemenswaardig geregend heeft. De dijk heeft een bedekking van 90%, waarvan 10% door kruiden. Wortels werden waargenomen tot minimaal 35 centimeter diepte. Echter na 25 cm diepte, in zeer kleine hoeveelheden. De doorworteling is op basis van twee steken (VTV, 2007) over de gehele diepte tot 20 cm goed.



Foto 10 Bepaling van doorworteling, met rechts (zode) veel wortels, en links (circa 30 diepte) minder wortels, maar nog steeds aanwezig.



Foto 11 Scheuren in zode.



Foto 12 Pollige graszode met kleine en grote open plekken.

Op de dijk komt het vegetatietype soortenarme Kamgrasweide voor, met onder andere Engels raai-gras, Fioringras, Timoteegras (*Phleum pratense*) en Veldbeemdgras (*Poa pratensis*). Eveneens zijn enkele kruiden waargenomen.

Literatuur

Frissel, J.Y., H.J.P. Huiskes en E. Hazebroek, 2006. Cursus kwaliteitsherkenning dijkgrasland; erosiebestendigheid (conform Voorschrift Toetsen op Veiligheid) en natuurwaarde. Alterra, Wageningen.

V&W, 2007. De veiligheid van de primaire waterkeringen in Nederland. Voorschrift Toetsen op Veiligheid voor de derde toetsronde 2006 - 2011 (VTV). Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Delft. URL:
http://www.verkeerenwaterstaat.nl/kennisplein/3/5/358301/Voorschrift_Toetsen_op_Veiligheid_uitgave_september_2007.pdf

B3.2 Verslag van het dijkbezoek bij Delfland, 8 mei 2013

Rob Hendriks (Alterra, Wageningen Universiteit en Researchcentrum)

Dijk 1 Polder Schieveen, locatie 99

Oude scheur

- Deze is aangegeven op kaarten van Wim Ponsteen en ingemeten. In het veld zichtbaar aan maaiveld als onregelmatigheid als verhoogd 'litteken' en door veel gangen en holletjes van muizen in en rond de scheur.
- De scheur ligt een meter of vijf onder de kruin op het talud.
- De scheur is uitgegraven in een profielkuiltje dwars op het talud en geprepareerd met een mes.



- De open scheur was goed zichtbaar in kuilwanden; breedte tot 15 mm bovenin, onder 5-10 mm.
- Zij zou over grotere diepte zijn dichtgefreesd en daarmee opgevuld met plaatselijk materiaal.
- Zij was in de bovenste cm's wel opgevuld met los droog materiaal, voor een groot deel actueel, maar een deel leek al langer aanwezig. Daaronder was de scheur voor het grootste deel leeg.



- Scheur loopt door van links naar rechts en in de diepte tot minstens 60 cm. Het is duidelijk dat zij niet volledig is dichtgezwollen. Het blijft een duidelijke breuklijn.
- Scheurpatronen in het horizontale vlak als kleine krimpscheuren of haarscheuren in geometrische patronen als vierkanten of hexagonen waren niet zichtbaar.
- In de bovenste 20 cm ligt de scheur 13-14 cm meer hellingsopwaarts. Zou het onderste deel hellingafwaarts verschoven (kunnen) zijn? Of is dit het gevolg van het krimppatroon waarbij de breuk bovenin een andere zwakke plek vindt dan onderin? De bovenste 20 cm is de effectieve wortelzone met de grootste massa aan wortels. Kan de grasmat de wortelzone bij elkaar hebben gehouden terwijl daaronder de grondlagen hellingafwaarts zijn verschoven? Verder uitgraven van de scheur over grotere lengte en diepte had wellicht meer inzicht gegeven, maar daarvoor was geen tijd.



Horizontale verspringing hellingafwaarts (naar rechts) van de scheur beneden een diepte van 20 cm.

- Het bodemmateriaal was vrij zandig, geen zware klei (zal volgen uit bodemmonsters).
- Structuur: goed geaggregeerd, fijnblokkig materiaal afgewisseld met zwaardere knollen klei (door fresen is waarschijnlijk inhomogeniteit ontstaan). Veel puinbrokken tot elektriciteitskabels toe.
- Op 40 cm diepte is de bodem vochtig met gley verschijnselen in een wat zwaardere klei.
- Tot minstens 30 cm diep is er behoorlijk wat wormactiviteit als gangen en levende exemplaren.
- Tot minstens 30 cm diep zijn graswortels goed te herkennen, maar niet erg dicht.

Dijk 2 Duifpolder, locatie 98

Oude scheur

- Dit is een scheur op de kruin. Zij is aangegeven op kaarten van Wim en ingemeten.
- De afstand tot de boezem is 2,5 tot 3 m. Het boezempeil is ca. 40 cm onder de kruin.
- In het veld is de scheur goed zichtbaar als een zwarte streep in platgetreden gras met kale plekken. De zwarte streep is de opvulling met turf.
- De turf gaat maar enkele cm's diep.
- Daaronder is de scheur goed zichtbaar, tot 28 cm diep.



Oude scheur Duifpolder, Locatie 98.



- Naast de 'hoofdscheur', die als zwarte streep is te herkennen aan maaiveld, zijn er wat parallelle scheuren die een wat grilligere oriëntatie hebben en niet doorzetten in diepte en lengte. Het zijn meer grote holten. Waarschijnlijk speelt krimp, eventueel tijdens (na)rijping, een rol, maar het oogt alsof het structuren zijn die zijn ontstaan bij opbrengen van het materiaal.



- Beide kanten van de doorlopende scheur zijn goed herkenbaar als breuk in het materiaal, als scheur van een paar mm breed. Ook op de bodem van de kuil is de scheur duidelijk herkenbaar. Meestal is de scheur vanaf enkele cm's onder maaiveld 'leeg'; wel zijn er wat los materiaal en kleine aggre-gaatjes die er bij het graven er in zijn gevallen.
- Duidelijk zichtbare dwarsscheuren, een grote links van het midden en kleinere van hooguit 1 mm breed net links van de maatband. De scheuren zijn niet doorontwikkeld in dwarse lengte (gaat hooguit 2 cm diep de wand in) en diepte. Hiervoor geldt hetzelfde als op gemerkt bij de parallelle scheuren van de vorige foto.
- Op 25-30 cm diep, zeer vochtig, zware klei (cat. 1). Grijs met een vleugje blauw, gleyverschijnselen¹.
- Bovenop is de organischestofrijke laag slechts een paar cm dik.
- Redelijk wat wormactiviteiten, wat gangen en levende exemplaren.
- Wortels tot 30 cm diep, maar dieper dan 10-15 cm, weinig dicht.

¹gley: roest en grijs tot grijsblauwe plekken die duiden op de (fluctuerende) grondwaterstand. De plekken ontstaan door wisselende oxidatie- en reductieprocessen. De roestplekken zijn de concentratie van ijzerverbindingen, bij de grijsblauwe plekken is het ijzer verdwenen. De natte, gereduceerde zone heeft veelal een homogene grijs tot grijsblauwe kleur.

Nieuwe scheur

- Heeft zich parallel aan de oude ontwikkeld, dus in de lengterichting van de dijk, 60 cm afstand landinwaarts van de oude scheur.
- Zij krijgt het predikaat 'nieuw' omdat ze niet was ingemeten (zover ik weet), er duidelijk niets aan gedaan was, en ze aan maaiveld 'vers' en 'scherp' oogde.
- Het zichtbare deel was vrij oppervlakkig: max 7-10 cm diep. Het was ook moeilijk te zien in de wand. Wel goed na uit prepareren in de wand. Het is wel duidelijk een breuk in het materiaal, waar je makkelijk in doorprikte met het mes.
- Op geringe diepte (5 cm) gaat het om zware klei, veel gley en roest en weinig structuurvorming, tot ca. 30 cm diep. Daaronder ligt moerig materiaal: 5-10 cm dik. Daaronder weer grijzige, zware klei.



*Rechts: scheur net rechts van maatband;
bovenste 7-10 cm.*

Dijk 3 Commandeurspolder, locatie 3

- Deze is aangegeven op kaart van Wim en ingemeten. Scheur ligt op de kruin.
- Zij is redelijk vergelijkbaar met die van de Duifpolder.
- De scheur is niet meer te zien in de bovenste 3 cm van het profiel: de zode is eroverheen gegroeid. Daaronder is ze goed zichtbaar tot 30 cm diep. Breedte tot 5 mm.
- Scheurdiepte tot max 40 cm diep gemeten.
- Veel dwarsscheurtjes waargenomen, gaan niet diep, lijkt vooral krimp. Ook aan oppervlak veel scheuren, dicht op elkaar in bijna aaneengesloten geometrische patronen. Breedte is zeer onregelmatig, waardoor ze ook vaak ogen als holten. Lijkt daarmee erg op een gevolg van een (soort) rijpingsproces. Het vermoeden bestaat bij ons dat ongerijpt en/of te nat materiaal is opgebracht?



Een nieuwere scheur uitgegraven



Meer een holte die niet diep gaat in wand en bodem.

Conclusies

1. Het opvullen van de scheuren blijkt voor deze drie voorbeelden niet effectief. Het lijkt niet goed uitgevoerd of uitgevoerd op een tijdstip dat de scheuren dicht(er) zaten waardoor het opvullen niet diep genoeg kwam. In het geval van het frezen moet het wel haast slecht zijn uitgevoerd: de scheur was zowel op als in de grond zeer prominent aanwezig.
2. De scheuren blijven (gedeeltelijk) open of gaan weer open als het wat droger wordt. Het blijven overduidelijk onverminderd zwakke plekken. Bij de laatste locatie, Locatie 3, Commandeurspolder, lijkt de graszode de bovenste paar centimeter van de twee kanten van de scheur wel weer bij elkaar te kunnen brengen en enige stevigheid te geven. Dit zal voor de treksterkte in de dwarse richting weinig effect hebben.
3. Er komen veel krimpscheuren voor die wellicht met opbrengen van niet goed gerijpt en/of te nat materiaal te maken hebben, vooral bij de Commandeurspolder. Deze lopen in alle richtingen en lijken niet een potentiële verzwakking van de dijk te betekenen. Ze zijn niet diep, willekeurig georiënteerd, en lopen zeker niet altijd parallel aan de dijk.
4. Ondanks het droge voorjaar is de klei vanaf ca. 30-40 cm opvallend vochtig. De meeste wortels die er toe doen, komen nauwelijks onder 30 cm diepte voor. Dus dat de dijk tot op grote diepte flink wordt leeggezogen via wortels lijkt niet plausibel. Daarentegen wordt ingeschat dat juist in de beperkte bovengrond die wordt doorworteld de bodem flink wordt drooggetrokken, wat over die diepte eventueel flinke krimpscheuren kan geven. Hoe diep die scheuren lopen is moeilijk te zeggen. Net als hoe diep ze onder zeer droge omstandigheden nog kunnen komen. Bij de twee polders met zware klei bovenin, de Duif- en de Commandeurspolder, worden geen diepe krimpscheuren verwacht. Ze waren ook niet meer zichtbaar in het horizontale vlak. Zeker niet bij de nieuwe scheuren. Bij de polder met de lichtere klei en de grootste - langste, breedste en diepste - scheur is met de maximaal 50 cm diepe kuil de absolute diepte niet bereikt. Er was helaas geen tijd om dieper te gaan.

B3.3 Boringen en bemonsteringen

Opdracht : 1301271

Plaats : Maasland, Schipluiden, Rotterdam

Project : Onderzoek op 3 locaties 1. Middelwatering, 2. Vlaardingevaart, 3. Berk

BORING : 99

Datum : 16-05-2013

X : 88616.000

Boormeester : R. Drenth

GWS : NAP -1.47 m

Y : 443210.010

Beschrijver :

Maaiveld : NAP -0.42 m

Norm : NEN5104

Opmerking :

Boorprofiel	Laag nr.	Diepte [m t.o.v. NAP]		Omschrijving grondlaag	Kleur	
		van	tot			
	1	1	-0.42	-0.52	Klei, zwak siltig, sterk humeus	donkerbruin
	2	2	-0.52	-0.83	Monster nr. 1	
	3	3	-0.83	-0.92	Klei, sterk siltig, sterk humeus	donkerbruin
	4	4	-0.92	-1.27	Monster nr. 2	
	5	5	-1.27	-1.42	Klei, uiterst siltig, sterk humeus	donkerbruin
	6	6	-1.42	-2.12	Klei, zwak siltig	donkergrijs
	7	7	-2.12	-2.92	Klei, zwak siltig, zwak humeus	donkerbruin
	8	8	-2.92	-3.22	Klei, zwak siltig, matig zandig	donkergrijs
	9	9	-3.22	-4.42	Klei, zwak siltig	donkergrijs
	10	10	-4.42	-5.42	Klei, zwak siltig, zwak houthoudend	donkergrijs

Boorprofiel	Monsternr.	Diepte [m t.o.v. NAP]		Omschrijving grondlaag	Kleur
		van	tot		
	1	-0.52	-0.83	Klei, uiterst siltig	bruin
	2	-0.92	-1.27	Klei, uiterst siltig	bruin

Opdracht : 1301271

Plaats : Maasland, Schipluiden, Rotterdam

Project : Onderzoek op 3 locaties 1. Middelwatering, 2. Vlaardingevaart, 3. Berk

BORING : 98

Datum : 16-05-2013

X : 81059.270

Boormeester : R. Drenth

GWS : NAP -1.36 m

Y : 442850.900

Beschrijver :

Maaiveld : NAP +0.14 m

Norm : NEN5104

Opmerking :

Boorprofiel	Laag nr.	Diepte [m L.o.v. NAP] van tot	Omschrijving grondlaag	Kleur
	1	+0.14 +0.04	Klei, sterk siltig, sterk humeus, zwak zandig	donkerbruin
	2	+0.04 -0.26	Monster nr. 8	
	3	-0.26 -0.36	Klei, sterk humeus, zwak zandig	donkerbruin
	4	-0.36 -0.73	Monster nr. 9	
	5	-0.73 -0.76	Klei, sterk humeus, zwak zandig	donkerbruin
	6	-0.76 -1.16	Klei, matig siltig	bruingrijs
	7	-1.16 -2.66	Klei, zwak zandig	donkergrijs
	8	-2.66 -3.46	Klei, matig humeus, zwak zandig	donkerbruin
	9	-3.46 -4.36	Klei, sterk humeus, matig zandig	donkerbruin
	10	-4.36 -4.86	Veen, mineraalarm	donkerbruin

Boorprofiel	Monsternr.	Diepte [m L.o.v. NAP] van tot	Omschrijving grondlaag	Kleur
	8	+0.04 -0.26	Klei, uiterst siltig	bruin
	9	-0.36 -0.73	Klei, uiterst siltig	bruin

Opdracht : 1301271

Plaats : Maasland, Schipluiden, Rotterdam

Project : Onderzoek op 3 locaties 1. Middelwatering, 2. Vlaardingevaart, 3. Berk

BORING : 3

Datum : 16-05-2013

X : 79947.000

Boormeester : R. Drenth

GWS : NAP -1.28 m

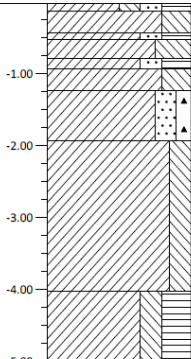
Y : 440257.990

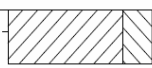
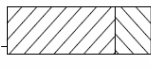
Beschrijver :

Maaiveld : NAP -0.03 m

Norm : NEN5104

Opmerking :

Boorprofiel	Laag nr.	Diepte [m t.o.v. NAP] van tot	Omschrijving grondlaag	Kleur
	1	1 -0.03 -0.13	Klei, siltig, matig zandig, sterk humeus	donkerbruin
	2	2 -0.13 -0.43	Monster nr. 7	
	3	3 -0.43 -0.53	Klei, matig zandig, sterk humeus	donkerbruin
	4	4 -0.53 -0.79	Monster nr. 8	
	5	5 -0.79 -0.93	Klei, matig zandig, sterk humeus	donkerbruin
	6	6 -0.93 -1.23	Klei, sterk siltig	bruingrijs
	7	7 -1.23 -1.93	Klei, matig zandig, zwak puinhoudend	donkerbruin
	8	8 -1.93 -4.03	Klei, matig siltig	donkerbruin
	9	9 -4.03 -5.03	Klei, matig siltig, sterk humeus	donkerbruin

Boorprofiel	Monsternr.	Diepte [m t.o.v. NAP] van tot	Omschrijving grondlaag	Kleur
	7	-0.13 -0.43	Klei, sterk siltig	bruin
	8	-0.53 -0.79	Klei, uiterst siltig	bruin

Opdracht: 1301271

Plaats: Maasland, Schipluiden, Rotterdam.

Project: Onderzoek Middelwatering, Vlaardingevaart, Berk. Zweth.

Boring nummer	Bus nummer	Diepte NAP	Volumegewicht		Water- gehalte	Lutum- gehalte	Org.stof- gehalte
		[m]	initieel [kN/m ³]	droog [kN/m ³]	W [%]	L _{min} [%]	H [%]
3	7	-0,20	18,07	13,94	29,7	29	7,5
3	7	-0,43	15,28	10,93	39,8	29	7,5
3	8	-0,60	15,46	10,84	42,6	16	7,0
3	8	-0,79	18,48	14,56	26,9	16	7,0
98	8	-0,03	19,04	15,49	22,9	21	4,7
98	8	-0,26	17,34	13,41	29,3	21	4,7
98	9	-0,48	18,03	14,74	22,3	21	4,2
98	9	-0,73	17,52	13,11	33,6	21	4,2
99	1	-0,59	18,02	14,28	26,2	24	4,3
99	1	-0,83	19,22	15,34	25,3	24	4,3
99	2	-1,06	17,61	13,83	27,3	24	3,6
99	2	-1,27	17,66	13,24	33,4	24	3,6

Opmerking: De monsters zijn in een droge periode genomen. De droge volumegewichten kunnen door krimp dan aanmerkelijk hoger zijn dan van een niet-gekrompen kleigrond.



Alterra Wageningen UR
Postbus 47
6700 AA Wageningen
T 0317 48 07 00
www.wageningenUR.nl/alterra

Alterra-rapport 2473
ISSN 1566-7197



Alterra Wageningen UR is hét kennisinstituut voor de groene leefomgeving en bundelt een grote hoeveelheid expertise op het gebied van de groene ruimte en het duurzaam maatschappelijk gebruik ervan: kennis van water, natuur, bos, milieu, bodem, landschap, klimaat, landgebruik, recreatie etc.

De missie van Wageningen UR (University & Research centre) is 'To explore the potential of nature to improve the quality of life'. Binnen Wageningen UR bundelen 9 gespecialiseerde onderzoeksinstituten van stichting DLO en Wageningen University hun krachten om bij te dragen aan de oplossing van belangrijke vragen in het domein van gezonde voeding en leefomgeving. Met ongeveer 30 vestigingen, 6.000 medewerkers en 9.000 studenten behoort Wageningen UR wereldwijd tot de aansprekende kennisinstellingen binnen haar domein. De integrale benadering van de vraagstukken en de samenwerking tussen verschillende disciplines vormen het hart van de unieke Wageningen aanpak.

To explore
the potential
of nature to
improve the
quality of life



Alterra Wageningen UR
Postbus 47
6700 AA Wageningen
T 317 48 07 00
www.wageningenUR.nl/alterra

Alterra-rapport 2473
ISSN 1566-7197

Alterra Wageningen UR is het kennisinstituut voor de groene leefomgeving en bundelt een grote hoeveelheid expertise op het gebied van de groene ruimte en het duurzaam maatschappelijk gebruik ervan: kennis van water, natuur, bos, milieu, bodem, landschap, klimaat, landgebruik, recreatie etc.

De missie van Wageningen UR (University & Research centre) is 'To explore the potential of nature to improve the quality of life'. Binnen Wageningen UR bundelen 9 gespecialiseerde onderzoeksinstituten van stichting DLO en Wageningen University hun krachten om bij te dragen aan de oplossing van belangrijke vragen in het domein van gezonde voeding en leefomgeving. Met ongeveer 30 vestigingen, 6.000 medewerkers en 9.000 studenten behoort Wageningen UR wereldwijd tot de aansprekende kennisinstellingen binnen haar domein. De integrale benadering van de vraagstukken en de samenwerking tussen verschillende disciplines vormen het hart van de unieke Wageningen aanpak.

