

32/446(318) 2^e ex.

**BIBLIOTHEEK
STARINGGEBOUW**

**Oorzaak en preventie van schade aan wegen door
vochtonttrekking door bomen**

**J.W. Bakker
J.J.H. van den Akker
P. Cornelissen
D. Boels**

Rapport 318

DLO-Staring Centrum, Wageningen, 1995



0000 0687 5989

28 JUNI 1995

150 907 002

REFERAAT

Bakker, J.W., J.J.H. van den Akker, P. Cornelissen, D. Boels, 1995. *Oorzaak en preventie van schade aan wegen door vochtonttrekking door bomen*. Wageningen, DLO-Staring Centrum. Rapport 318; 104 blz.; 26 fig.; 11 tab.; 34 ref.; 2 aanh.; 1 kaart.

In droge jaren vertonen plattelandswegen in de buurt van boombeplantingen scheuren en verzakkingen. Dit wordt veroorzaakt doordat veen en (zwarte) klei krimpen door vochtonttrekking door bomen in de berm. In dit rapport worden het krimp- en rijpingsproces beschreven en worden berekeningsmethoden voor de zakking gegeven. Bij vijf meetlocaties zijn uitgebreide hoogtemetingen gedaan en is het verloop van slootpeilen en grondwaterstanden gemeten. Bij drie meetlocaties is een profielkuil dwars door de weg gegraven. Grondsoort, grondwaterstand, aanwezigheid van diepe watervoerende sloten en de doorlatendheid van de grond blijken een grote invloed te hebben op de schadekans. Een juiste keuze van de boomsoort kan veel schade voorkomen of beperken.

Trefwoorden: bermbeplanting, krimp, maaiveldsdaling, peilverlaging, plattelandsweg, rijping, scheur, waterhuishouding, zakking

ISSN 0927-4499

©1995 DLO-Staring Centrum, Instituut voor Onderzoek van het Landelijk Gebied (SC-DLO)
Postbus 125, 6700 AC Wageningen.
Tel.: 08370-74200; telefax: 08370-24812.

DLO-Staring Centrum is een voortzetting van: het Instituut voor Cultuurtechniek en Waterhuishouding (ICW), het Instituut voor Onderzoek van Bestrijdingsmiddelen, afd. Milieu (IOB), de Afd. Landschapsbouw van het Rijksinstituut voor Onderzoek in de Bos- en Landschapsbouw 'De Dorschkamp' (LB), en de Stichting voor Bodemkartering (STIBOKA).

DLO-Staring Centrum aanvaardt geen aansprakelijkheid voor eventuele schade voortvloeiend uit het gebruik van de resultaten van dit onderzoek of de toepassing van de adviezen.

Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke andere wijze ook zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van DLO-Staring Centrum.

Inhoud

	blz.
Woord vooraf	9
Samenvatting	11
1 Inleiding	13
2 Opzet onderzoek	15
2.1 Meetlocaties	15
2.2 Meetprogramma	17
3 Literatuuronderzoek	19
3.1 Factoren van invloed op schade	19
3.1.1 Klimaat en hydrologie	19
3.1.2 Grondsoort	20
3.1.3 Boomsoort, grootte en invloedssfeer	21
3.2 Nederlandse inventarisaties en observaties	23
4 Oorzaken van schade aan wegen	29
4.1 Consolidatie	29
4.2 Oxydatie	31
4.3 Krimp	31
5 Waarnemingen	47
5.1 Hutstraat	47
5.2 Lageweg	54
5.3 Kooiweg	63
5.4 Woutersdijk	70
5.5 Conradsweg	75
5.6 Vergelijking en samenvatting meetlocaties	78
6 Preventie van schade	83
Literatuur	87
Niet-gepubliceerde bronnen	90

Tabellen

1 Schadekarakteristieken van verschillende bomen op kleigronden	22
2 Vochtigheid van bodemlagen vanaf 50 cm (= funderingsdiepte weg) onder de berm van de Hutstraat, zonder boom in het voorjaar (I), met boom in het voorjaar (II) en in begin september (III), en de daaruit berekende zakking per laag en van het totale pakket	50
3 Zakkingsberekening van de zuidrand van de weg (geen bomen) uit de vochtmeting in het voorjaar (24-4-1991) en het najaar (19-9-1991)	59
4 Zakkingsberekening van het midden van de weg uit de vochtmetingen in het voorjaar (24-4-1991) en het najaar (19-9-1991)	60
5 Zakkingsberekening van de noordrand van de weg (= boomzijde) uit de	

vochtmetingen in het voorjaar (24-4-1991) en het najaar (19-9-1991)	60
6 Berekening van de potentiële zakking van de zuidrand van de weg (geen bomen) uit de actuele droge dichtheid en de droge dichtheid van vergelijkbare nabijgelegen profielen die het krimpproces reeds ondergaan hebben	62
7 Berekening van de potentiële zakking van de zuidrand van de weg (geen bomen) t.o.v. de noordrand van de weg (met bomen) uit de vochtmetingen in het najaar (19-9-1991) onder de noord- en zuidrand	62
8 Berekening van de potentiële extra zakking van de Kooiweg zonder bomen indien daar bomen zouden worden aangeplant, uit de vochtmetingen in het najaar (19-9-1991) van de weg met en zonder bomen	68
9 Berekening van de potentiële extra zakking van de Kooiweg zonder bomen uit de dichtheidsmetingen in het najaar (19-9-1991) van de weg met en zonder bomen	69
10 Vergelijking Hutstraat, Lageweg en Kooiweg, N = noordrand, M = midden en Z = zuidrand van de weg	80
11 Kans op schade aan wegen door vochtonttrekking door bomen bij combinaties van grondsoorten en grondwatertrappen	84
12 Gemiddeld hoogste (GHG) en laagste (GLG) grondwaterstand per grondwatertrap (Gt) en de dikte Z van het lagenpakket dat aan krimp onderhevig is. Daaruit volgt een wegingsfactor voor de kans op schade	102
13 Wegingsfactoren die de bijdrage van de grondsoort aan de schadekans geven	103
14 Kans op schade aan wegen door vochtonttrekking door bomen bij combinaties van grondsoorten en grondwatertrappen	103

Figuren

1 Krimpkarakteristiek van een zeer zware klei te Bruchem, 59,6% lutum en 3,7% humus (uit Bronswijk en Evers, 1987). In de figuren zijn de vochtspanningen in cm waterdruk aangegeven	32
2 Krimpkarakteristiek van een zavel te Kats, 16,2% lutum en 0,3% humus (uit Bronswijk en Evers, 1987). In de figuren is de vochtspanning in cm waterdruk gegeven	33
3 Verdeling van het relatief volume in vaste delen, water en lucht in relatie tot de vochtspanning van een zeer zware klei uit Bruchem	34
4 Volume krimp als percentage van de afname van het watervolume bij verlaging van de vochtspanning van 0 naar resp. -10, -100, -1000 en -16000 cm waterdruk in relatie tot het lutumgehalte	36
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	36
6 Krimpkarakteristiek kleilig veen te Zegveld, organische-stofgehalte 45%	37
7 Verdeling van het relatief volume in vaste delen, water en lucht in relatie tot de vochtspanning van veen met 80% organische stof	37
8 Isotrope krimp van een grondkubus met een initiële dikte z en volume V	38
9 Lengteprofiel in het voorjaar van 1991 van het wegoppervlak van de Hutstraat met aan één zijde wilgen. P = plaats van het dwarsprofielonderzoek en de metingen	47
10 Dwarsdoorsnede Hutstraat. P = eind filters peilbuizen. K = hor. verzadigde doorlatendheid tussen -1,7 en -2,9 m. d = locatie tensiometers. <u>56</u> = daling	

maaiveld of zakkaken ter plaatse van 2/7 tot 3/9/1991	48
11 Grondwaterstanden zomer 1991 in een raai loodrecht op de Hutstraat	51
12 Hoogteverandering van het maaiveld en het wegoppervlak van de Hutstraat gedurende de zomer van 1991 (lokatie = figuur 10)	52
13 Lengteprofiel in het voorjaar van 1992 van het wegoppervlak van de Lageweg met aan één zijde wilgen. P = plaats van het dwarsprofielonderzoek en de metingen	55
14 Dwarsdoorsnede Lageweg met maaiveldsdaling, grondwaterstanden en wortelzone	56
15 Verloop van de hoogte van de randen en het midden van de Lageweg gedurende het groeiseizoen 1991 en in het voorjaar 1992	57
16 Verdraaiingshoek tussen de twee weghelften door ongelijke zakking en stijging van de Lageweg	57
17 Verloop van het slootpeil en de grondwaterstanden in 1991 bij de Lageweg	59
18 Dwarsprofiel Kooiweg met grootste zakkingen maaiveld, grondwaterstanden en wortelzone	64
19 Verloop van de hoogte van de randen en het midden van de Kooiweg	65
20 Verloop van het slootpeil en de grondwaterstanden in 1991 bij de Kooiweg	67
21 Dwarsprofiel Woutersdijk met zakking maaiveld in de droge periode en de grondwaterstand direct voor en na de droge periode	71
22 Dwarsprofiel Woutersdijk met beworteling, zakking maaiveld in de droge periode en grondwaterstanden	72
23 Verloop van de hoogte van de bermen, randen en het midden van de Woutersdijk in 1991	73
24 Verloop van de grondwaterstanden en slootpeil in 1991 bij de Woutersdijk	74
25 Dwarsprofiel Conradsweg met profielopbouw en grondwaterstanden direct voor en na de droge periode	77
26 Dwarsprofiel Conradsweg met beworteling en grondwaterstanden	78

Aanhangsels

1 Tabellen inventarisatie van de relaties tussen scheurvorming in plattelandswegen en bodemtype	91
1-a Noord Brabant - Land van Heusden en Altena	93
1-b Noord Brabant - Midden Maasland	94
1-c Zeeland - Tholen	95
1-d Zeeland - Walcheren	96
1-e Gelderland - Valburg/Heteren	97
1-f Utrecht - Maarsen	98
1-g Overijssel	99
1-h Friesland	100
2. Toelichting op de 'Kaart met kans op schade aan wegen door vochtonttrekking door bomen'.	101

Kaart

Kans op schade aan wegen door vochtonttrekking door bomen

Woord vooraf

Het onderzoek naar oorzaken en preventie van schade aan wegen door bermbeplanting is in 1991 door de Landinrichtingsdienst (LD) te Utrecht aan DLO-Staring Centrum opgedragen. Namens de LD is het onderzoek begeleid door Ir. Th. H. van Putten. Het veldonderzoek, de data-analyse en de rapportage is grotendeels uitgevoerd door Ir. J.W. Bakker en Ing. P. Cornelissen. Wegens het plotselinge overlijden van Ir. J.W. Bakker, is de eindrapportage afgerond door Ir. J.J.H. van den Akker en Ir. D. Boels.

Samenvatting

De landschappelijke waarde van boombeplanting langs wegen wordt in meerdere beleidsnota's erkend. De verwachting is dat beplanting o.a. in het kader van landinrichtingsprojecten waar mogelijk langs wegen zal plaatsvinden als aanvulling op of als redelijk alternatief van bosaanleg. In droge jaren blijken echter bij plattelandswegen juist in de buurt van boombeplantingen scheuren en verzakkingen op te treden. Zakkingsverschillen van vele centimeters zijn daarbij geen uitzondering. Dit is voor de wegbeheerder een forse schadepost en activeert hem niet tot uitbreiding of zelfs handhaving van bermbeplanting. Gezien de beleidsdoelstelling en de optredende schade was er alle reden om het verschijnsel schade aan wegen in de buurt van bomen nader te analyseren.

Uit een vooronderzoek en een literatuurstudie blijkt dat maaiveldsdalingen door vochtonttrekking door bomen en de daaruit volgende schade aan funderingen en wegen worden veroorzaakt door krimp van veen en (zware) klei. In de literatuur is daarbij veelal sprake van krimp van zware klei en schade aan gebouwen. Uit de literatuurstudie blijkt dat een juiste keuze van de boomsoort veel schade kan voorkomen of beperken. Sommige boomsoorten hebben een lage potentiële verdamping doordat zij laat in het blad komen of een gering bladoppervlak per eenheid van kroonoppervlak (dus een open bladerdek) hebben. 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 winterperiode sterven de diepere wortels af en blijft het wortelstelsel ondiep waardoor enerzijds de potentiële vochtonttrekking afneemt en anderzijds de potentiële krimpende klei- en veenlagen onder de wegfundering niet kunnen worden geëxploiteerd en uitgedroogd.

De mogelijke oorzaken van de zakkingen worden in hoofdstuk 4 nader beschouwd. Consolidatie en verlies van organische stof door oxidatie blijken geen grote bijdrage aan de zakkingen te leveren. Rijping van klei of veen blijkt zeer grote zakkingen te kunnen veroorzaken. In het algemeen zal de grond tot op zekere hoogte gerijpt zijn en zal krimp grotendeels voor de zakking verantwoordelijk zijn. De relatie tussen wateronttrekking en krimp van klei en veen is nader beschouwd. Voor klei is het volume krimp als percentage van het volume wateronttrekking in relatie tot het lutumgehalte gegeven. Bij zware klei wordt bijna alle wateronttrekking omgezet in krimp. Daarbij blijven de aggregaten bijna volledig verzadigd. Zware klei en veen krimpen het meest en zullen de grootste zakkingen en daarmee de grootste kans op schade geven. Er blijkt een groot verschil te bestaan tussen het krimpgedrag van zware klei en veen. Veen kan zeer sterk krimpen. Daarbij is het volume onttrokken water echter veel groter dan het volume krimp. Dit houdt in dat veen veel water kan leveren zonder dat er veel krimp en daardoor zakking optreedt. Indien aan het veen echter grote hoeveelheden water worden onttrokken, dan kunnen de krimp en zakkingen zeer groot worden. Voor de geïnteresseerde lezer zijn berekeningsmethoden en berekeningen van zakking door krimp en rijping in het rapport opgenomen.

In hoofdstuk 5 zijn de resultaten gegeven van vijf meetlocaties waarbij gedurende 1991 uitgebreide hoogtemetingen zijn gedaan en het verloop van slootpeilen en grondwaterstanden is gemeten. Op het einde van het groeiseizoen is bij drie meetlocaties

een profielkuil dwars door de weg gegraven. Het blijkt dat grondsoort, grondwaterstanden, de aanwezigheid van diepe watervoerende sloten en de doorlatendheid van de grond een grote invloed hebben op de kans op schade door vochtonttrekking door bomen. De boomwortels drogen de veen- en kleilagen tussen de onderkant van de wegfundering en het grondwaterpeil sterk uit waardoor deze krimpen en de weg verzakt. Daarbij bereikt in een aantal gevallen het veen zijn potentiële, grote krimp! De vochtonttrekking blijkt zelfs zo sterk te zijn dat bij een slecht doorlatende grond het grondwater niet snel genoeg wordt aangevuld. Het gevolg is dat het grondwaterpeil plaatselijk bij de boom vele decimeters zakt. Daardoor kunnen nieuwe lagen veen of klei worden uitgedroogd en gaan krimpen met extra zakkingen tot gevolg. Bij bomen in een berm langs een diepe watervoerende sloot blijkt de aanvoer van (grond-)water beter gewaarborgd en blijkt de 'deuk' in het grondwaterpeil niet of in mindere mate te ontstaan. Bij één van de locaties met een dik veenpakket blijkt de combinatie van de grote hoeveelheid water in het veen en de grote doorlatendheid van dit veen voldoende te zijn om grote zakkingen te voorkomen.

In het laatste hoofdstuk 'Preventie van schade' worden als concreet resultaat van het onderzoek aandachtspunten en aanbevelingen gegeven om schade te voorkomen. Daarbij blijken boomkeuze en de locatie van de boom belangrijke middelen te zijn om schade te voorkomen. Een globale inschatting van de kans op schade wordt gegeven voor enkele combinaties van grondsoort en grondwaterstand combinaties van sterk krimpende gronden als veen en zware klei met diepe grondwaterstanden blijken daarbij de grootste kans op schade te geven. Indien de funderingsdiepte van de weg als vast gegeven wordt beschouwd, dan wordt de dikte van het uitdrogende lagenpakket door de laagste grondwaterstand bepaald. De grondwatertrap (Gt) met bijbehorende gemiddeld laagste grondwaterstand (GLG) is dan ook van groot belang om in combinatie met de opbouw van het grondprofiel de kans op schade aan wegen door vochtonttrekking door bomen te bepalen. Met dit gegeven is gebaseerd op de bodemkaart van Nederland, schaal 1 : 50 000, een 'Kaart met kans op schade aan wegen door vochtonttrekking door bomen', schaal 1 : 700 000, met zes klassen van schadekans (van 'geen' tot 'zeer grote' kans) geconstrueerd. Deze kaart wordt toegelicht in een bijlage. De schadekanskaart kan slechts een eerste indruk geven van de kans op schade. Een eenvoudig grondonderzoek wordt aanbevolen om de plekken met de grootste kans op krimp en zakking te bepalen om deze uit te sluiten van beplanting.

In veel gevallen zal door gebruik te maken van de in het rapport gegeven aanbevelingen de kans op schade tot aanvaardbare proporties kunnen worden teruggebracht, zodat bermbeplanting mogelijk wordt.

1 Inleiding

In het Nederlandse landschap worden sinds jaar en dag langs wegen bomen aangeplant. De één- of meerrijige bermbeplantingen vormen kenmerkende structuren in het landelijk gebied en accentueren daarmee de aanwezigheid van wegen en paden. De waarde van beplanting wordt in meerdere beleidsstukken onderkend. Zo gaat de Nota Landschap in op de rol van beplanting in het vormgeven van het landschap en kent het Meerjarenplan Bosbouw een economisch belang toe aan beplanting langs wegen. De verwachting is dat de beplanting langs wegen fors zal worden uitgebreid. In het kader van landinrichtingsprojecten worden ook wegbeplantingen aangelegd.

Het komt echter op meerdere plaatsen voor dat wegen in droge jaren juist in de buurt van boombeplanting scheuren en verzakkingen vertonen. Dit is voor de wegbeheerder een forse schadepost en activeert hem niet tot uitbreiding of zelfs maar tot handhaving van bermbeplanting. Gezien de beleidsdoelstelling en de optredende schade was er alle reden om het verschijnsel schade aan wegen in de buurt van bomen nader te analyseren.

Uit inventarisatie en eerder onderzoek door of in opdracht van de Landinrichtingsdienst bleek in veel gevallen dat schade aan de wegen nabij bomen niet het gevolg is van een slechte wegconstructie of te zwaar verkeer, maar dat deze zeer waarschijnlijk wordt veroorzaakt door krimpen en scheuren of zetting van de ondergrond doordat veel water aan de bodem wordt onttrokken door de bomen langs de weg. De schade treedt op in gebieden met zware klei, zware klei op veen, lichtere klei op zware klei of veenlagen. Ook in veengebieden wordt een deel van de daar frequent voorkomende wegdeformatie aan wateronttrekking door bomen toegeschreven. Gebieden waar schade wordt gerapporteerd zijn o.a.: de Over-Betuwe, Midden-Maasland, Land van Heusden en Altena, Walcheren, Tholen, en veengebieden in Friesland en Overijssel. De boomsoorten waarbij schade voorkomt zijn populier, wilg en es; andere boomsoorten zijn in deze gebieden vrijwel niet langs de wegen te vinden.

Door de Landinrichtingsdienst is in 1990 aan DLO-Staring Centrum opdracht gegeven de vochtonttrekking door bermbeplanting en eventueel daardoor ontstane krimp en zakking van wegondergrond nader te bestuderen met als doel beter te kunnen aangeven:

- bij welke bodemkundige en hydrologische situaties schade door bermbeplanting kan ontstaan;
- wat de invloed is van de soort beplanting en berm- en wegconstructie;
- wat, gegeven de gevonden oorzaken, mogelijke maatregelen zijn om de schade te voorkomen of te beperken.

Het rapport begint na een korte beschrijving van het onderzoek in hoofdstuk 2 met een uitgebreide literatuurstudie en inventarisatie van schadegevallen in hoofdstuk 3. In de literatuurstudie wordt de relatie tussen boomsoort en schadekans nader beschouwd. In Hoofdstuk 4 wordt dieper ingegaan op de mogelijke oorzaken van schade aan wegen door vochtonttrekking door bomen. In dit meer theoretische hoofdstuk wordt het krimpproces geanalyseerd en de relatie tussen wateronttrekking en krimp beschouwd. Verschillende methoden om de krimp en zakking te berekenen worden gegeven. Dit hoofdstuk is vooral bedoeld voor degenen die wat dieper op de materie willen ingaan.

Gedurende 1991 zijn op een vijftal meetlocaties uitgebreide waarnemingen gedaan die in hoofdstuk 5 worden gepresenteerd en geanalyseerd. Bij drie meetlocaties zijn als afsluiting van de metingen in de herfst van 1991 profielkuilen dwars door de weg gegraven. De conclusies van het onderzoek zijn vertaald in een kaart die de kans op schade aan een weg door zakking ten gevolge van vochtonttrekking door bomen geeft en de aanbevelingen die in hoofdstuk 6 'Preventie van schade' worden gegeven.

2 Opzet onderzoek

De schade aan wegen waarmee de Landinrichtingsdienst regelmatig wordt geconfronteerd, wordt toegeschreven aan de invloed van bermbeplanting op de vochthuishouding onder en nabij de weg. Schades zijn waargenomen in Midden-Maasland, Echtener- en Grootte Veenpolders en vergelijkbare gebieden. Uit een inventarisatie van schadebeelden in Midden-Maasland komen aanwijzingen naar voren over het scheuren van verhardingen als gevolg van extra krimp of zakking ter plaatse van bomen in de berm. Factoren die een rol spelen in dit probleem zijn:

- bodemprofiel van de ondergrond;
- diepte en variatie van de grondwaterstand;
- opbouw en dichtheid van weglichaam en verharding;
- vochtonttrekkend vermogen van de bermbeplanting.

Het doel van het onderzoek is vast te stellen welke rol bermbeplanting speelt bij de vochthuishouding in en rond een weg, onder welke omstandigheden (m.n. bodem, grondwater, weg en beplanting) schade wordt verwacht en welke maatregelen getroffen kunnen worden om deze schade te voorkomen.

De gevolgde werkwijze heeft omvat:

- 1 Literatuuronderzoek en inventarisatie van schadegevallen;
Hierbij zijn schadegevallen geïnventariseerd en zijn de omstandigheden beschreven waaronder de schade kon optreden;
- 2 Het meten van de vochthuishouding en het verloop van maaiveldshoogte en ligging van het wegdek gedurende een zomer, winter en voorjaarsperiode op enkele locaties waar schade wordt verwacht of reeds was waargenomen;
- 3 Het beschrijven van de bodemopbouw, beplantingstype en beworteling van de bodem in de berm en onder het wegdek.
- 4 Het aangeven van mogelijkheden om schade te voorkomen.

2.1 Meetlocaties

Schade aan wegen ontstaat door mechanische oorzaken: Overbelasting door verkeer, scheurvorming in het wegdek door ongelijke vorstheffing, ongelijkmatige bodemdaling tengevolge van ongelijkmatige zetting en reversibele krimp. Locaties voor nader onderzoek zijn gezocht in gebieden waar in de bodem lagen voorkomen die onder invloed van vochtonttrekking krimpen. Daarbij zijn de volgende criteria gehanteerd:

- locaties met en zonder bomen;
- geen veranderingen tijdens het meetseizoen zoals wegconstructie, kappen van bomen, verandering polderpeil;
- geen grote wegconstructies in het verleden waardoor de opbouw te gecompliceerd is;
- duidelijke relatie schade-boom;
- geen zand in de ondergrond dicht bij de grondwaterspiegel;
- geen drukke doorgaande wegen.

Op basis hiervan zijn vijf locaties met bomen en een locatie zonder bomen uitgezocht. De verschillende locaties liggen in de volgende gebieden:

Midden-Maasland

Als meetlocatie dient de Hutstraat, Lith, coördinaten w/o 156.120, z/o 421.560. De Hutstraat is een in het kader van de ruilverkaveling aangelegde weg ter ontsluiting van het komgrondgebied. Een stuk van deze weg is aan twee zijden beplant met wilg, een stuk enkelzijdig en een groot deel is onbeplant. De plantafstand is 8 meter, de bomen zijn nog relatief klein met een kroondoorsnede van 5,5 m. Dit betekent bij de enkele rij 3 m² kroonoppervlak per strekkende meter weg. Bij alle beplanting is de weg gezakt en bij de enkelzijdige beplanting ook vaak gescheurd in de lengterichting. Het bodemprofiel is representatief voor de profielen in Midden-Maasland waar schade is geconstateerd. De bodem bestaat uit een pakket zware klei van 2 à 3 m dikte, waarin soms enkele dunne veenlagen voorkomen. De gemiddelde laagste grondwaterstand bedraagt 1,5-2 m, de gemiddeld hoogste grondwaterstand ca. 0,5 m.

Land van Heusden en Altena

De meetlocatie betreft in dit gebied de Lageweg, met coördinaten w/o 128.290 z/n 422.700. De beplanting bestaat uit een enkele rij wilg met een kroon van 6,2 m²/m en als de boom volop in het blad zit is de LAI (leaf area index = oppervlak van alle bladeren per oppervlakte eenheid standplaats) 4 à 5. Een sloot bevindt zich aan de overzijde van de weg.

De bodemopbouw onder de weg bestaat uit: 0-70 cm wegdek en funderingszand, van 70-135 cm zware klei, van 135-180 cm veen, en daaronder zavel. Het slootpeil is 155-145 cm onder maaiveld.

Een tweede locatie in dit gebied betreft de Kooiweg met coördinaten w/o 129.650 en z/n 419.580. Hier komt een enkele rij populieren voor met een kroon van 10 m²/m. Een sloot bevindt zich naast de bomenrij. Aan de overzijde van de weg bevindt zich een populierenbos.

De bodem ter plaatse van de weg bestaat uit: 0-80 cm wegdek en funderingszand, 80-110 cm zware klei en daaronder veen. Het slootpeil is ca. 100 cm onder maaiveld.

Over-Betuwe

De meetlocatie in dit gebied betreft de Woutersdijk, Valburg, met coördinaten w/o 182.025 en z/w 436.025. De wegbeplanting bestaat uit een dubbele rij populieren met een kroon van 2 x 6 m²/m en een LAI van 2-3. Aan weerszijden van de weg komt een ondiepe sloot die grenst aan weiland. De weg is zeer oud.

De bodemopbouw is: 0-80 cm wegdek en fundering, 80-140 cm zware klei, 140-150 cm venige klei en daaronder veen.

Veengebied

Een meetlocatie is in dit gebied betreft de Conradsweg bij Rouveen, coördinaten w/o 204.500 en z/n 516.925. Aan een kant van de weg komt een enkele rij essen voor met een kroon van 2 m²/m. Aan de overzijde van de weg bevindt zich een vaart.

De bodemopbouw in de berm is: 0-10 cm zand, 10-300 cm veen en daaronder ook veen.

2.2 Meetprogramma

Op de meetlocaties zijn gedurende het groeiseizoen van de bomen de vochtspanningen in de bodem, de grondwaterstanden en de zakkingen van het maaiveld en de onderliggende bodemlagen gemeten. Hiervoor zijn vochtspanningsmeters, peilbuizen en zakplaatjes geplaatst.

Op alle meetlocaties zijn tot een diepte van ca. 2,5 m ongeroerde grondmonsters genomen voor de bepaling het vochtgehalte en het droogvolume gewicht.

Aan de hand van de vochtspanningsmetingen, grondwaterstanden en zakkingen kunnen veranderingen als gevolg van de vochtonttrekking door de boom, in tijd en plaats in beeld worden gebracht. De beworteling (diepte en intensiteit) is door middel van boringen bepaald.

3 Literatuuronderzoek

3.1 Factoren van invloed op schade

In veel landen en gebieden is de schade door uitdroging van de ondergrond door bomen relatief veel groter dan in Nederland. In Zuid-Oost Engeland moet jaarlijks gemiddeld 8.5 miljoen pond van de ingediende schadeclaims voor het verzakken van huizen worden toegeschreven aan het uitdrogen van de grond onder de funderingen door bomen (Driscoll, 1983). In de Verenigde Staten bedraagt de schade aan gebouwen door uitdroging door bomen ca. 1,2 miljard dollar per jaar (Holz, 1983). Schade aan wegen wordt wel genoemd maar ramingen van het schadebedrag worden niet gegeven.

Om de voorschriften met betrekking tot funderingsdiepten en de veilige afstand van bomen tot bebouwing te kunnen vaststellen of te verfijnen en om aan te geven wanneer schade is te verwachten en wanneer niet, is, in tegenstelling tot Nederland, in die landen vrij veel onderzoek gedaan en zijn voorkomende schadegevallen geïnventariseerd. Als factoren die de zakking van ondergrond van wegen en funderingen in de buurt van bomen bepalen worden genoemd: Het klimaat, de hydrologie van de omgeving, de grondsoort, de grootte en de soort van de bomen en de afstand tussen fundering en de bomen.

3.1.1 Klimaat en hydrologie

Schade door uitdroging komt voor in die klimaten waar het verschil tussen potentiële verdamping en neerslag tijdelijk of permanent zo groot is dat een dikker pakket grond kan uitdrogen. In Engeland komt schade van betekenis voor in gebieden waar het zgn. maximale potentiële verdampingsoverschot (dat is het grootst voorkomende verschil in een seizoen tussen potentiële verdamping van gras (berekend volgens Penman) en de neerslag) groter is dan gemiddeld 100 mm. Dit gebied, namelijk Zuid-Oost Engeland, valt samen met het gebied waar kleiafzettingen voortkomen die gevoelig zijn voor zwel en krimp (Driscoll, 1983). Het is daarom niet onmogelijk dat schadelijke zakking ook kan voorkomen in gebieden met een lager verdampingsoverschot. In Nederland bedraagt het maximaal verdampingsoverschot in een gemiddelde zomer ca. 100 mm (de Bruin, 1979). Opgemerkt moet worden dat het door Driscoll (1983) genoemde verdampingsoverschot een klimatologische indicatie is. Het hier van belang zijnde tekort door de onttrekking van bomen ligt hoger. 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).

In de vochtiger klimaten wordt het water dat in de zomer aan de grond is onttrokken in de winters weer volledig aangevuld, waardoor de bodem weer opzwellt tot het niveau van voor de zomeruitdroging. De maximaal waargenomen amplitude van deze beweging bedraagt in Engeland ca. 60 mm. Bozozuk en Burn (1960) bepaalden tussen 1954 en 1957 in Ottawa (Canada) een tijdelijke daling van 75 mm van het maaiveld in de uitzonderlijk droge zomer van 1955 (maximale verdampingsoverschot 380 mm) bij een

rij iepen op een dik pakket zware klei. De optredende daling in een seizoen is ongeveer evenredig met het optredende verdampingstekort.

In drogere klimaten is de hoeveelheid water die door de boom aan de grond onttrokken kan worden groter dan in de gemiddelde winter wordt aangevuld. Daardoor worden vooral diepere lagen in de buurt van bomen permanent droger. Er ontstaat dan een permanente zakking met daaroverheen een jaarlijkse bodembeweging als reversibele zwel en krimp van de bovenlagen. Nadat bomen zijn gekapt, raakt de uitgedroogde grond weer bevochtigd omdat de verdamping geringer is geworden. Van locaties in Zuid Afrika rapporteren Williams and Pidgeon (1983) periodieke bodembeweging van ca. 100 mm en een permanente bodemdaling van 180 mm. In Engeland heeft Driscoll (1983) bij een groep iepen permanente uitdroging tot 5 meter diep waargenomen en een stijging van het maaiveld met 100 mm gedurende een periode van 20 jaar na het kappen van de bomen. Ook onder Nederlandse omstandigheden kan een permanente uitdroging voorkomen van lagen in bodemprofielen die goed en diep beworteld kunnen worden en waar zijdelingse wateraanvoer beperkt blijft of afwezig is. Zo'n situatie kan zich voordoen op diepe lössgronden zonder grondwaterinvloed. De löss die in Nederland voorkomt zwelt en krimpt echter niet. In de gronden die in Nederland wel krimpen, namelijk de zwaardere kleigronden en de veengronden, vult de zijdelingse aanvoer van grondwater samen met het neerslagoverschot het vochttekort van de zomer weer aan.

Biddle (1983) rapporteert van zijn zeer gedetailleerde vochtonttrekkingsmetingen aan 36 bomen dat in sommige gevallen de uitdroging van het profiel wordt beperkt door zijdelingse aanvoer van grondwater en door oppervlakkig toestromend water op locaties op hellend terrein.

3.1.2 Grondsoort

Krimp komt voor in Engeland in de dikke pakketten zwaardere keilemen en oude tot zeer oude kleien uit het Eoceen tot het Carboon. De grenzen tussen weinig krimpgevoelig, matig krimpgevoelig en zeer krimpgevoelig worden door Driscoll (1983) gelegd bij resp. 30 en 60% lutum. Van een andere grootte de z.g. plasticiteitsindex (verschil tussen het watergehalte (g water per 100 g droge grond) bij de vloeigrens en de uitrolgrens) geeft hij als grenzen aan 12-18% en 22-32%. De hoeveelheid water tussen de vochtspanning van -100 cm en -1000 cm is bij de krimpgevoelige kleien 4-9 volumepercentage, de hoeveelheid tussen -1000 cm en verwelkingspunt (-16 000 cm) is van dezelfde orde van grootte.

Een karakteristiek van de krimpgevoeligheid van een profiel is de verhouding tussen mm's verdampingsoverschot en mm's zakking. Een waarde van 4 geldt als krimpgevoelig, hogere waarden als minder krimpgevoelig (Ward, 1953). Een waarde 3 die volgens Driscoll (1983) geldt voor isotroop krimpende grond, werd niet waargenomen. Uit de metingen van Biddle (1983) blijkt dat in zeer zware kleigronden het vochtgehalte van de lagen tussen 1,5 en 3,5 meter diepte binnen het bereik van populieren ca. 8 volumepercentage lager blijven dan buiten het bereik van de bomen. Van onvoldoende regenval in de winter om het in de zomer onttrokken water weer aan te vullen kan hier

geen sprake zijn omdat van groeiplaatsen in de omgeving op iets lichtere klei een minstens zo grote vochtonttrekking wel wordt aangevuld. Hier moet gedeeltelijk irreversibele indroging zijn opgetreden, die ook wel rijping wordt genoemd, waardoor de dichtheid van de grond ook na bevochtiging hoger blijft op het moment waarop de grond voor de eerste keer door de boomwortels was uitgedroogd. Dit verschijnsel is ook waargenomen bij de nog niet volledig gerijpte gronden in de IJsselmeerpolders (Heidemij, 1991) en in Midden Maasland (dit rapport).

3.1.3 Boomsoort, grootte en invloedssfeer

Bij de beschrijving van bomen wordt in de literatuur meest alleen de boomsoort en hoogte van de bomen gegeven, de kroon diameter en het bladoppervlakte per m² kroon, die sterk bepalend zijn voor de verdamping van de boom (Bakker, 1992) ontbreken praktisch altijd. Er zal per soort en zeker per variëteit een meer of minder duidelijke correlatie bestaan tussen hoogte en totaal bladoppervlak, waardoor verschillen tussen bomen van gelijke hoogte wat betreft vochtonttrekking voor een deel zijn te verklaren.

De invloedssfeer van een boom, opgegeven als fractie van zijn hoogte, varieert van 0,3 tot 2 keer de boomhoogte. Dit is niet alleen afhankelijk van de boomsoort, maar ook van het klimaat. In aride en semi-aride gebieden is het gebied waaruit een boom zijn vocht onttrekt het meest uitgebreid en het diepst (Williams, 1983). Ook in de bodem voorkomende dichte lagen of door de mens aangebrachte obstakels kunnen de wortelgroei in horizontale en verticale richting sterk beïnvloeden (Atsma en in 't Veld, 1992, hoofdstuk vochtvoorziening, pag.119-154).

In Zuid Oost Engeland, waar het klimaat ongeveer gelijk is aan het Nederlandse, wordt als veilige afstand tussen boom en fundering van weg of huis 1 keer de boomhoogte voor solitairen geadviseerd en 1,5 keer voor bomenrijen. Met de opmerking dat voor de boomsoorten iep, populier en wilg deze afstanden nog wel groter kunnen zijn. Deze eisen zijn echter overdreven hoog en onvoldoende gedifferentieerd naar grondsoort, boomsoort en funderingsdiepte (Biddle, 1983).

Uit de langjarige vochtonttrekkingsmetingen van Biddle (1983 en 1987) aan solitair groeiende populier, eik, paardekastanje, linde en berk op grasvelden op zware kleien zonder grondwaterinvloed werd van populieren van 15 tot 20 meter hoog, belangrijke vochtonttrekking tot een afstand van 1 keer de hoogte gevonden en een onttrekkingsdiepte tot 3 meter. De andere soorten van gemiddeld 12 meter hoog onttrokken uit een cirkel met een straal van ca. 6 meter tot een diepte van 1,5 meter; de onttrekking van de eiken was in deze reeks het sterkst.

Verdere informatie over de verschillen tussen de boomsoorten geeft de zeer uitgebreide inventarisatie in de omgeving van Londen, uitgevoerd door de Royal Botanical Gardens, Kew, in de periode 1971-1979 van 2600 gevallen van schade door bomen en in dezelfde streek 11 000 door Cutler en Richardson (1989) geregistreerde gevallen tussen 1979 en 1987 die werden onderzocht i.v.m. schadeclaims aan verzekeringsmaatschappijen. Het blijkt dat van meer dan 98% van de gevallen de schade werd veroorzaakt door het

krimpen van zware klei door uitdroging door boomwortels die onder of tegen de fundering werden aangetroffen. De funderingsdiepte van de meeste gebouwen bedraagt ca. 50 cm, Dit is dus nauwelijks meer dan de funderingsdiepte van de plattelandswegen in Nederland. Uit de uitgebreide rapportage hiervan door Cutler en Richardson (1989), zijn in tabel 1 van de soorten met een voldoende groot aantal observaties (150 tot 1500 stuks) gegeven: De maximale hoogte die op de zware kleien voorkomt, de afstanden waarbinnen 50% en 90% van de schade voorkomt, het percentage van de soort van het totaal aantal schadegevallen en van het totaal aantal in de buurt van huizen aanwezige bomen en de bewortelingsdiepte.

Tabel 1 Schadekarakteristieken van verschillende bomen op kleigronden

Boomsoort	hoogte (m)	50% schade binnen (m)	90% schade binnen (m)	% schade % aanplant	beworteling
populier	25	12	20	8,7/3,0	diep
wilg	15	7	18	5,7/4,5	matig diep
iep	20	8	19	2/ ?	diep
eik	16-23	9,5	18	11,5/2	diep
es	23	7	13	7 /3	diep
esdoorn	17-24	6	12	8,3/13,9	diep
appel peer	10-12	4	8	6 /7	ondiep
berk	12	4	8	1,5/4,9	ondiep
beuk	20	7	11	1 /1	ondiep
linde	20	6	11	8,2/6,4	matig diep
meidoorn	10	5	8,7	4,0/3,5	diep
kastanje	16-25	7,5	15	2,9/2,2	matig
plataan	30	5,5	10	11/13,7	matig
prunus	12	3	7,5	6 /15	ondiep
robinia	18-20	7	10,5	3 /1,8	diep ?
sorbus(spec.)	12	5	9,5	2,4/9,4	ondiep

In een dergelijke inventarisatie spelen ook factoren mee die niet op de boomsoort zelf betrekking hebben maar op de plaats waar ze voorkomen. Zo zijn zeer veel platanen en ook lindes als straatboom geplant in de steden, de afstand tot de gevels is daar gemiddeld gering, 4 à 5 meter. Terwijl wilg vaak in grotere tuinen voorkomt op grotere afstanden van de bebouwing. Ook zijn de variëteiten en verschillende ondersoorten niet verder onderverdeeld, b.v. de esdoorns in Noorse Esdoorns (= *Acer Platanoides*) en gewone esdoorn (= *Acer Pseudoplatanus*).

Een grove indeling is uit de gezamenlijke gegevens van Biddle (1987) en Cutler en Richardson (1989) zeker te verkrijgen. Zeker is dat populier en wilg zeer snel schade veroorzaken tot op afstanden die gelijk kunnen zijn aan de boomhoogte, daarna volgen in 'schadelijkheid' de eik, iep en de es en daarna kastanje, robinia, esdoorn, plataan en linde. Berk, prunus appel en peer veroorzaken relatief weinig schade.

Een andere ingang bij het zoeken naar bomen waarvan weinig schade door krimp is te verwachten is het selecteren op de factoren die de mogelijke vochtonttrekking bepalen. Dit zijn een lage potentiële verdamping en een wortelstelsel dat de diepere lagen van zware kleipakketten niet exploreert. Lagere potentiële verdamping is mogelijk doordat de soort per eenheid van bladoppervlak weinig verdampt. Gegevens hierover zijn schaars, van een enkele soort is bekend dat hij per eenheid van oppervlakte extra veel of extra weinig water gebruikt zoals respectievelijk van schietwilg (150%) en van acer

platanoides (60%) van de meeste andere soorten. Tussen de verdampingssnelheden van veel andere soorten is weinig verschil gevonden (Bakker, 1992). Andere redenen van lage potentiële verdamping zijn het laat in blad komen (b.v. gleditsia, plataan, juglans nigra) en een gering bladoppervlak per eenheid van kroonoppervlak (= dus weinig dicht bladerdek) (b.v. gleditsia en robinia).

Het niet kunnen exploreren van de diepere lagen in de zware kleien, zal vooral zijn terug te voeren op het niet verdragen en overleven van anaërobie, zoals die in de winter onder het grondwater voorkomt en in de zomer ook wel daarboven in de ongescheurde klei, waardoor het wortelstelsel ondiep blijft. We zullen dus moeten zoeken onder de soorten waarvan bekend is dat ze ondiep wortelen (zie ook tabel 1) en natheid slecht verdragen. Een overzicht van eigenschappen van in Nederland aangeplante boomsoorten en -cultivars geeft het boek Stadsbomen van Acer tot Zelkova (Janson, 1989). Dergelijk soort bomen zijn o.a. appel, peer, berk, prunussoorten, zwarte noot, gleditsia, noorse esdoorn. Niet bepaald soorten die op natte komkleien werden aangeplant in het verleden. Toch blijkt een grote verscheidenheid van deze boomsoorten in de singels en tuinen rond de nieuw in het komkleigebied gebouwde boerderijen uitstekend te groeien. Waarschijnlijk om dezelfde reden waarom er schade wordt veroorzaakt door bomen aan de wegen in het gebied; namelijk verlaging van het ontwateringspeil.

3.2 Nederlandse inventarisaties en observaties

In voorgaande jaren zijn er rapportages en inventarisaties verschenen over de scheurvorming van wegen bij bomen. Een groot deel van de gerapporteerde schade gevallen zijn, aangevuld met bodemkundige gegevens, gerangschikt in de bijlagen 1a-h. Hier wordt een samenvatting gegeven van relevante waarnemingen. Ook is hier een samenvatting gegeven van verschillende opvattingen over de schadeoorzaken en van maatregelen ter voorkoming van deze schade.

Land van Heusden en Altena 1969 (Heidemij, 1969)

In juni 1969 was een groot deel van de plattelandswegen van een nieuw dek voorzien. In augustus daarop volgend vertoonden deze dekken op veel plaatsen bij bomen scheuren van 0 tot 2,5 cm breedte, die vaak tot meer dan 50 cm diepte doorliepen in de onderliggende grond, ook vertoonde het wegoppervlak bij de scheuren aan de boomzijde een zakking. Gegevens algemeen: In de voorgaande jaren waren de slootpeilen verlaagd met 50 tot 100 cm (zie ook bijlage 1a). Waargenomen grondwaterstanden liggen in januari 1969 tussen 90 en 135 cm - mv. en in augustus tussen 130 en 200 cm - mv. De periode van 1 april tot 10 augustus 1969 was niet uitzonderlijk droog, het verdampingsoverschot van ca. 160 mm wordt in 30% van de jaren overschreden (de Bruin, 1979). Uit de in augustus 1991 uitgevoerde inventarisatie blijkt ca. 12 km beschadigde weg voor te komen. De scheuren kwamen vooral bij de bomenrijen voor. Bij de aanwezigheid van onderbeplanting waren de scheuren groter. In de bermten werden ook scheuren waargenomen; de scheuren in de bermten liepen in de wegen door. Op plaatsen met grotere afstand tussen de bomen en de weg waren de scheuren minder. De wegen waar de scheuren in voorkwamen lagen zowel op een steen- als een zandfundering. De scheurvorming kwam vooral voor in de komgronden (zie ook

bijlage 1). De boomsoort waarbij schade voorkwam was voor meer dan 90% populier, verder wilg, een enkele es en een rij notenbomen. De bermbeplanting in de komgronden bestond voor ca. 90% uit populier en verder uit wilg. Essen waren praktisch uitsluitend op de lichtere en hogere gronden aangeplant.

Midden Maasland 1981-1983 (Grontmij, 1982 en 1983)

In november 1981 en in mei en november 1982 werd door de Grontmij in opdracht van de Landinrichtingsdienst een oriënterend onderzoek uitgevoerd en in 1983 werden in opdracht van een door de plaatselijke commissie ingestelde werkgroep relevante gegevens uit de periode 1972 tot 1983 nog eens op een rij gezet.

Van de 40 km geïnspecteerde weg in het poldergebied van de ruilverkaveling Midden-Maasland bleek in 1982 7,3 km beschadigd te zijn.

In 1980 was een deel van de sloten 70-100 cm in peil verlaagd. De waargenomen grondwaterstanden reageren daarop duidelijk. De wegdekken bestaan uit 35 tot 90 mm asfalt en een fundering van meestal hoogovenslakken en soms daaronder zand. De totale dikte van de fundering is 230-550 mm inclusief 0-300 mm zand. De wegen scheuren in de lengterichting en langs de scheuren verzakt het wegoppervlak van een enkele centimeter tot maximaal 7 cm. De zomer van 1981 was relatief droog, in 1982 was de periode juli t/m september uitzonderlijk droog (neerslag 110 mm, normaal is dit 225 mm).

Scheuren werden gevonden in de wegen die beplant waren met populier en wilg, waar het polderpeil was verlaagd en de dikte van het pakket klei en veen 3,5-4 m is. In mei kwam in 12 beplante wegvakken zonder peilverlaging 1 keer een scheur voor bij essen, maar van de 10 beplante vakken met peilverlaging waren er 6 gescheurd, alle bij populieren. In onbeplante wegvakken kwamen geen scheuren voor. Na de droge zomer van 1982 waren in november de in mei reeds aanwezige scheuren en zakkingen groter geworden en waren nu ook op sommige plaatsen met essenbeplanting scheuren verschenen.

De peilverlagingen zijn vooral uitgevoerd in de lagere gebieden, waarvan een groot deel ook samenvalt met het gebied met een dikke laag zware klei, waar essen maar weinig zijn aangeplant. De conclusie uit de hier gepresenteerde tellingen dat de voorkomende scheuren zijn veroorzaakt door een combinatie van polderpeilverlaging en het voorkomen van zware klei, is statistisch gezien niet goed te onderbouwen.

Een relatie tussen wegconstructie en schade was niet aanwezig.

Bij de beschrijvingen van schadegevallen valt op dat vrij vaak de situatie wordt beschreven van een weg met aan één kant een diepe watervoerende sloot met een peil van 120-130 cm onder het wegdek en aan de andere kant van de weg een ondiepe sloot met aan die zijde ook een beplanting. De boomzijde van de weg is vaak verzakt en de weg is meestal in het midden gescheurd.

De conusweerstand in het pakket zware klei zijn beneden 1 meter diepte laag (0,1-0,2 MPa), wat duidt op zeer slappe lagen. Op de diepte van 1-1,20 m, wat de diepte is van

de laagste grondwaterstanden van voor de ruilverkaveling, komt een laag voor van brokkelige gescheurde klei, zgn. korte klei. Veen op die diepte is geoxideerd en brokkelig. De doorlatendheid van beide grondsoorten is zeer groot. In een sleuf die in november 1981 was gegraven langs een gescheurde weg waar populieren in de berm stonden (Hoge Weg) was te zien dat zich in de laag van 1 tot 2 m - mv. veel dunne wortels hadden ontwikkeld vooral in de door krimp gevormde scheuren. In een sleuf langs een weg zonder bomen (Gorteweg) was de grond niet veranderd.

In augustus 1983 is een profielsleuf gegraven dwars door een gescheurde weg (Hoge Weg) met aan een zijde bermbeplanting en aan de andere zijde geen beplanting. Langs de boomloze berm loopt een watervoerende sloot met een peil van ca. 120-150 cm - wegopp. Aan de boomzijde was de matig zware klei onder de fundering (70-140 cm - wegoppervlak) en de venige klei (140-195) sterk gescheurd (scheuren tot 5 cm breed) en doorworteld, de onderliggende lagen van zeer zware klei (195-245) en kleilig veen (245-265) waren nat, ongescheurd en niet doorworteld. Onder de andere zijde van de weg is de klei direct onder de fundering nog ongescheurd, nat en niet doorworteld.

In 1982 en 1990 zijn deflectie metingen van beschadigde en onbeschadigde weggedeelten uitgevoerd om de draagkracht van de weg te bepalen. In 1982 werd van de Hogeweg bepaald dat ook van de beschadigde wegvakken de draagkracht nog voldoende was (Grontmij, 1985). Deflectiemetingen in 1990 (Grontmij, 1990) aan 2 beschadigde en 2 onbeschadigde wegvakken geven aan dat de te verwachten levensduur van de beschadigde wegdekken nog 4 en 11 jaar is en van de onbeschadigde > 20 jaar. In het verhardingsadvies voor beschadigde wegen (Grontmij, 1985) wordt ondermeer geadviseerd de bomen langs de beschadigde wegvakken te kappen. In een verhardingsadvies van 1990 (Grontmij, 1990) wordt gesteld dat men de mogelijkheid van kappen van bomen buiten beschouwing wenst te laten. Getuige de afwezigheid van bomen waar ze in 1982 en 1983 wel waren aangegeven en het kappen van bomen voor renovatie van beschadigde wegen in september 1991 is het kapadvies in vele gevallen wel opgevolgd.

Janssen (1992) rapporteert schade aan een weg in 1989 en 1990 in Friesland (Grouw) nadat het slootpeil met 40 cm was verlaagd. De weg was tweezijdig met populieren beplant. De bodem bestaat uit klei (0 tot 140 cm - mv.) op veen. Het slootpeil is ca. 140 cm - mv. De grondwaterstand daalt zomer 1990 tot ca. 210 cm - mv. (in de nog drogere zomer 1991 daalt in dezelfde buis, na het kappen van de bomen, het peil tot maximaal 130 cm - mv.). Het veen blijkt in 1990 uitgedroogd tot 180 cm - mv.

Draijer

In 1989 werd een enquête gehouden onder provinciale kantoren van de Land-inrichtingsdienst naar het voorkomen van scheuren en vervorming van wegen in de nabijheid van bomen (Draijer, 1990). Er werden 64 ingevulde formulieren (waarvan 11 van de Grontmij) terug gestuurd, 19 daarvan waren afkomstig uit Zeeland, 17 uit Brabant, 7 uit N.Holland en 9 uit Overijssel.

Schade werd gerapporteerd op klei op veen (35 x), klei (16 x), en veen (13 x). De boomsoorten bij de beschadigde wegstukken waren: Populier (40%), iep (19%), es (19%), wilg (10%), eik (6%) en een enkele esdoorn, linde, kastanje en berk. Van de

wegen was 75% tweezijdig beplant en 25% eenzijdig. De bermen waren in 75% van de meldingen 2-3 meter breed. De afstand van de bomen tot het wegdek was voor 80% 1-1,5 meter. Langs 88% van de wegen liepen sloten en bij 42% van de meldingen was men zeker dat het slootpeil in de afgelopen jaren was verlaagd. Van het grondwaterpeil had men meestal geen gegevens, alleen van de veengronden is opgegeven dat in 5 van de 13 gevallen het peil hoger was dan 1 m - mv. en in 7 gevallen lager dan 1 m - mv.

Uit deze cijfers is te concluderen dat schade mogelijk is in de genoemde situaties, maar er zijn geen gedetailleerde conclusies te trekken over bijvoorbeeld de invloed van bermbreedte, aanwezigheid van bermsloten, of boomsoort, daar er geen gegevens bekend zijn over de verdeling van dit soort grootheden bij de onbeschadigde wegen. Verder is het ook mogelijk dat in een aantal hier opgegeven gevallen de schade aan de weg door iets anders veroorzaakt wordt dan door het uitdrogen van de grond door bomen (bijvoorbeeld de Conradsweg, zie dit rapport).

In een discussiebijdrage voor de wegbouwkundige werkdagen 1990 geven Dobbelsteen en van Krimpen (1990) een overzicht van verschijnselen, mogelijke oorzaken en herstelmaatregelen en -kosten. Hierin zijn gegevens uit de eerdere rapportages van de Grontmij verwerkt. Een nieuwe suggestie hierin is dat ook extra lage rivierstanden schade kunnen veroorzaken of daaraan bijdragen door beïnvloeding van de grondwaterstanden.

Een situatie waar wat meer kwantitatieve informatie wordt gegeven van de schade en van de bodem is die van een gescheurd en verzakt fietspad langs de Vogelweg in Oostelijk Flevoland (Rijkswaterstaat Flevoland, 1991).

Het fietspad wordt aan één zijde begrensd door een berm van ca. 20 m breed met drie rijen balsem-populieren van 10 à 14 jaar oud. De eerste bomenrij staat op 4 m afstand van het fietspad, de afstand tussen de rijen is ook 4 meter. De berm aan de ander zijde, ook ca. 20 m breed, is alleen begroeid met gras. Midden over het pad (3 m breed) komen waar bomen staan scheuren voor tot 20 cm breed. Waar bomen ontbreken ligt het pad vlak en is onbeschadigd. Op 20-24 oktober 1990 zijn op plaatsen met schade dwars door de weg enkele profielen gegraven en beschreven. Op enkele plaatsen is aan de hand van monsters de grondsamenstelling en het vochtgehalte bepaald.

De bodem bestaat uit een jonge zware zeeklei met 30-40% lutum en 10-20% organische stof tot op een diepte van ca. 2,5 m waar het pleistocene zand begint. De bovenste 50 cm van het bodemprofiel bestaat uit een verwerkte kleigrond die volledig is gerijpt. Daaronder ligt een laag zware klei die alleen aan de bovenkant is gerijpt. Op een representatief profiel ligt het oppervlak van de beplante berm op 1 m uit de wegrand 30 cm onder het niveau van een overeenkomstige plaats in de berm aan de overzijde van de weg. Het wegoppervlak aan de boomzijde ligt 20 cm lager dan het wegoppervlak aan de overzijde. Vaak vertoont het wegdek in het midden een duidelijke knik op de plaats waar ook de weg gescheurd is.

Van de klei onder de berm en het wegdek aan de onbeplante zijde is de laag van 70-100 cm -wegoppervlak gerijpt en de laag van 100-128 cm gedeeltelijk gerijpt. Onder de andere zijde van de weg ligt de grens met de ongerijpte klei op 157 en in de berm op

1 m afstand van de weg op 170 cm - mv. Tot die diepten zijn aan de boomzijde ook boomwortels aanwezig. De beworteling strekt zich uit tot ongeveer het midden van de weg. Alle gerijpte grond is gescheurd; de sterkste scheuring (scheurafstand 15-30 cm, maximale scheurbreedte 80 mm) komt voor tussen wegdek en bomen op 1 m uit de wegrand, de grondkolommen tussen de scheuren hellen in de richting van de bomen. De kleinste scheuren komen voor onder het midden en onder de boomloze rand van de weg (maximaal 20 mm op afstanden 15-20 cm). De grondwaterstanden zijn alleen tijdens het profielonderzoek waargenomen en liggen op dat moment ongeveer op dezelfde diepte als de bovenkant van de ongerijpte klei.

De verklaring van de zakking is dat de boomwortels en uiteraard de water-onttrekking tot ca. midden onder de weg reiken waardoor versnelde rijping optreedt. De dichtheid van het sediment, ook in water verzadigde toestand, kan tot meer dan twee keer zo hoog kan worden. Uitgaande van empirische relaties tussen water-gehaltes, en daaruit berekende dichtheden van gerijpte en ongerijpte gronden, is op basis van het water-, lutum- en humusgehalten berekend dat de berm zonder bomen bij een volledig gerijpte kleipakket, ca. 50 cm zal zakken. Een groot deel van die zakking heeft aan de boomzijde van de weg al plaatsgevonden. Uit een bemonstering onder de weg aan de boomzijde blijkt de bodem tot 1,20 m onder het wegdek gerijpt is.

Om schade te voorkomen is aanbevolen om eerst de bomen te planten en de paden pas aan te leggen als een evenwichtstoestand is bereikt, m.a.w. nadat de grond niet verder meer rijpt.

4 Oorzaken van schade aan wegen

Schade aan wegen die door bermbeplanting ontstaat wordt veroorzaakt door een ongelijkmatige bodemdaling. De oorzaak van deze daling kan verschillend zijn:

- consolidatie;
- verlies van organische stof door oxydatie;
- rijping;
- zwel en krimp;

Consolidatie komt voor na aanleg van een weg op slappe bodems, waar het polderpeil overigens gelijk blijft. Het extra gewicht van de weg en wegfundering vereisen een grotere draagkracht van de bodem, die alleen wordt bereikt door verdichting. Zodra een nieuw evenwicht is bereikt, komt de bodemdaling tot stilstand. Consolidatie is een eenmalig verschijnsel. Polderpeilverlagingen leiden tot grondwaterstandsดาลingen, die weer kunnen leiden tot consolidatie.

Verlies van organische stof is een proces dat vooral in veengronden van belang is en wordt veroorzaakt door afbraak van de organische stof in een zuurstofhoudend milieu, dus boven de grondwaterspiegel. Dit proces wordt bepaald door het peilregime, maar ook door de aanwezigheid van beplantingen, die luchtintrede in de bodem mogelijk maken door vocht onttrekking. Het afbraakproces gaat in principe zolang door tot alle afbreekbare organische stof boven de grondwaterspiegel is verdwenen. Het proces verloopt traag.

Rijping is het proces waarbij onder invloed van grondwaterstandsverlaging slappe bodemlagen kunnen uitdrogen en gaan krimpen. Het gevolg is een permanente bodemdaling. Grondwaterstandsverlagingen worden niet alleen door polderpeilverlagingen veroorzaakt, maar ook door lokale vochtonttrekking door de beplanting.

Zwel en krimp is een reversibel proces. Onder invloed van vochtonttrekking krimpen klei- en veengronden, terwijl ze bij vochtopname weer zwellen en het oorspronkelijk volume innemen. Door dit proces daalt en stijgt de bodem. Als de vochtonttrekking of bevochtiging niet gelijkmatig verloopt, verloopt ook de verandering van de maaiveldshoogte ongelijkmatig.

In het algemeen geldt, dat bodemdalingen of -stijgingen geen schade veroorzaken als ze gelijkmatig zijn.

4.1 Consolidatie

In Nederland is de berekening van de te verwachten klink van meer en minder slappe klei en veenlagen door toename van de bovenbelasting bijna een routinebezigheid (Cultuurtechnische vereniging, 1988, paragraaf 4.3 en 4.4) De toename van de belasting kan worden veroorzaakt door nieuwe of zwaardere wegen en door ophogingen, maar ook door daling van de grondwaterspiegel. De grootte van de uiteindelijke klink is afhankelijk van de dikte van samendrukbare lagen (d), de samendrukbaarheid, gegeven

als de factor C, de reeds aanwezige korrelspanning (p) en de toename daarvan door de toename van de bovenbelasting. De tijd waarin deze uiteindelijke zakking wordt bereikt ligt in de orde van grootte van minder dan een jaar tot vele tientallen jaren en wordt vooral bepaald door de doorlatendheid en dikte van de inklinkende lagen.

Voor de grootte van de uiteindelijke zakking (Z) geldt volgens Terzaghi:

$$Z = \text{som van } (d/C) * \ln((p + \text{toename } p)/p) \quad (4.1)$$

Voorbeeldberekening klink:

Een in Midden-Maasland veel voorkomend profiel bestaat uit: 0-1 m: wegdekconstructie, grondverbetering en gerijpte klei; 1-3 m: klei of veen; > 3 m zand. Stel dat de grondwaterstand zakt van 1 m - wegoppervlak naar 2 m - wegoppervlak. De versnelling van de zwaartekracht wordt afgerond naar 10 m.s^{-2} . De massa van de grond + wegconstructie van 0-1 m is 1800 kg.m^{-3} . De massa van de natte grond van 1-2 m is 1500 kg.m^{-3} .

De korrelspanning p op 2 m diepte de gronddruk van de bovenliggende grond minus de waterspanning: $p = 18 + 15 - 10 = 23 \text{ kPa}$.

Na een grondwaterstandsverlaging van 1 m wordt de massa van de grond van 1-2 m door het verlies van water gesteld op 1300 kg.m^{-3} .

De korrelspanning op 2 m diepte wordt dan: $p = 18 + 13 - 0 = 31 \text{ kPa}$.

De toename van $p = 31 - 23 = 8 \text{ kPa}$. Een mogelijke waarde van C is voor dit geval 13 voor klei en 7 voor veen. Deze waarden van C en p ingevuld in de formule van Terzaghi geeft een klink van de laag van 2-3 m van 23 en 43 mm voor respectievelijk klei en veen.

Wat speelt in de voor ons van belang zijnde gebieden is:

De klink van de ondergrond door het extra gewicht van de wegconstructie (deze is in Midden-Maasland soms te zien doordat de weg over duikers hoger komt te liggen). De klink van het hele gebied door een permanente daling van de gemiddelde grondwaterstand en klink als gevolg van de periodieke grondwaterschommeling in de loop van het jaar. De klink bij de bomen door de plaatselijke grondwaterstandsverlaging bij de bomen. Deze laatste klink is het meest hinderlijk voor de wegen omdat hierdoor altijd ongelijkmatige daling optreedt. Vooral in veengebieden kan de klink zeer hoog zijn. Schothorst (1967 en 1969, geciteerd in het Cultuurtechnisch Vademecum) geeft voor de polder Mastenbroek over een periode van 20 jaar een klink van de 2 m veen van 18 cm na een daling van het gemiddelde grondwater van 0,4 naar 1,40 - mv. Verder voor de Twiskepolder, na verlaging van der grondwaterstand van 0,4 naar 1,80 m, een klink van de 2,8 m veenondergrond van 51 cm in 50 jaar. Wat de invloed van periodieke schommelingen van de grondwaterstand in de loop van het jaar betreft: In het Zegveldbroek is in de verschillende peilproefvakken met gemiddelde grondwaterstanden van 35 tot 80 cm het verschil tussen de zomer en wintergrondwaterstand ca. 45 cm. Dit veroorzaakt een hoogteverschil tussen zomer en winter van de bovenkant van de 6 meter veenondergrond van gemiddeld 3,5 cm (Schothorst, 1978). Berekenen we voor hetzelfde profiel de permanente zakking bij een permanente daling van de gemiddelde grondwaterstand van 0,35 naar 0,80 m - mv. dan komen we uit op een daling van 20 cm. Gegevens over extra klink bij bomen zijn schaars. Janssen (1992) geeft een enkele waarneming van een lagere zomergrondwaterstand in een klei op veen profiel bij bermbeplanting met populieren. Bozok (1960) meet bij essen op zware keileem dat van de totale zakking van 7 cm 6 cm wordt veroorzaakt door krimp van de laag van 0 tot 4 meter en 1 cm door klink van de niet uitdrogende lagen daaronder.

Zakking door klink kan onder bepaalde omstandigheden zeker van belang zijn, maar of deze omstandigheden zich voordoen daar waar schade optreedt door bermbeplanting is een vraag. Schadelijk is vooral plaatselijke klink en die kan alleen veroorzaakt worden door plaatselijke grondwaterstands daling rond de bomen. De doorlatendheid van de ondergrond moet laag zijn (anders kan de boom geen 'deuk' in het grondwater zuigen) waardoor de snelheid van klink waarschijnlijk ook laag is. De eindwaarde van de klink zal in de korte zomerperioden dat de verlaging aanwezig is waarschijnlijk niet bereikt worden.

4.2 Oxydatie

De afbraak van organische stof door micro-organismen (oxydatie) wordt ook genoemd als een van de oorzaken van het plaatselijk zakken van de ondergrond bij bomen. Gekwantificeerd wordt het echter niet. Aan de hand van oxydatie metingen en berekeningen voor veenweide is wel de orde van grootte aan te geven. Uit oxydatie metingen aan monsters van verschillende veensoorten blijkt dat onder aërobe omstandigheden bij de gemiddelde jaartemperatuur (9,5 °C) van onverteerd bosveen en zeggeveen, dat voordien altijd onder het grondwater heeft gelegen, per jaar maximaal 3% van de organische stof oxydeert. Van al gedeeltelijk afgebroken zgn. veraard veen is de afbraaksnelheid 0,5 à 1,0% per jaar (Bakker, 1990. Hendriks, 1992). Van een laag venig materiaal dat bij de bomen boven water uitkomt en indroogt zal de hoeveelheid organische stof bij deze afbraaksnelheden in 30 tot 80 jaar zijn gehalveerd. Ligt het veen slechts gedurende een deel van het jaar boven water, dan zal dit 60 tot 140 jaar duren.

Oxydatie zal dus niet de oorzaak zijn van snelle desastreuze zakkingen. Wat wel grote dikteafname veroorzaakt, vooral van onverteerd veen, is dat door oxydatie, in combinatie met uitdroging en belasting, de structuur van het veen veranderd waardoor het veel dichter wordt.

4.3 Krimp

Zolang de hoeveelheid grond zelf niet veranderd, zoals bij oxydatie het geval is, is de enige mogelijkheid van volumeverkleining het dichter op elkaar drukken van de bodemdeeltjes. In ons geval is verhoging van de korrelspanning (= de druk die de bodemdeeltjes op elkaar uitoefenen) de enige mogelijkheid daartoe (of een grond of een aggregaat ook werkelijk krimpt bij verhoging van de korrelspanning is afhankelijk van de sterkte van de bodemmatrix). De korrelspanning σ' is te berekenen, ervan uitgaande dat de gronddruk (σ_g), veroorzaakt door de totale bovenliggende massa grond, water, wegdek en evt. verkeer, wordt gecompenseerd door de korreldruk en de waterdruk (σ_w).

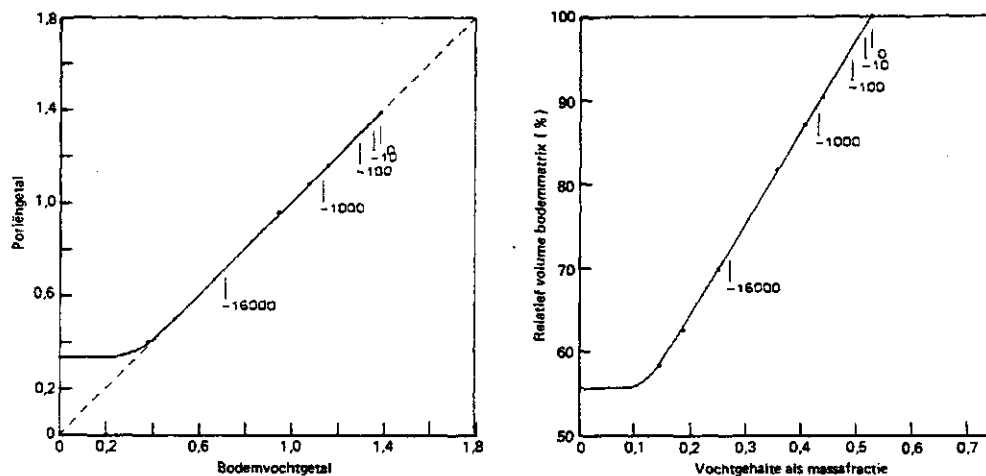


Fig. 1 Krimp karakteristiek van een zeer zware klei te Bruchem, 59,6% lutum en 3,7% humus (uit Bronswijk en Evers, 1987). In de figuren zijn de vochtspanningen in cm waterdruk aangegeven

Voor volledig met water gevulde grond of bodemaggregaten geldt:

$$\sigma_g = \sigma' + \sigma_w \tag{4.2}$$

In dit opzicht bestaat er geen verschil tussen krimp en klink. Men spreekt men echter van krimp als de verhoging van de korrelspanning en de verkleining van het volume wordt veroorzaakt door daling van de waterdruk omdat er water aan de grond wordt onttrokken door plantenwortels of rechtstreekse verdamping. Deze wateronderdruk kan zeer groot zijn. Plantenwortels kunnen met een onderdruk van -1600 kPa (-16 bar) aan het poriënwater zuigen! In hoeverre deze onderdrukken worden bereikt hangt af van de poriëngroottesverdeling van de grond. Een aggregaat van een zware kleigrond heeft alleen zeer kleine poriën. De door de oppervlaktenspanning van het water opgewekte capillaire krachten zijn bij deze kleine diameters van de poriën hoog genoeg om zeer lage waterspanningen, tot zelfs -1600 kPa, in het aggregaat in stand te houden. Bij grond met grote poriën, zoals in grof zand, kunnen slechts hogere wateronderdrukken, tot bijvoorbeeld -20 kPa, worden bereikt zonder dat de poriën worden 'leeggezogen'. Bij elke poriediameter hoort een bepaalde wateronderdruk waarbij de capillaire krachten niet voldoende zijn en waarbij de porie wordt leeggezogen. Afhankelijk van de poriënverdeling van een grond zal bij een bepaalde wateronderdruk een deel van de poriën nog gevuld zijn met water, overeenkomend met een bepaald vochtgehalte van de grond. De relatie tussen de wateronderdruk en het vochtgehalte is de waterretentiekarakteristiek. In veel gevallen wordt de logaritme van de absolute waarde van de wateronderdruk in cm waterdruk gebruikt en in een grafiek uitgezet. Dit is de zogenaamde pF-curve.

Wanneer de poriën gedeeltelijk met water zijn gevuld, zoals in droger wordende grond voorkomt, dan speelt de waterdruk naar rato van de poriënvulling mee, dus geldt:

$$\sigma_g = \sigma' + (\text{volume water/volume poriën}) \times \sigma_w \tag{4.3}$$

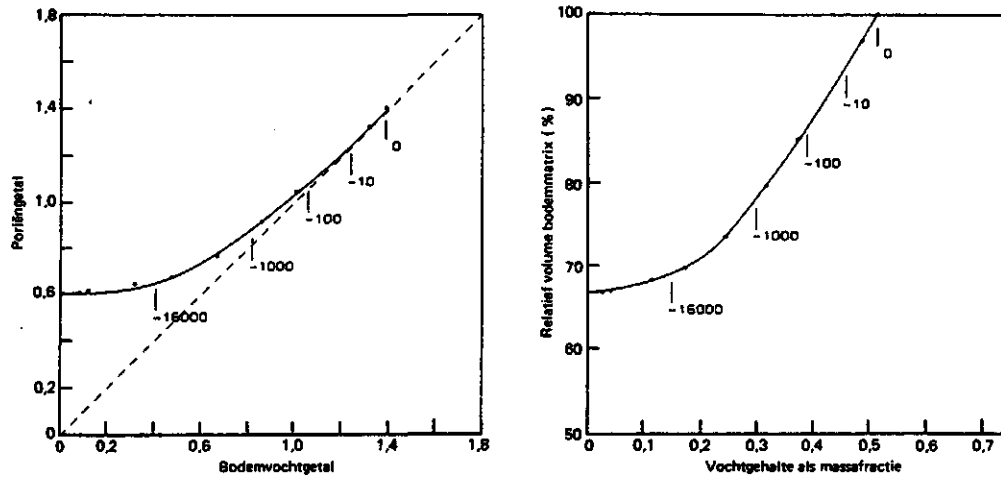


Fig. 2 Krimp karakteristiek van een zavel te Kats, 16,2% lutum en 0,3% humus (uit Bronswijk en Evers, 1987). In de figuren is de vochtspanning in cm waterdruk gegeven

In droog zand bijvoorbeeld veroorzaakt de zeer lage onderdruk van het bodemvocht geen hoge korrelspanning meer omdat dan het volume van het water zeer klein is.

Relatie wateronttrekking en krimp

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

- a 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 zgn. pF-curve, waarin het verband wordt gegeven tussen waterdruk en vochtgehalte;
- b De krimp eigenschappen van de grond. Deze zijn weer te geven in de zgn. krimp karakteristiek waarin het verband tussen vochtgehalte en volume van een bodemaggregaat wordt gegeven (rechterfiguren in fig. 1 en 2).

Door het poriënetal (= volume poriën/volume vaste delen) uit te zetten tegen het bodemvochtgetal (= volume water/volume vaste delen) kan aanschouwelijk worden gemaakt in hoeverre de wateronttrekking resulteert in een krimp (linkerfiguren in fig. 1 en 2). Zolang de kromme overeenkomt met de 45°-lijn zijn alle poriën met water gevuld en is het volume wateronttrekking gelijk aan het volume van de krimp. Voor kleigronden blijkt dit in hoge mate op te gaan. Een afwijking van de 45°-lijn betekent dat er lucht in het aggregaat treedt.

Uit de combinatie van waterretentiekarakteristiek en krimp karakteristiek volgt fig. 3. In deze figuur is voor een aggregaat van zware komklei (lutum 52%, organische stof 4%) 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, 1987 en 1990). Verder wordt voor isotrope krimp aangegeven welk deel van de krimp zich manifesteert in scheuren en welk in zakking.

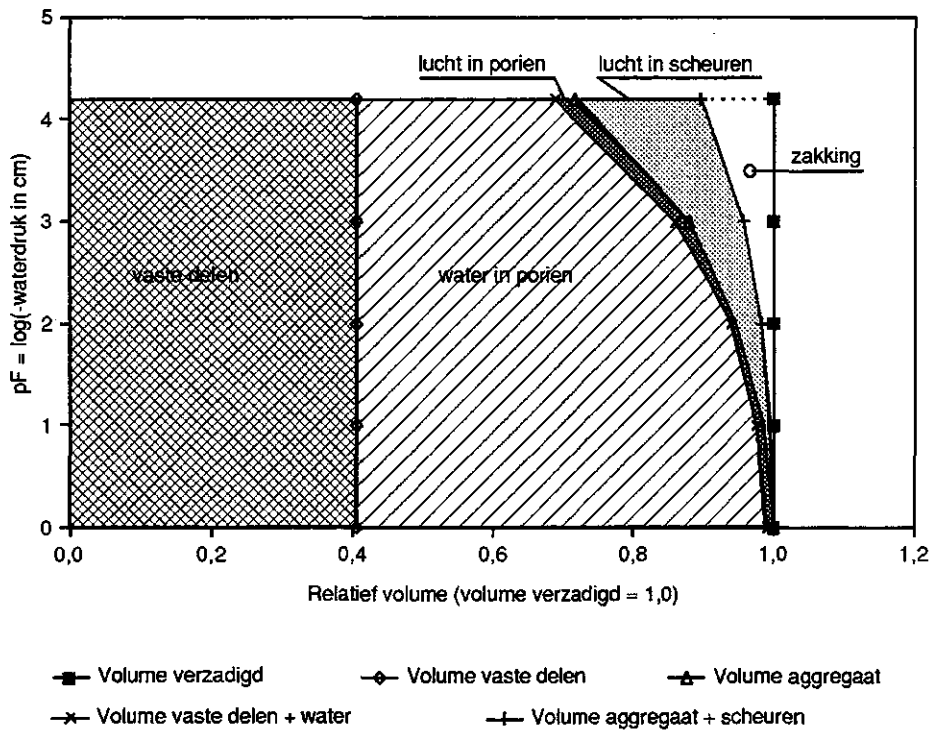


Fig. 3 Verdeling van het relatief volume in vaste delen, water en lucht in relatie tot de vochtspanning van een zeer zware klei uit Bruchem

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 deze klei 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 de kluit. Deze metingen zijn uitgevoerd aan onbelaste kleikluiten.

Onder het wegdek hebben we echter te maken met belaste grond. De korrelspanning op relevante diepten onder de weg veroorzaakt door de massa aan wegconstructie en bovenliggende klei is ca. 5 tot 30 kPa of de druk van 50 tot 300 cm waterkolom. Als het luchtgehalte laag is, is het effect van druk door bovenbelasting op het volume en het watergehalte van een bepaalde massa klei gelijk aan het effect van een even grote wateronderdruk daarop (metingen aan zware kleigronden bij bovendrukken tussen 0 en 214 cm waterkolom, van Vessum, 1989, Bronswijk, 1990). Hierdoor is de krimp en het watergehalte van een belaste klei als functie van de waterdruk te herleiden uit krimpgegevens van een onbelaste klei. Dit kan worden gedaan voor een klei met een bovendruk van bijvoorbeeld 100 cm waterkolom door voor de krimpkarakteristiek en de pF -curve van de onbelaste grond als uitgangsvolume 1 m^3 aggregaat zonder scheuren te nemen met de dichtheid die hoort bij een wateronderdruk van 100 cm, in plaats van bij een waterdruk van 0 cm waterkolom zoals voor onbelaste grond wordt gedaan. Vergelijken we de krimp van zand en lichte grond met die van klei dan is een gegeven dat de bodemmatrix van zand zeer sterk is en hoge korrelspanning kan

verdragen zonder verdichting. Bovendien zijn de poriën tussen de korrels vrij groot, waardoor de poriën reeds bij geringe onderdruk van het bodemwater gevuld worden met lucht, waardoor lage waterdrukken weinig meer bijdragen aan de korrelspanning. In zware kleiaggregaten kunnen de kleiplaatjes makkelijk op elkaar worden gedrukt en de poriën blijven zo klein dat zelfs bij onderdrukken tot soms lager dan het verwelkingspunt van bomen (ca. -16 000 cm water) alle poriën nog gevuld zijn met water waardoor de volle wateronderdruk zich vertaalt in de positieve korrelspanning. Zolang de poriën in de aggregaten gevuld blijven met water zal alle wateronttrekking een even grote volume verkleining veroorzaken.

Om een overzicht te krijgen over de grootte van krimp en waterleverantie van de verschillende kleigronden is voor de serie gerijpte kleien, gegeven door Bronswijk (1987) de krimp en waterverlies tussen een waterdruk van 0 en -1000 en -16000 cm nader beschouwd. Het lutumgehalte (in het onderzochte traject tussen de 18 en 65%) blijkt weinig invloed te hebben op de hoeveelheid water die vrijkomt bij daling van de waterdruk van 0 naar -1000 cm en naar -16000 cm (respectievelijk 100 l.m^{-3} en 250 à 350 l.m^{-3}). In figuur 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 het waterverlies 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. In het algemeen is 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 5, waarin het waterverlies en de krimp bij een verlaging van de vochtspanning van -100 naar respectievelijk -1000 en -16 000 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 door boomwortels onder wegen. Uit een vergelijking van de figuren 4 en 5 blijkt dat in het geval van een belaste kleigrond het percentage waterverlies 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%.

Van veengronden is het mogelijke waterverlies en krimp aanzienlijk hoger. Zie figuren 6 en 7. Een opmerkelijk verschil met klei is dat bij wateronttrekking al snel lucht in de aggregaten komt. Dit betreft blijkbaar een aantal grote poriën in de aggregaten, want nadat deze zijn leeggetrokken komt de verdere vochtonttrekking bijna overeen met de krimp. Deze conclusie kan worden getrokken uit het feit dat in figuur 6 de kromme parallel gaat lopen aan de 45° -lijn. Omdat in het traject met lage vochtspanningen in eerste instantie de grove poriën worden leeggetrokken, is de krimp van veen in dat stadium gering.

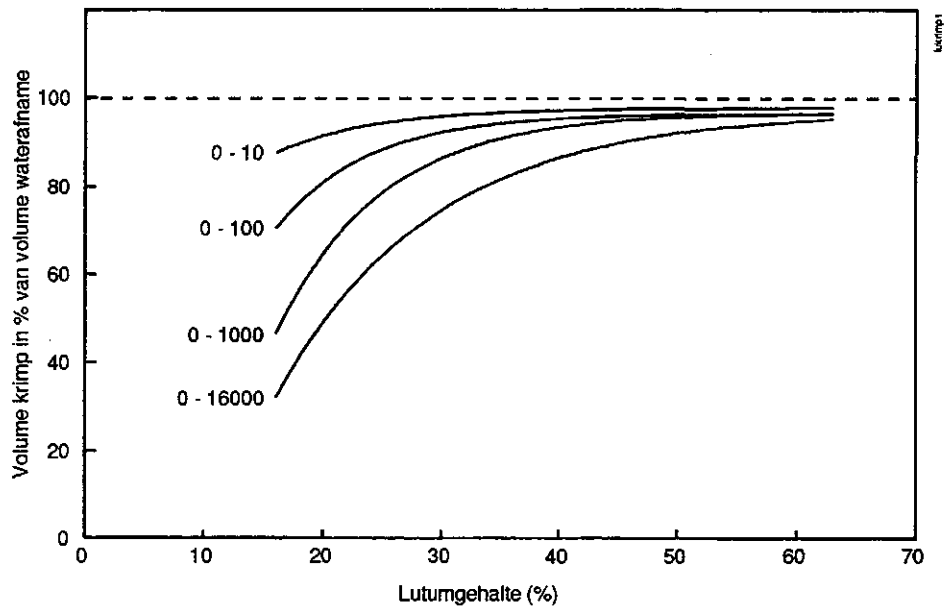


Fig. 4 Volume krimp als percentage van de afname van het watervolume bij verlaging van de vochtspanning van 0 naar resp. -10, -100, -1000 en -16000 cm waterdruk in relatie tot het lutumgehalte

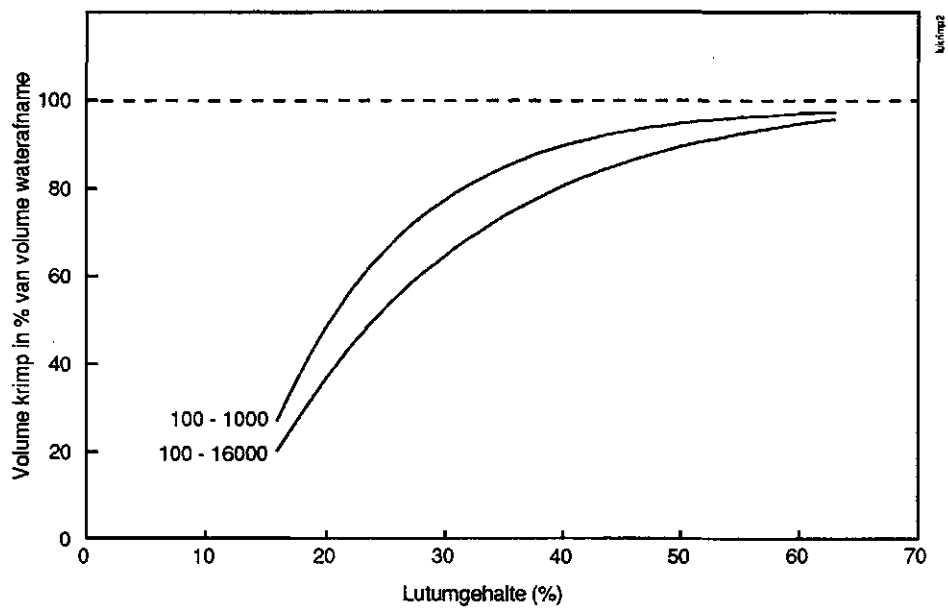


Fig. 5 Volume krimp als percentage van de afname van het watervolume bij verlaging van de vochtspanning van -100 tot respectievelijk -1000 en -16000 cm waterdruk in relatie tot het lutumgehalte

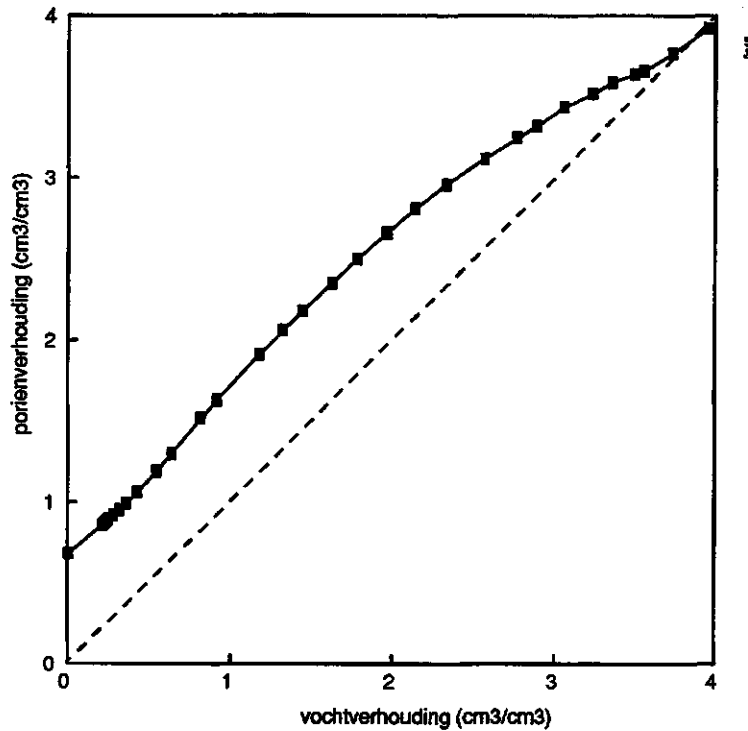


Fig. 6 Krimp karakteristiek klei veen te Zegveld, organische-stofgehalte 45%

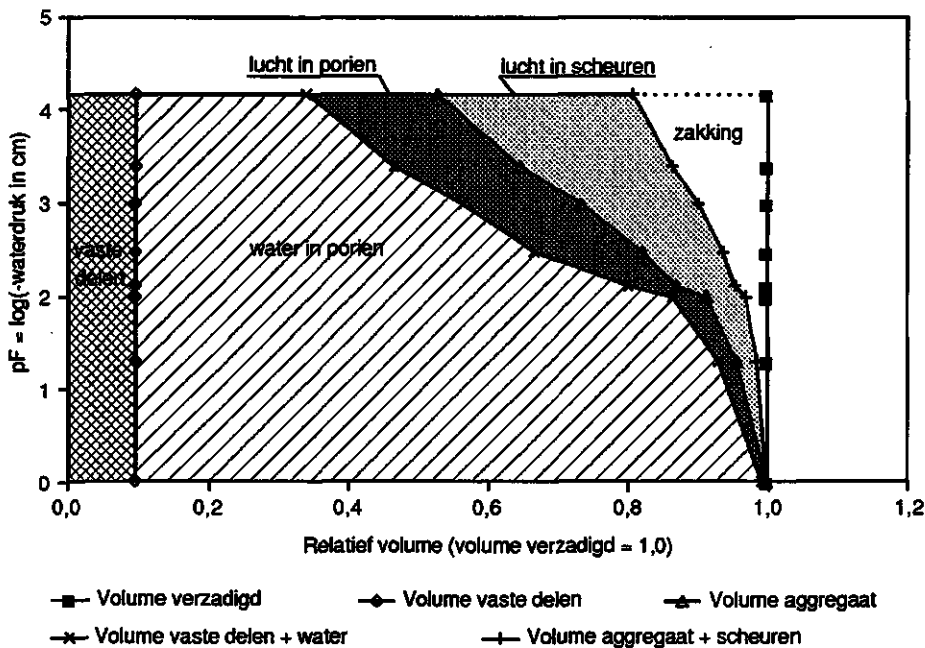


Fig. 7 Verdeling van het relatief volume in vaste delen, water en lucht in relatie tot de vochtspanning van veen met 80% organische stof

In figuur 7 blijkt dit traject voor een veen met een organische-stofgehalte van 80% tot een vochtspanning van -100 cm te lopen. Omdat een veengrond veel meer water bevat dan een kleigrond is de totale krimp van een veengrond ook veel groter.

Voor de berekening van de zakking van belast veen uit die van onbelast veen is dezelfde beredenering mogelijk als voor kleien en kan de bovenbelasting worden beschouwd als

een negatieve waterdruk. Het meeste onbelaste veen bevat bij -100 cm waterdruk echter al wat lucht. De korrelspanning bij 100 cm bovendruk zal daardoor waarschijnlijk iets hoger zijn dan bij -100 cm waterdruk en het volume daardoor iets kleiner. Op de veranderingen in volume en watergehalte bij dalende waterdruk zal dit echter weinig effect hebben daar het luchtgehalte in veenaggraten bij uitdroging lange tijd constant blijft.

Relatie krimp - zakking

De verdeling van de krimp tussen zakking en scheuren is afhankelijk van de krimp-richting. Van onbelaste gerijpte klei is de krimp isotroop oftewel in alle richtingen gelijk (Bronswijk, 1990). Figuur 8 laat een kubus grond voor en na isotrope krimp zien.

Uit de figuur volgt dat $V = z^3$ en $V - \Delta V = (z - \Delta z)^3$. Het volume van de kubus volgt bij uitdroging de krimpkarakteristiek en is afhankelijk van het gewichtsvochtgehalte $W \Rightarrow V - \Delta V = V(W) = (z - \Delta z)^3$

Uitwerking hiervan, waarbij voor $z^3 = V$ wordt ingevuld, levert:

$$\epsilon_z = \Delta z/z = 1 - (V(W)/V)^{1/3} \quad (4.4)$$

Voor de dikteafname van d meter klei geldt dan:

$$\text{dikteafname} = d \times \{1 - (V(W)/V)^{1/3}\} \quad (4.5)$$

De rest van de volumevermindering is terug te vinden in de vergroting van het volume scheuren. Van zeer slappe, ongerijpte klei en van klei met een zeer hoge bovenbelasting, die zo groot is dat de structurelementen bezwijken en er geen verticale scheurvorming op kan treden, bestaat 100% van de volumevermindering uit het dunner worden van de lagen en het zakken van het oppervlak. De diktevermindering wordt dan:

$$\text{dikteafname} = d \times \{1 - V(W)/V\} \quad (4.6)$$

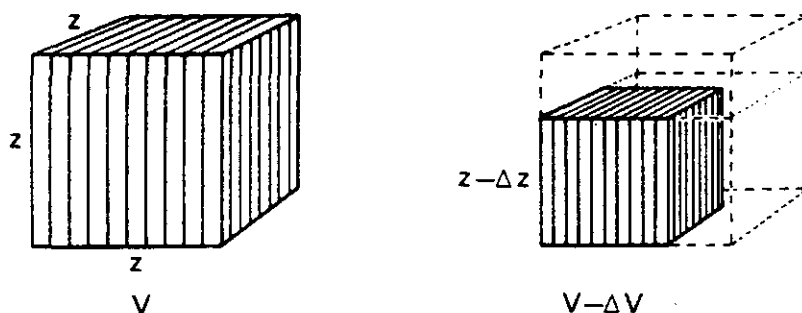


Fig. 8 Isotrope krimp van een grondkubus met een initiële dikte z en volume V

Berekening van de zakking en krimp uit het vochtgehalte als massafactie

De volumeafname van de klei en daaruit de hoeveelheid onttrokken water en de daling van het oppervlak is te berekenen uit het vochtgehalte W (g/g) voor en na wateronttrekking resp. W_n en W_d (indices: n = 'nat', d = 'droog') en de dichtheid van de vaste delen, d_s . Daarmee is de volumeafname van de klei en daaruit de daling van het oppervlak en de hoeveelheid onttrokken water te berekenen.

Beschouwd wordt een aggregaat met 1 gram vaste delen (met dichtheid d_s) en W gram water (met dichtheid 1 g.cm^{-3}). Het volume van het (verzadigde) aggregaat is dan $V = W + 1/d_s$

Er geldt dan:

$$V_d/V_n = (W_d + 1/d_s)/(W_n + 1/d_s) \quad (4.7)$$

waarin:

V_d en V_n = volume kleiaggregaat na resp. voor wateronttrekking

Invullen van (4.7) in (4.5) en (4.6) voor een d meter dikke kleilaag levert:

$$\text{dikteafname bij ongerijpte klei} = d \times \{1 - (W_d + 1/d_s)/(W_n + 1/d_s)\} \quad (4.8)$$

$$\text{dikteafname bij gerijpte klei} = d \times \{1 - ((W_d + 1/d_s)/(W_n + 1/d_s))^{1/3}\} \quad (4.9)$$

Het grote voordeel van de bepaling van de zakking uit het gewichtsvochtgehalte voor en na krimp is de eenvoudige en weinig foutgevoelige bemonster- en bepalingsmethode. Een nadeel is dat de dichtheid van de vaste delen bekend moet zijn. Bij hoge organische-stofgehalten kunnen hierdoor grote fouten in de zakkingsberekening sluipen. Een andere foutenbron kan vooral optreden bij een bemonstering van de grond met een grondboor. Het water in de grote poriën en in eventueel al aanwezige (krimp-)scheuren vóór de krimp kan daarbij door de grond worden geroerd en meebemonsterd. Dit water in de grote poriën en scheuren draagt niet bij aan de krimp en moet vóór de vochtbepaling aan het monster worden onttrokken.

Berekening van de zakking en krimp uit het vochtgehalte als volumefractie

De krimp en zakking kunnen ook worden bepaald uit het volumevochtgehalte voor (θ_n) en na (θ_d) de krimp. Dit kan aan de hand van figuur 8 worden uitgelegd. In dit geval is het eenvoudiger om uit te gaan van een éénheidskubus vóór de krimp met zijden $z = 1$, een volume $V_n = z^3 = 1$ en $\Delta z/z = \Delta z = \epsilon_z$

$$\text{Vóór het krimpproces is het volumevochtgehalte } \theta_n = Vw_n/z^3 = Vw_n \quad (4.10)$$

$$\text{Erna is het volumevochtgehalte } \theta_d = Vw_d/(z^2(z-\Delta z)) = Vw_d/(1-\epsilon_z) \quad (4.11)$$

waarin:

Vw_n en Vw_d het volume vocht in het aggregaat voor en na de krimp

Bedacht moet worden dat bij de volumebemonstering met bijvoorbeeld steekringen de verticale krimpscheuren worden meebemonsterd! Voor het begrip is het eenvoudigst om in gedachten de bemonstering vóór de krimp uit te voeren met een ringhoogte van z cm en na de krimp met een ringhoogte van $(z-\Delta z)$ cm.

Bij zware kleien is het volume water Δw dat aan het aggregaat wordt onttrokken gelijk aan de volumeverkleining:

$$\Delta w = Vw_n - Vw_d = V_n - V_d = 1 - V_d \quad (4.12)$$

Combineren van (4.12) met (4.4) waarbij $V = V_n$ en $V(W) = V_d$ levert:

$$\epsilon_z = 1 - (1 - \Delta w)^{1/3} \quad (4.13)$$

Combineren van (4.10), (4.11), (4.12) en (4.13) levert:

$$\Delta w = 1 - ((\theta_n - \Delta w)/\theta_d)^{1/3} \quad (4.14)$$

Met een iteratieproces kan vervolgens Δw worden bepaald. Met (4.13) kan daarna de relatieve krimp worden berekend. Vermenigvuldigd met de laagdikte van de betreffende kleilaag levert dit de bijdrage van die laag aan de zakking van het maaiveld of de weg.

Het grote voordeel van deze methode is dat de dichtheid van de vaste delen niet bekend hoeft te zijn. Het grote nadeel is dat de scheuren moeten worden meebemonsterd. Dit houdt in dat er grote en/of vele grondmonsters moeten worden gestoken om in de bemonstering de juiste verhouding tussen scheurvolumen en aggregaatvolumen te waarborgen.

Het is mogelijk om dit probleem te omzeilen door de scheuren juist niet mee te nemen in de bemonstering door in een (groot) aggregaat te bemonsteren. In dat geval heeft het volumevochtgehalte betrekking op het aggregaat en geldt:

$$\theta_d = (\theta_n - \Delta w)/(1 - \Delta w) \quad (4.15)$$

waaruit volgt:

$$\Delta w = (\theta_n - \theta_d)/(1 - \theta_d) \quad (4.16)$$

Deze twee betrekkingen gelden ook bij rijping van klei, waarbij geen verticale krimpscheuren ontstaan en alle volumekrimp resulteert in zakking.

Berekening van de zakking en krimp uit het droog volumegewicht

Een derde methode is de krimp en zakking te bepalen uit het droog volumegewicht voor (γ_n) en na (γ_d) de krimp.

Stel het droog gewicht van het bij de tweede berekeningsmethode genoemde aggregaat met het volume vóór krimp van $V_n = 1$ op G . Dan is:

$$\gamma_n = G/V_n = G \quad (4.17)$$

Analoog aan vergelijking (4.11) is dan:

$$\gamma_d = G/(1 - \epsilon_z) \quad (4.18)$$

$$\epsilon_z = 1 - \gamma_n/\gamma_d \quad (4.19)$$

waarmee de krimp en zakking kan worden berekend.

Combinatie met (4.13) levert twee vergelijkingen die nuttig kunnen zijn bij een vergelijking van de verschillende berekeningsmethoden:

$$\gamma_d = \gamma_n / (1 - \Delta w)^{1/3} \quad (4.20)$$

$$\Delta w = 1 - (\gamma_n / \gamma_d)^3 \quad (4.21)$$

De betrekkingen (4.18) en (4.19) gelden ook bij *rijping* van klei, waarbij geen verticale krimp-scheuren ontstaan en alle volumekrimp resulteert in zakking. Bij *rijping* is $\epsilon_z = \Delta w$ en worden de betrekkingen voor γ_d en Δw :

$$\gamma_d = \gamma_n / (1 - \Delta w) \quad (4.22)$$

$$\Delta w = 1 - (\gamma_n / \gamma_d) \quad (4.23)$$

Indien *in een aggregaat* wordt bemonsterd gelden de betrekkingen (4.22) en (4.23) ook en worden de betrekkingen voor γ_d en ϵ_z :

$$\gamma_d = \gamma_n / (1 - \epsilon_z)^3 \quad (4.24)$$

$$\epsilon_z = 1 - (\gamma_n / \gamma_d)^{1/3} \quad (4.25)$$

Bij de berekening van de krimp en zakking uit het droog volumegewicht gelden dezelfde voor- en nadelen als bij de berekening uit het volumevochtgehalte. Een extra voordeel is echter dat het al of niet meebemonsteren van water in de scheuren geen invloed heeft en de berekening van de verticale krimp eenvoudiger is.

In het Cultuurtechnisch Vademecum (Cultuurtechnische Vereniging, 1988) wordt een berekeningswijze gegeven voor de rijping waarbij het specifiek of massiek volume ($\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$) wordt gebruikt. Dit is de reciproque waarde van het droog volumegewicht ρ_d ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$). (N.B. De in het Vademecum op blz. 245 gegeven formule voor de berekening van het massiek volume uit een massabemonstering is niet juist! Het volume wordt ten onrechte gedeeld door het *natte* totale massagewicht. Bovendien moet in de formule erna de massa van het water worden gedeeld door soortelijke massa van water). Deze berekeningswijze is in wezen dezelfde als een berekening uit het droog volumegewicht.

Eén van de uitgangspunten bij alle drie berekeningsmethoden is dat de grondmonsters uit de bemonstering vóór en na de krimp vergelijkbaar zijn. Door meer dan één berekeningsmethode toe te passen kan gecontroleerd worden of in voldoende mate aan dit uitgangspunt wordt voldaan.

Berekening van de zakking indien lucht in de aggregaten toetreedt

De figuren 4 en 5 laten zien dat bij zware kleien slechts weinig lucht in de aggregaten toetreedt, zodat de aanname dat de aggregaten volledig verzadigd blijven bijna volledig opgaat en de formules 4.7, 4.8 en 4.9 kunnen worden gebruikt. Voor lichtere kleien moeten deze formules worden aangepast, waarbij gebruik wordt gemaakt van de relatie tussen de afname van de hoeveelheid water en de krimp zoals gegeven in figuur 5. De

verhouding tussen het volume krimp en het volume afgenomen water wordt aangegeven met r:

$$r = \text{krimp} / \text{afname water} \quad (4.26)$$

Er wordt uitgegaan van een éénheidskubus vóór de krimp in volledig verzadigde toestand met zijden $z = 1$, een volume $V_n = z^3 = 1$ en $\Delta z/z = \Delta z = \epsilon_z$. Het droog volumegewicht van deze éénheidskubus voor de krimp is γ_n . Het volume van de éénheidskubus na de krimp is:

$$V_d = 1 - r \times (W_n - W_d) \times \gamma_n \quad (4.27)$$

Invullen van (4.27) in (4.4) levert:

$$\epsilon_z = 1 - (1 - r \times (W_n - W_d) \times \gamma_n)^{1/3} \quad (4.28)$$

De grond is vóór de krimp volledig verzadigd, zodat γ_n overeen komt met:

$$\gamma_n = (1/d_s + W_n)^{-1} \quad (4.29)$$

Invullen van (4.29) in (4.28) levert:

$$\epsilon_z = 1 - (1 - r \times (W_n - W_d)/(1/d_s + W_n))^{1/3} \quad (4.30)$$

Bij veen lopen een aantal grotere poriën al bij lage vochtspanningen leeg en treedt lucht in, zonder dat hierbij krimp van beduiding optreedt (zie figuur 6). De hoeveelheid water in die grotere poriën is op basis van nog niet gepubliceerde gegevens van het SC-DLO geschat op 12% op volumebasis. Voor de zakkingsberekening moet in formule 4.7 hier rekening mee worden gehouden. Voor 1 gram vaste delen is het volume in droge toestand dan:

$$V_d = W_d + 1/d_s + 0,12/\gamma_n \quad (4.31)$$

Invullen van (4.31) in (4.5) en (4.6) voor een d meter dikke veenlaag levert voor ongerijpt veen:

$$\text{dikteafname} = d \times \{1 - (W_d + 1/d_s + 0,12/\gamma_n)/(W_n + 1/d_s)\} \quad (4.32)$$

Idem voor gerijpt veen:

$$\text{dikteafname} = d \times \{1 - ((W_d + 1/d_s + 0,12/\gamma_n)/(W_n + 1/d_s))^{1/3}\} \quad (4.33)$$

Rijping van klei

Uit het voorgaande blijkt dat het van groot belang is of de grond onder de weg al of niet gerijpt is, omdat de zakking bij rijpen ruwweg 3 maal groter is dan de zakking bij de isotrope krimp van gerijpte grond. De mate van rijping wordt gekarakteriseerd door de rijpingsfactor $n = \text{aantal grammen water per gram lutum}$ (Pons en Zonneveld, 1965,

Cultuurtechnisch Vademecum, Cultuurtechnische Vereniging, 1988):

$$n = (A - 0,2 R) / (L + bH) \quad (4.34)$$

waarin:

A = totaal watergehalte in g per 100 g droge grond

L = lutumgehalte in g per 100 g droge grond

H = organische-stofgehalte in g per 100 g droge grond

R = niet colloïdale minerale delen 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

Door Pons en Zonneveld (1965) wordt een classificatieschema gegeven voor rijpende gronden:

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	ongelijpt	zeer slap, bijna vloeibare modder

Indien kleigrond door verdamping aan het oppervlak of door vochtonttrekking door beworteling sterk uitdroogt, zal de kleigrond op termijn volledig rijpen tot een minimumwaarde van $n = 0,4$ (Rijniersce, 1983). Deze volledige rijping, die plaatsvindt tussen $n = 0,7$ en $n = 0,4$, is isotroop en niet reversibel. Door de wortels van bomen zal eventueel ongerijpte kleigrond onder een weg en boven het laagste grondwaterpeil volledig worden gerijpt. Het is zelfs mogelijk dat de aanvoer van grondwater de onttrekking door de boom niet kan bijbenen. In dat geval zal er plaatselijk een 'deuk' in de grondwaterstand ontstaan, waardoor de klei tot onder het omringende laagste grondwaterpeil rijpt. De te verwachten zakking door het rijpingsproces kan worden berekend met formule 4.8. Het gewichtsvochtgehalte na wateronttrekking W_d is daarin het vochtgehalte voor een gerijpte kleigrond, die kan worden bepaald uit formule 4.34 waarin $n = 0,7$ wordt ingevuld:

$$W_d \text{ (gerijpt)} = 0,01 A = 0,002 R + 0,007 (L + 3H) \quad (4.35)$$

De zakking door rijping heeft als voordeel dat het niet reversibel is. Bij wat dikkere kleilagen is de zakking door rijping zo groot dat bij ongelijke zakking scheurvorming in de weg bijna niet te vermijden is.

Bij veen vindt ook een soort rijpingsproces plaats. In het Cultuurtechnisch Vademecum (Cultuurtechnische Vereniging, 1988) wordt een sterk ingedroogd profiel gegeven, waarin de maximale irreversibele krimp is bereikt. Bovenin het profiel, waar de grootste krimp wordt gevonden, is de dichtheid van organische stof $\rho_{dh} = 0,30$ tot $0,35 \text{ g.cm}^{-3}$. Door de boomwortels zal het veen in ongeveer dezelfde mate uitdrogen als bovenin

het profiel en uiteindelijk dezelfde irreversibele krimp en de daarbijbehorende dichtheid bereiken. Met deze aanname kan de irreversibele zakking worden berekend uit:

$$Z_k = d_1 (1 - \rho_{dh1}/\rho_{dh2}) \quad (4.36)$$

waarin:

d_1 = dikte beschouwde laag (m)

ρ_{dh1} = dichtheid organische stof beschouwde laag (kg.m^{-3})

ρ_{dh2} = idem na rijpen (300 à 350 kg.m^{-3})

Bedacht moet worden dat in formule 4.36 de volumedichtheid van het organische stof ρ_{dh} wordt beschouwd en die van de minerale delen ρ_{dm} buiten beschouwing wordt gelaten (volumedichtheid totaal $\rho_d = \rho_{dm} + \rho_{dh}$). Het aandeel minerale delen moet uiteraard beperkt blijven.

Stabiliteit van krimpscheuren onder een bovenbelasting

Beschouwd wordt een zware klei met grote structuurelementen. Onderling oefenen deze elementen slechts verwaarloosbare horizontale krachten op elkaar uit.

Onder de grondwaterspiegel en in volledig met water verzadigde grond wekt de waterdruk in de grond in verticale richting een korrelspanning op (Koorevaar et al., 1983). Zodra er echter ook verticale grensvlakken zijn tussen lucht en water, zoals langs de barsten in gescheurde gronden en in grond waarin lucht in de poriën komt die in open verbinding staat met de atmosfeer, werkt de waterdruk alzijdig en nemen de korrelspanningen in verticale en horizontale richtingen in dezelfde mate toe. Een bovenbelasting vergroot de verticale korrelspanning. Door een grote bovenbelasting kunnen de structuurelementen gaan bezwijken, waardoor de scheuren worden dichtgedrukt en horizontale korreldrukken worden opgewekt ter grootte van ongeveer 50% van de verticale korreldrukken (Tschebotarioff, 1951). Deze situatie wordt buiten beschouwing gelaten omdat die inhoudt dat er grote vervormingen optreden, oftewel dat de weg overbelast wordt en verzakt.

Het volgende voorbeeld geeft het verloop van de verticale en horizontale korrelspanningen tijdens het uitdrogen van een zware klei onder een weg:

Voorbeeld:

Mogelijke korreldrukken op 100 cm onder een weg (opbouw profiel: 10 cm wegdek, 30 cm zand, daaronder zware klei).

a: Bij een grondwaterstand van 80 cm - wegopp.:

gewicht wegdek, vochtig zand en klei = 1740 kg.m^{-2} geeft: $\sigma_{gv} = 17,4 \text{ kPa}$

20 cm grondwater boven punt geeft: $\sigma_w = 2,0 \text{ kPa}$

korreldruk verticaal: $\sigma_{gv} - \sigma_w = \sigma'_v \Rightarrow \sigma'_v = 15,4 \text{ kPa}$

korreldruk horizontaal (σ_w in hor. richting geen effect): $\sigma'_h = 0 \text{ kPa}$

(σ_{gh} horizontaal = 0)

b: grondwater 120 cm - wegopp.:

grond nog niet uitgedroogd: $\sigma_{gv} = 17,4 \text{ kPa}$

waterdruk is - afstand tot het grondwater:	$\sigma_w = -2,0 \text{ kPa}$
korreldruk verticaal:	$\sigma'_v = 19,4 \text{ kPa}$
korreldruk horizontaal:	$\sigma'_h = 2,0 \text{ kPa}$
c: grondwater > 120 cm:	
grond licht uitgedroogd:	$\sigma_{gv} = 16,8 \text{ kPa}$
waterdruk ter plaatse gedaald tot -200 cm:	$\sigma_w = -20,0 \text{ kPa}$
korreldruk verticaal:	$\sigma'_v = 36,8 \text{ kPa}$
korreldruk horizontaal:	$\sigma'_h = 20,0 \text{ kPa}$
d: grondwater > 120 cm:	
grond sterker uitgedroogd:	$\sigma_{gv} = 16,5 \text{ kPa}$
waterdruk ter plaatse gedaald tot -900 cm:	$\sigma_w = -90,0 \text{ kPa}$
korreldruk verticaal:	$\sigma'_v = 106,5 \text{ kPa}$
korreldruk horizontaal:	$\sigma'_h = 90,0 \text{ kPa}$

De verticale korreldruk is altijd hoger dan de horizontale korreldruk. Bij verder uitdrogen van de grond nemen de horizontale en verticale korreldrukken als gevolg van de waterdruk echter evenveel toe (de bijdrage van de bovenbelasting aan de verticale korreldruk neemt iets af doordat de bovenliggende grond door uitdroging iets lichter wordt). Het verschil tussen horizontale en verticale korreldruk wordt daardoor relatief steeds kleiner en daardoor de draagkracht van de grond steeds hoger. De verticale korreldruk (σ'_v) waarbij de grondkolommen nog niet bezwijken en de scheuren nog niet dicht worden gedrukt is volgens het Coulomb-Mohr bezwijkcriterium (Koolen and Kuipers, 1983):

$$\sigma'_v < \sigma'_h \tan^2(45^\circ + 1/2 \varphi) + 2c \tan(45^\circ + 1/2 \varphi) \quad (4.37)$$

waarin

- σ_h = horizontale korrelspanning (kPa)
- φ = hoek van inwendige wrijving
- c = cohesie (kPa)

Van droog of verzadigd scherp zand bedraagt de hoek van inwendige wrijving (φ) 45° en de cohesie 0 kPa. Als het lutumgehalte stijgt dan daalt de hoek van inwendig wrijving en neemt de cohesie toe. Als de dichtheid van klei toeneemt dan stijgt zowel φ als c . Van zware klei varieert φ tussen 15° en 20° en c van 1 tot 100 kPa.

Voorbeeld:

Beschouwd wordt een klei met de volgende kenmerken: Lutumgehalte 47%, dichtheid 1.16 g/cm^3 , $\varphi = 17^\circ$ en $c = 20 \text{ kPa}$ (Bakker, 1977). Stel het extreme geval dat de grond gescheurd is en dat de klei zich op of onder het grondwater bevindt, dan is $\sigma_w = 0$ en $\sigma_3 = 0$. Uit formule (4.37) volgt dan dat de klei pas afschuift en de scheuren worden dichtgedrukt bij een bovendruk van meer dan 54,0 kPa.

Voor veen geeft von Soos (1980) een φ van 24° en een c van 15 kPa. De bovendruk waarbij bij een waterdruk van 0 cm en $\sigma_3 = 0$ het veen bezwijkt is in dit geval 46,2 kPa.

Bij uitdrogen van klei of veen stijgt het vermogen om een bovenlast te kunnen dragen. Daalt in de bovengenoemde klei de waterdruk van 0 tot -10 kPa dan stijgt daardoor de horizontale (en verticale) korrelspanning tot 10 kPa, en bezwijkt de klei volgens de formule (4.37) bij een verticale korreldruk van 72,3 kPa. Rekening houdende met de korrelspanning t.g.v. de negatieve waterspanning wordt de maximaal toelaatbare verticale korrelspanning door een bovenbelasting: $72,3 - 10,0 = 62,3$ kPa.

Een bovenbelasting door een voertuig met de maximaal toegestane aslast van 10 ton resulteert op een diepte van één meter in een toename van de verticale korrelspanning met ongeveer 10 kPa. De verticale korrelspanning op één meter diepte door de wegconstructie en de natte kleigrond is ongeveer 17 kPa. In totaal is de verticale grondspanning dan $17 + 10 = 27$ kPa.

Direct onder de wegfundering op een diepte van ca. 0,5 m worden de verticale korrelspanningen door het eigen gewicht en de maximale aslast geschat op respectievelijk 9 kPa en 40 kPa.

De verticale korrelspanningen door de belasting met het eigen gewicht van de grond en de wegconstructie plus de maximale aslast kan worden vergeleken met de berekende toelaatbare verticale korrelspanningen. Daaruit blijkt dat gescheurde grond al bij kleine negatieve waterspanning sterk genoeg is om een grote bovenbelasting te dragen.

Dit betekent dat van eenmaal goed uitgedroogde en daardoor gerijpte klei of veen onder een wegdek de bij deze rijping ontstane scheuren zeker niet zullen worden dichtgedrukt.

5 Waarnemingen

5.1 Hutstraat

De Hutstraat is een in het kader van de ruilverkaveling aangelegde weg ter ontsluiting van het komgrondgebied. Een stuk van deze weg is dubbelzijdig beplant met wilg, een stuk enkelzijdig en een groot deel is onbeplant. De plantafstand is 8 meter, de bomen zijn nog relatief klein met een kroondoorsnede van 5,5 m. Dit betekent bij de enkele rij 3 m² kroonoppervlak per strekkende meter weg. Bij alle beplanting is de weg gezakt en bij de enkelzijdige beplanting ook vaak gescheurd in de lengterichting. Het bodemprofiel is representatief voor de profielen in Midden-Maasland waar schade voorkomt. Deze profielen bestaan uit een pakket zware klei van 2 à 3 m dikte, met soms daarin enkele dunne veenlagen. De gemiddelde laagste grondwaterstand bedraagt 1,5 à 2 m, de gemiddeld hoogste grondwaterstand ca. 0,5 m.

Hoogteverloop wegdek in de lengterichting

Het langspanprofiel van de weg is in 1991 enkele malen opgemeten. Er blijken in de voorzomer zowel bij de enkele als dubbele boombeplanting nog verlagingen in de weg aanwezig te zijn van ca. 15 cm. Bij dubbele beplanting is de weg over de volle breedte lager, bij de enkele beplanting is de zakking aan de boomzijde het grootst, waardoor de weg scheef komt te liggen (zie fig. 9). Eind augustus is de weg zowel bij de enkele als de dubbele beplanting ca. 6 cm verder gezakt, de wegstukken zonder beplanting zijn niet gezakt. De in het voorjaar gemeten zakking moeten we als permanent beschouwen, de zakking gedurende de zomer is reversibel, deze zal in de winter weer verdwijnen.

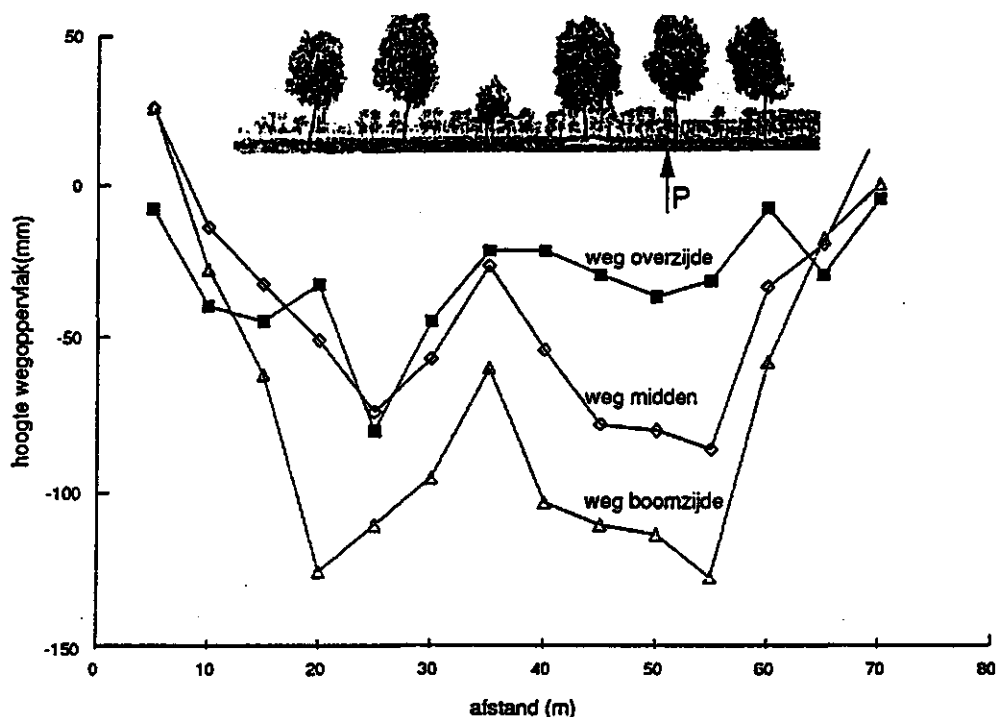


Fig. 9 Lengteprofiel in het voorjaar van 1991 van het wegoppervlak van de Hutstraat met aan één zijde wilgen. P = plaats van het dwarsprofielonderzoek en de metingen

Bomen

Van de boomkronen zijn recht omhoog foto's genomen, waaraan uit de fractie lucht die door het bladerdek is te zien (D) het oppervlak aan blad is te schatten per m² kroonoppervlak, de zg. Leaf Area Index (LAI) (de formule hiervoor gebruikt is: $LAI * 0,5 = - \ln D$). Deze methode is te gebruiken tot een LAI van ca. 6). Van vrijstaande bomen is de verdamping vrijwel rechtevenredig met het totale bladoppervlak. Van de wilgen langs de Hutstraat was de LAI in april 3, in mei 4 en daarna 5 m²/m² kroon.

Verzadigde horizontale en verticale doorlatendheid

Er is een meetlocatie ingericht zoals weergegeven in fig. 10 bij een enkele rij bomen en een dergelijke 30 meter ten oosten van de laatste boom in de rij weergegeven in fig. 9. De horizontale doorlatendheid K van het pakket klei en veen onder het grondwater in de voorzomer is gemeten met de boorgatenmethode. K is zeer hoog in de nabijheid van de bomen, meer dan 10 m/dag en zeer laag daarbuiten. De waarde $K = 0.05$ m/dag in de berm aan de slootkant betekent dat door deze berm bij de veel waargenomen gradiënt daar van 0.04 m/m 3 liter water per strekkende meter berm per dag naar de wortelzone van de bomen kan stromen.

De verticale doorlatendheid van de onderste veen en kleilaag op 2.5 tot 3 meter diepte is waarschijnlijk extreem laag.

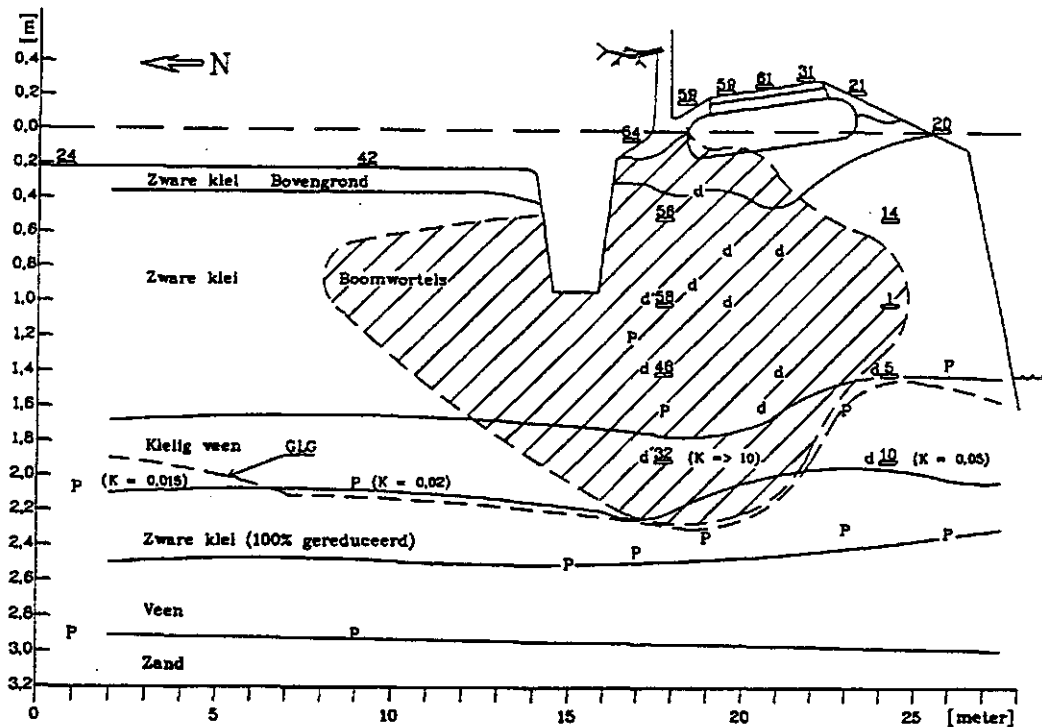


Fig. 10 Dwarsdoorsnede Hutstraat. P = eind filters peilbuizen. K = hor. verzadigde doorlatendheid tussen -1,7 en -2,9 m. d = locatie tensiometers. 56 = daling maaiveld of zakkaken ter plaatse van 2/7 tot 3/9/1991

Vochtigheid en dichtheid van de bodem en daaruit berekend vochtverlies en bodemdaling

Van een grote hoeveelheid grondmonsters uit de profielen is het vochtgehalte W (g water/g droge grond) bepaald en van kolom en ringmonsters ook de dichtheid d (g droge grond/cm³ bodem).

Als water wordt onttrokken aan zware klei of veen, dan raken eerst de eventuele gangen en scheuren leeg. Als deze leeg zijn, wat reeds vanaf enkele centimeters boven de grondwaterspiegel het geval is, veroorzaakt verder wateronttrekking het naar elkaar gaan van de bodemdeeltjes, de grond tussen eventuele scheuren in blijft daarbij gevuld met water. Deze grond krimpt, waarbij het volumeverlies gelijk is aan het waterverlies. Als de klei nog droger wordt, dan komt er lucht in de aggregaten in de plaats van het water en wordt het volumeverlies lager dan het waterverlies (Bronswijk, 1991). Dat is zeker in de hier aanwezige zware klei met een lutumgehalte van meer dan 45% niet het geval. Bij deze zware klei treedt pas lucht in de aggregaten in als de grond droger wordt dan boomwortels kunnen veroorzaken.

De volumeafname van de klei en daaruit de hoeveelheid onttrokken water en de daling van het oppervlak is te berekenen uit het vochtgehalte (g/g) voor en na wateronttrekking resp. W_n en W_d en de dichtheid van de vaste delen, d_s . Daarmee is de volumeafname van de klei en daaruit de daling van het oppervlak en de hoeveelheid onttrokken water te berekenen.

Er geldt:

$$V_d/V_n = (W_d + 1/d_s)/(W_n + 1/d_s) \quad (5.1)$$

waarin

V_d en V_n = volume kleiaggregaat na resp. voor wateronttrekking

$$\text{Het waterverlies in een laag van } z \text{ cm} = (1 - V_d/V_n) \times z \text{ (cm)} \quad (5.2)$$

In slappe kleilagen veroorzaakt volumeverlies alleen dikteafname, doordat de klei door het gewicht van de bovenliggende lagen nog kan worden vervormd. Is het materiaal steviger, en dat is in de bodemlagen onder dit wegdek veelal het geval, dan veroorzaakt waterverlies krimp in alle richtingen en ontstaan er ook scheuren.

Bij alzijdige krimp geldt voor de dikteafname van een laag met een oorspronkelijke dikte z :

$$\text{Dikteafname} = (1 - (V_d/V_n)^{1/3}) \times z \quad (5.3)$$

Het uit de vochtigheidsbepalingen berekende verschil van de vochtinhoud tussen het profiel van de berm zonder boom en het profiel met boom in het voorjaar (I - II) bedraagt 265 liter/m² en bij het profiel met boom is het verschil tussen voorjaar en begin september (II-III), 229 liter/m².

Tabel 2 Vochtigheid van bodemlagen vanaf 50 cm (= funderingsdiepte weg) onder de berm van de Hutstraat, zonder boom in het voorjaar (I), met boom in het voorjaar (II) en in begin september (III), en de daaruit berekende zakking per laag en van het totale pakket

laag - mv. (cm)	vochtgehalte W (g/g)			berekende krimp (cm en % laagdikte)	
	I	II	III	I-II	II-III
50-105	0,38	0,34	0,25	1,0 (1,8)	2,5 (4,5)
105-140	0,50	0,43	0,33	1,0 (2,9)	1,5 (4,3)
140-200	0,50	0,45	0,38	1,3 (2,2)	2,1 (3,5)
200-240	2,50	1,26	1,07	6,5 (16,3)	1,1 (3,7) (z=30)
240-260	0,95	0,92	0,75	0,2 (1,0)	0,9 (4,5)
Totaal 0-260				10,0	8,1

De permanente zakking door het rijpen van de grondlagen kan worden geschat door de situatie met (II) en zonder boom (I) in het voorjaar met elkaar te vergelijken. De hieruit berekende permanente zakking is lager dan de waargenomen zakking van ca. 12 cm, die volgt uit de diepte van de 'deuk' in het hoogteverloop in de lengterichting van de weg (ca. 12 cm bij P in fig. 9). Uit figuur 9 volgt echter dat ook de wegzijde zonder boom (bij vochtbemonstering I) iets is gezakt. Indien er van uit wordt gegaan dat in eerste instantie de beide wegranden even hoog lagen, dan is het permanente deel van het hoogteverschil tussen de beide wegranden ca. 8 cm. Dit is minder dan het berekende hoogteverschil. Een goede verklaring voor de verschillen is niet te geven omdat de werkelijke beginsituatie niet bekend is.

De berekende zakking in het seizoen is wat hoger dan de waargenomen zakking van ca. 6 cm (zie fig. 10), het is mogelijk dat bij de voorjaarsbemonstering water is meebepaald dat in de barsten onder het grondwater aanwezig was.

Grondwaterstanden

Deze zijn in april reeds vrij laag: ca. 1,80 -wegoppervlak (fig. 11). Ze dalen daarna tot juni, stijgen door veel regen in die maand en dalen daarna in de praktisch regenloze periode vooral in de omgeving van de bomenrij zeer sterk. De deuk in de grondwaterspiegel bij de bomen vergeleken met het peil onder de weg zonder bomen bedraagt 80 cm.

Het opzetten van het peil in de sloot is alleen onder de met verdroogd gras bedekte berm merkbaar tot een afstand van 3 m.

Vochtspanning

Om de voortgang van de uitdroging en eventuele bevochtiging te kunnen registreren zijn onder en naast de weg tensiometers aangebracht (zie fig. 10). Hiermee kan de druk van het bodemwater tot -900 cm worden gemeten (Methode zie Bakker, 1978). Op het niveau van de grondwaterspiegel is de druk 0 cm, daarboven negatief en daaronder positief. Als het overtollige water in de grond boven de grondwaterspiegel is uitgezakt komt de vochtspanning in evenwicht met zijn plaatshoogte. Dat wil zeggen dat de vochtspanning op Z cm boven het grondwater gelijk is aan -Z cm waterdruk.

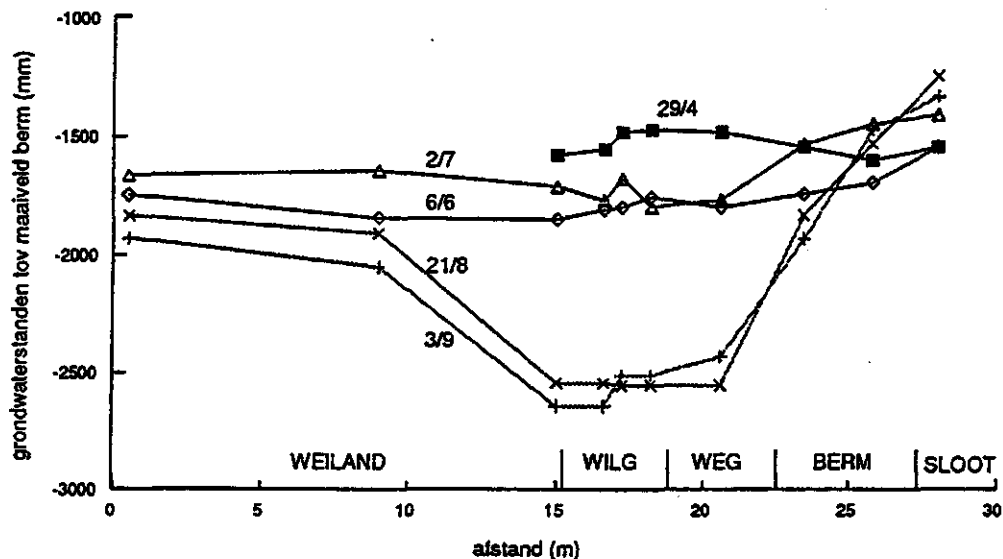


Fig. 11 Grondwaterstanden zomer 1991 in een raai loodrecht op de Hutstraat

Dit gaat tot ca. 50 cm boven de grondwaterstand op. Bij uitdroging van de grond door verdamping of wateronttrekking door wortels daalt de vochtspanning onder dit evenwicht.

In het voorjaar is de grond onder het wegdek op evenwicht, kennelijk is de droge grond daar in de winter bij hogere grondwaterstanden weer bevochtigd. Na het in blad komen van de bomen droogt de grond onder de weg eerst langzaam uit, ook als door overmaat aan regen de grond in de berm af en toe zeer nat wordt. De grond onder de weg zonder bomen blijft het gehele seizoen op evenwicht evenals de grond dieper dan 1 meter in de berm buiten het bereik van de bomen. Bij de bomen droogt in de droge periode het hele doorwortelde grondvolume uit tot waarden lager dan -900 cm. De grond aan de buitenrand van de wortelzone en op grotere diepte droogt wel trager uit. Uit de vochtgehaltecijfers blijkt dat de 55 cm dikke kleilaag onder de wegfundering zeer sterk uitdroogt.

Zakking van oppervlak en bodemlagen

In fig. 12 is te zien dat in de natte voorzomer het oppervlak nog iets stijgt; waarschijnlijk door het nog langzaam zwellen van vochtige grond. In de droge periode dalen de oppervlakken snel. Van het maaiveld van het weiland, buiten bereik van de bomen, stopt de daling in augustus bijna. Waarschijnlijk omdat het gras niet in staat is het profiel nog verder uit te drogen. Bij de bomen gaat de daling door. De invloed van de bomenrij is in het weiland op 8 m afstand nog duidelijk. De verdeling van de daling in het hele dwarsprofiel is aangegeven in fig. 10. De daling van de weg zonder boom is in deze periode 0 mm.

Profielonderzoek

Op 12 september is een profielkuil gegraven dwars door de weg. Fig. 10 geeft de toen waargenomen verspreiding van de beworteling van de bomenrij. De bewortelingsdichtheid begint vanaf 3 meter uit de bomenrij af te nemen (in de bomenrij zijn in de berm geen verschillen in bewortelingsdichtheid gevonden).

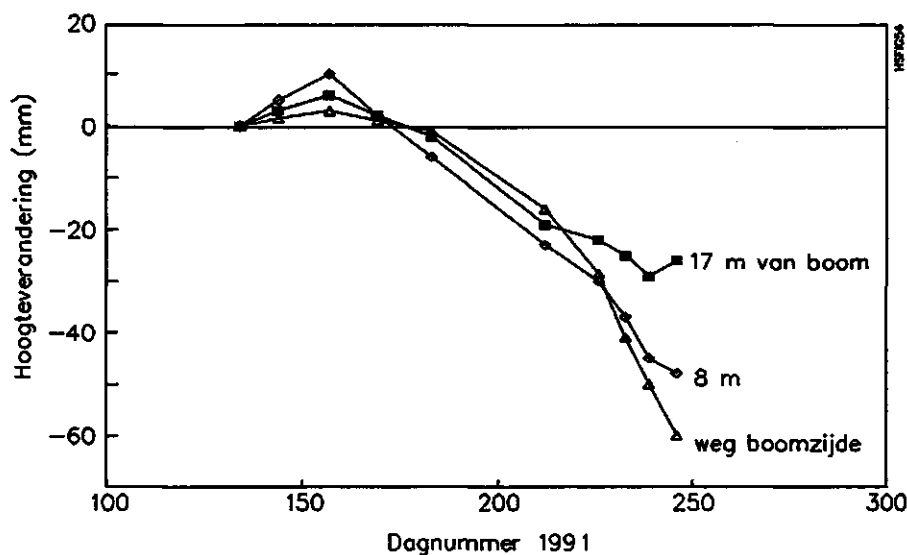


Fig. 12 Hoogteverandering van het maaiveld en het wegoppervlak van de Hutstraat gedurende de zomer van 1991 (lokatie = figuur 10)

Opvallend is een zeer hoge bewortelingsdichtheid boven en in de laag kleilig veen op 2 meter diepte.

De overgang van zeer droge naar zeer natte grond op ca. 2,40 m -berm is maar enkele cm's dik, wat duidt op een zeer lage onverzadigde doorlatendheid. Midden onder de weg begint de grond verder van de boom weg natter te worden, wat overeenkomt met de afnemende zakking in die richting.

Na de oude bovenlaag met structuurelementen van ca. 3 cm volgen structuurelementen van ca. 30 x 30 cm. Verder zijn er scheuren in de lengterichting op afstanden van ca. 1 meter. In de veenlaag is de scheurbreedte maximaal 8 cm, in de klei maximaal 4 cm. Deze scheuren zijn duidelijk ontstaan op de grens van gerijpte en ongerijpte grond. Nieuwe scheuren in het wegdek vindt men dan ook steeds verder van de bomenrij verwijderd naarmate de bomen in de berm groter worden. De laatste scheur in de Hutstraat ligt in de berm aan de overzijde, in de buitenrand van het door de wilgen doorwortelde grondvolume. Oude scheuren in het wegdek, die hersteld zijn, bleven in dit profiel dit jaar dicht, hoewel de scheuren in de grond daaronder duidelijk aanwezig bleven. In sommige werd de resten van herstelwerk uit voorgaande jaren gevonden tot een diepte van ca. 2 meter, namelijk bitumen.

Het oude maaiveld ligt nog ongeschonden onder de zandfundering van de weg. De weg moet zijn aangelegd door tussen twee bermwallen op het oude maaiveld 20 à 30 cm zand aan te brengen en daarop ca. 12 cm schraal beton met ca. 5 cm asfalt.

Verdamping van de bomen en de waterbalans

De verandering van de hoeveelheid water onder en naast een weg met bermbeplanting, in dit geval de Hutstraat, is de resultante van:

1. De neerslag die op het door de bomen bewortelde gebied terecht komt. Dit is de neerslag op 8 meter weg over de volle breedte, omdat de totale weg naar de

- boomzijde afwatert, plus de neerslag op een 8 meter brede en lange strook weiland en berm. Gebruikt zijn de neerslagcijfers van het station Oss;
2. Toestromend grondwater. Deze is gezien de zeer lage horizontale doorlatendheid van het kleipakket en de lage verticale doorlatendheid op nul gesteld;
 3. De verdamping door het gras boven de wortelzone. Deze is wat lager gesteld dan verdamping van open weiland, te weten: 0,8 x de referentieverdamping zoals gepubliceerd door het K.N.M.I. van het station Herwijnen. In de droge maanden juli en augustus is de verdampingsreductie door vochtgebrek geschat op respectievelijk 43 en 67%;
 4. De verdamping van de wilgen. Wilg verdampt per m² bladoppervlak 0.45 x de referentieverdamping. Wat 1.5 x de verdamping is van bomen zoals populier, es, iep en eik. Watergebrek heeft de rij wilgen zeer waarschijnlijk niet gehad. De verdamping per boom wordt:
 Kroonoppervlak x LAI x 0.45 x Referentieverdamping
 De LAI van de beplanting was in april 3, in mei 4 en daarna 5 m² blad per m² kroon. Per strekkende meter weg was dus aanwezig gemiddeld 3 m² boomkroon met 9 tot 15 m² blad.

De balans vanaf het moment van in blad komen van de wilgen ca. 1 april tot 1 september 1991 wordt dan per strekkende meter weg:

NEERSLAG = + 2200 liter, VERDAMPING GRAS = - 1800 liter, VERDAMPING BOMEN = - 2300 liter.

Uit het profiel is dus onttrokken + 1900 liter.

Gesteld wordt dat het onttrokken water evenredig met de hoogte van het bewortelde gebied (zie fig. 2) over het profiel is verdeeld. De vochtafname onder de weg aan de boomzijde berekend uit de vochtbemonstering is 229 l.m⁻². Op die plaats is de beworteling en daarmee samenhangend de vochtonttrekking door verdamping maximaal. Ruwweg is over de breedte van het bewortelde gebied (ca. 16 m) de vochtafname gemiddeld de helft van deze 229 l.m⁻². De vochtafname per strekkende m weg is dan: 16 x 0,5 x 229 = 1832 l.m⁻¹ weg. Deze waarde komt goed overeen met de uit de waterbalans berekende onttrekking van 1900 l.m⁻¹.

Verdamping van andere bomen

Had langs deze straat een rij jonge populieren gestaan van dezelfde afmeting dan had deze minder verdampt namelijk 1400 liter/m als gevolg van later in blad komen en lagere verdamping per m² blad. Over 10 jaar zullen de wilgen zijn uitgegroeid tot een gemiddelde kroonbreedte in de rij van 6 m en de populieren tot een rij met gemiddeld kroonbreedte van 10 m. In een relatief droog jaar als 1991 zou dan deze wilgenrij 4600 liter/m en de populierenrij 4200 liter/m verdampt hebben.

Verdere observaties in Midden-Maasland

1. Op zoek naar boomsoorten die in deze profielen minder diep wortelen, is geboord bij beplanting rond de boerderijen in de omgeving. De bewortelingsdiepten en het uitdrogingspatroon van es, eik en populier verschilden niet wezenlijk van die van de wilgen langs de Hutstraat. Alle boomsoorten groeiden op deze diep ontwaterde komkleien zeer goed;

2. Ook op plaatsen zonder veen in de ondergrond werden bij bomen zakkingen waargenomen van meer dan 10 cm;
3. In gronden met matig zware en lichtere klei en zavel in de ondergrond was de afstand van sterk uitgedroogde lagen tot de grondwaterspiegel soms bijna een meter.

5.2 Lageweg

De Lageweg is één van de twee meetlocaties in het Land van Heusden en Altena. De beplanting bestaat uit een enkele rij wilgen van ca. 20 jaar oud met een onderlinge afstand van 8 m. De kroondoorsnede is 7 à 8 m, zodat per strekkende meter weg het kroonoppervlak 6,2 m² is. Het oppervlak van alle bladeren per oppervlakte eenheid standplaatsen als de boom volop in het blad zit is 4 à 5 maal het kroonoppervlak. Dit is de LAI (leaf area index) en geeft het verdampingspotentieel van de bomen weer.

Aan de kant van de weg met de bomen loopt een ondiepe sloot. Aan de andere kant van de weg loopt een watervoerende diepe sloot.

De wegconstructie bestaande uit wegdek, fundering en grondverbetering heeft een dikte van 0,70 m. De profielopbouw daaronder bestaat van 0,70-1,35 m uit zware klei, van 1,35-1,80 m uit veen en daaronder uit klei/zware zavel. Het peil van de sloten ligt 1,45-1,55 m onder de weg. De gemiddelde laagste grondwaterstand (GLG) en gemiddeld hoogste grondwaterstand (GHG) is ten opzichte van de weg respectievelijk -1,80 en -0,90 m. Dit houdt in dat de zakking van de weg voor een deel tot stand komt door krimp van de zware klei en voor een ander deel door krimp van het veen.

Ter plaatse van de meetlocatie lopen in lengterichting van de weg twee oude, gerepareerde scheuren, die de weg in ongeveer drie gelijke delen opdelen. In september bleek zich op ca. 0,50 m vanaf de wegrand zonder bomen een nieuwe scheur in de weg te hebben gevormd.

Hoogteverloop wegdek in de lengterichting

In figuur 13 is het lengteprofiel van de Lageweg zoals gemeten in mei 1992 gegeven. De in het voorjaar gemeten zakkingen zijn in het algemeen als permanent te beschouwen. Het lijkt erop dat langs het weggedeelte waar bomen groeien de weg in zijn geheel is gezakt. Het is echter niet aan te geven hoeveel die zakking ongeveer is. Het verschil in hoogte tussen de randen van de weg en het midden van de weg levert meer informatie. De wegrand langs de berm met bomen ligt 0,05 tot 0,08 m lager dan het midden van de weg. Het midden van de weg is echter ook gezakt. De wegrand langs de berm zonder bomen is het minste gezakt. Het verschil in zakking tussen de beide wegranden is 0,05 tot 0,11 m.

De dwarsdoorsnede

Gedurende het groeiseizoen 1991 zijn van een dwarsdoorsnede van de Lageweg het verloop van het oppervlakte en de grondwaterstand gevolgd. De plaats van de dwarsdoorsnede is in het lengteprofiel in figuur 13 aangegeven met een P.

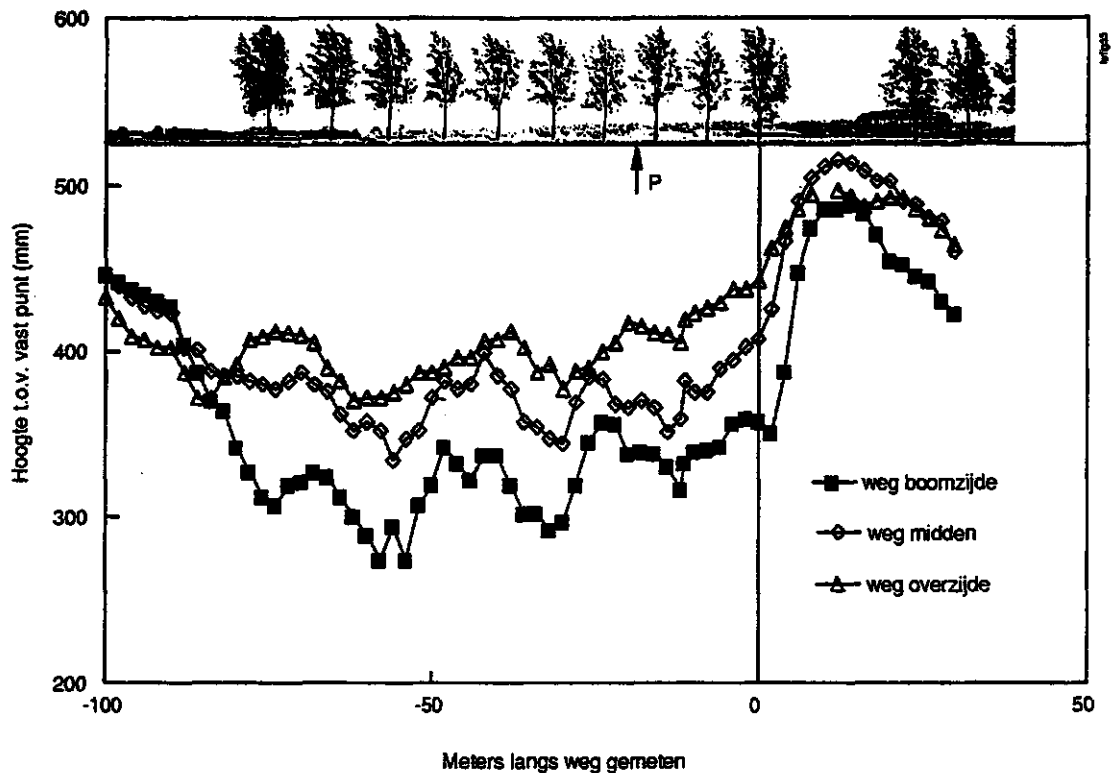


Fig. 13 Lengteprofiel in het voorjaar van 1992 van het wegoppervlak van de Lageweg met aan één zijde wilgen. P = plaats van het dwarsprofielonderzoek en de metingen

Met grondboringen en een profielkuil, die na het groeiseizoen ter plaatse van de weg is gegraven, is het profielverloop en de wortelzone van de boom bepaald (figuur 14). De profielkuil ter plaatse van de weg laat een groot verschil zien tussen de bewortelde en de onbewortelde grond. Het zand van de grondverbetering onder de fundering is (vrijwel) niet beworteld. Opvallend is dat het onderste laagje van het zand sterk roestig is, wat duidt op tijdelijke stagnatie van regenwater op de eronder liggende klei. Onder het zand ligt een laagje van 10-25 cm van de oude bouwvoor bestaande uit humeuze klei met ca. 40% klei en 1% humus. Aan de boomzijde is dit laagje sterk beworteld en bestaat uit lange, smalle prisma's met een breedte van ca. 3 cm. De breukvlakken zijn sterk roestig. Onder de wegrand aan de kant zonder boom is de oude bovengrond gereduceerd, wat er op duidt dat er zuurstofgebrek heerst door de slechte structuur van de grond. Desondanks zijn er enkele haarworteltjes van de bermvegetatie aanwezig. Onder de oude bouwvoor bevindt zich een 40-67 cm dikke zware kleilaag met ca. 60% klei, die in het bewortelde gebied bestaat uit grote prisma's met een breedte van 10-15 cm. Over de volle dikte van de laag lopen enkele 2 cm brede scheuren. Er zijn vrij veel wortels te zien, die langs de prisma's lopen. Er is vrij veel roest. In het onbewortelde deel is de zware klei gereduceerd, ongestructureerd en blauwgrijs. De kleilaag rust op een 45-58 cm dikke laag kleiig broekveen met ca. 50% organische stof. In het bewortelde deel is het veen veraard en roestig en bestaat uit sterk uitgedroogde brokken van ca. 40 cm doorsnede. Verticale scheuren met een breedte van 3-4 cm lopen over de volle dikte van de veenlaag. In deze laag komen vele, dunne wortels voor. Het veen onder de weg aan de kant zonder boom is onbeworteld en gereduceerd en heeft een donkerbruine kleur. De onderste grondlaag bestaat uit een klei/zware zavel en is grotendeels onbeworteld, gereduceerd en blauwgrijs. Aan de boomzijde is een beginnende, ondiepe beworteling in deze laag waar te nemen.

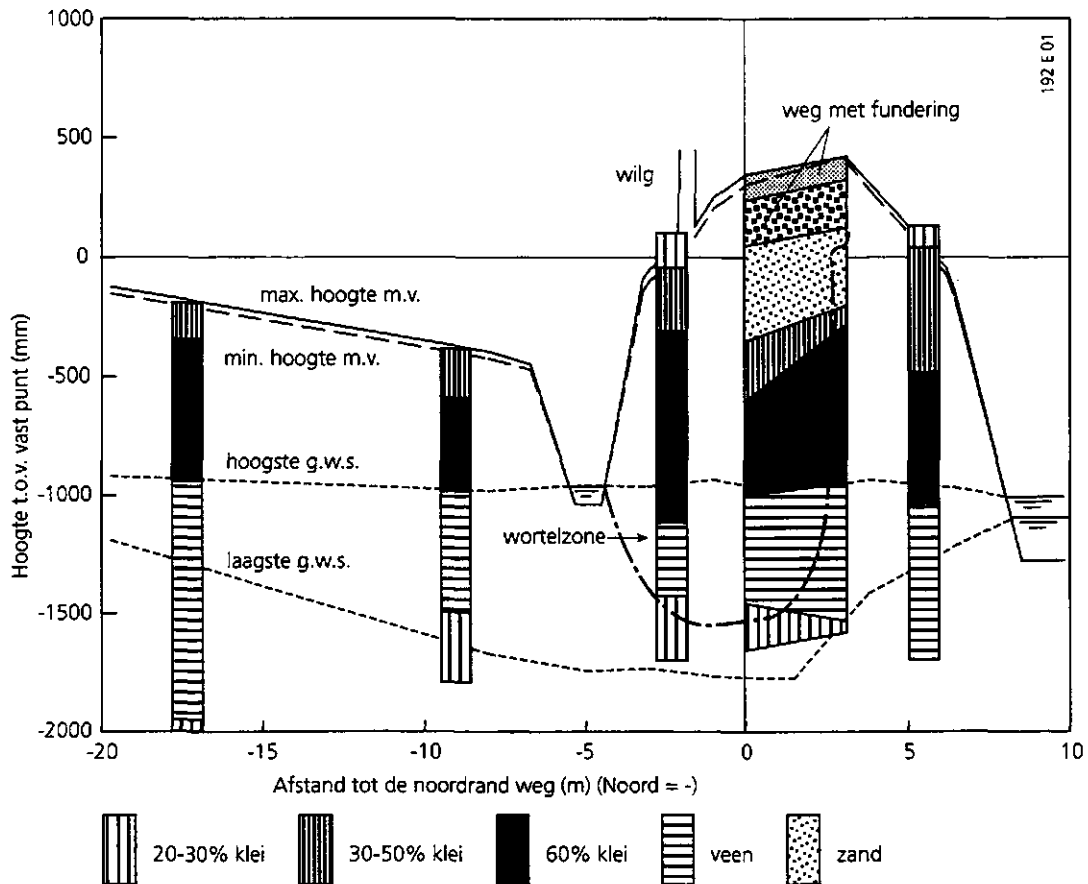


Fig. 14 Dwarsdoorsnede Lageweg met maaiveldsdaling, grondwaterstanden en wortelzone

Zakking van het oppervlak en de bodemlagen

In figuur 15 is het verloop van de hoogte van de randen en het midden van de weg gedurende het groeiseizoen gegeven. Het blijkt dat de weg in het voorjaar eerst nog omhoog komt. Na 30 juli begint een droge periode en gaat de weg zakken. De wegrand aan de zijde zonder boom reageert nauwelijks en de stijging van deze wegrand is in het voorjaar zelfs meer dan de zakking in de droge periode. De zwakke reactie van deze wegrand komt overeen met wat er volgens de profielopbouw kan worden verwacht. De grond onder deze wegrand is immers onbeworteld en slecht gestructureerd. Bovendien blijkt uit vochtspanningsmetingen aan deze zijde van de weg dat de grond vanaf de zandlaag nat blijft en weinig vocht verliest. Aan de boomzijde van de weg stijgt de wegrand van 29 april tot 30 juli met 13 mm, daarna zakt de wegrand van 30 juli tot 19 september met 40 mm. In dezelfde perioden stijgt en daalt het wegmidden met respectievelijk 11 en 27 mm. De grootste hoogteveranderingen vinden plaats in de berm met bomen. Van 29 april tot 2 juli stijgt daar het maaiveld met 29 mm om daarna in de periode van 2 juli tot 19 september met 45 mm te zakken.

Ten opzichte van de zuidrand zakken de noordrand en het wegmidden niet uniform. Daardoor verdraaien gedurende de zwel- en krimpprocessen de weghelften continue ten opzichte van elkaar. Uit figuur 16 blijkt dat de weghelften in het groei-

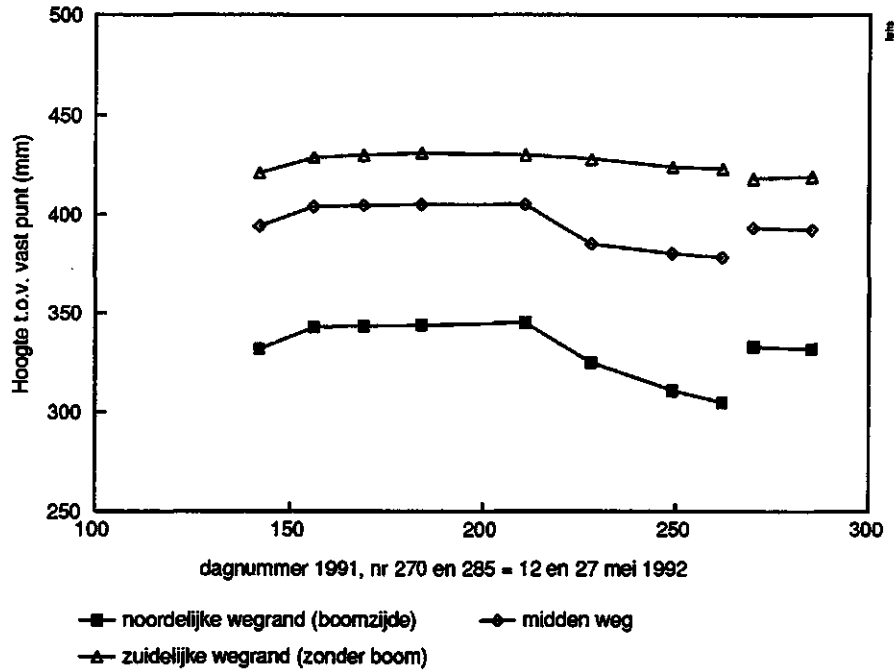


Fig. 15 Verloop van de hoogte van de randen en het midden van de Lageweg gedurende het groeiseizoen 1991 en in het voorjaar 1992

seizoen 1991 maximaal één graad ten opzichte van elkaar zijn verdraaid. Deze verdraaiing vindt in werkelijkheid niet plaats in het midden van de weg, maar zal zich concentreren in het asfalt boven de overgang van uitgedroogde, gekrompen grond en de nog natte grond. Deze voortdurende vervorming zal kunnen leiden tot een scheur in het asfalt boven deze overgang, zoals bij de Lageweg het geval is. In de bomenrij zijn op een diepte van 0,50; 1,00 en 1,50 m zakplaatjes aangebracht.

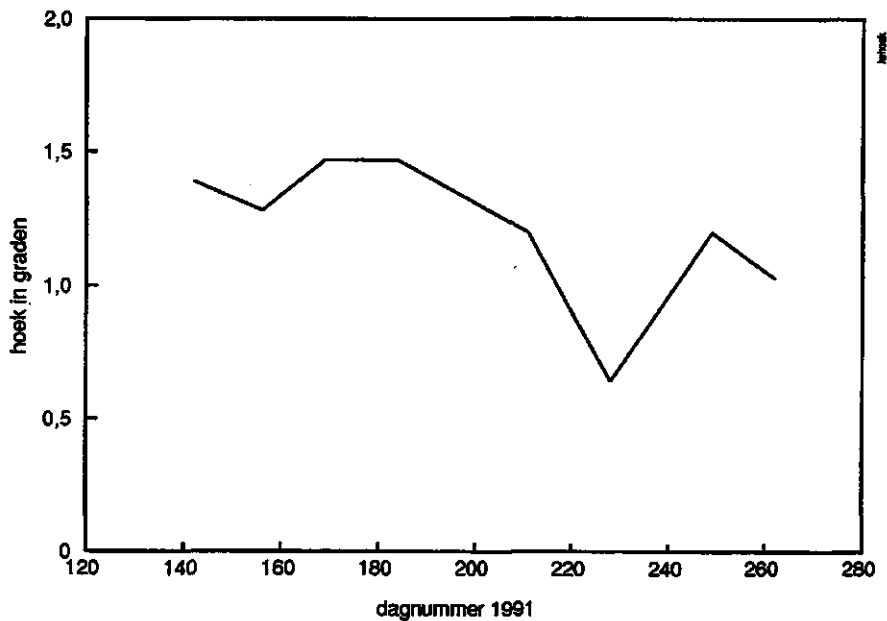


Fig. 16 Verdraaiingshoek tussen de twee weghelften door ongelijke zinking en stijging van de Lageweg

Dit maakt het mogelijk om de maaiveldsdaling van 45 mm in de periode van 2 juli tot 19 september over de diepte te verdelen. De laag tussen het maaiveld en het zakplaatje op 0,50 m is in die periode 16 mm dunner geworden. Deze laag bestaat voor de bovenste 0,40 m uit klei met 1-3% organische stof en voor de onderste 0,10 m uit zware klei. Ter plaatse van de weg is deze laag vervangen door de wegconstructie en de zandlaag. De laag tussen de zakplaatjes op 0,50 en 1,00 m bestaat geheel uit zware klei. In de beschouwde droge periode krimpt deze laag slechts 3 mm. Hierbij moet echter worden opgemerkt dat de zware kleilaag als enige laag in de natte voorzomer tussen 22 mei en 2 juli is gekrompen met 5 mm, terwijl de andere lagen in die tijd zijn opgezwollen. Tussen de zakplaatjes op 1,00 en 1,50 m krimpt de laag in de droge periode met 15 mm. Deze laag bestaat uit 0,20 m zware klei en 0,30 m veen. Er van uitgaande dat het aandeel van de zware klei evenredig is met de krimp van de zware kleilaag erboven, kan ongeveer 14 mm van de krimp worden toegeschreven aan de veenlaag. Over de gehele meetperiode is het netto resultaat van zwel en krimp van de laag een krimp van 8 mm. Het zakplaatje op 1,50 m diepte staat min of meer op de zware zavel/klei laag en blijkt in de droge periode 11 mm te zijn gezakt. Hierbij moet worden opgemerkt dat de zakplaatjes binnen een afstand van 2,0 m tot de boom zijn geïnstalleerd, zodat de bewortelingsdiepte daar bijna maximaal is. De beschouwde maaiveldsdaling is ongeveer halverwege de onderlinge boomafstand, op 4,0 m, gemeten. Het meest opvallende aan de zakplaatmetingen is dat het veen in de droge periode ongeveer 8 maal zoveel krimpt als de zware klei.

De grondwaterstanden

Uit figuur 14 blijkt dat de wilg een deuk in het grondwater trekt. De ondiepe sloot valt gedurende het groeiseizoen droog en heeft dan geen invloed meer op de grondwaterstand. Vanuit de diepe watervoerende sloot infiltreert er wel water in de grond, maar deze aanvoer van water kan de afvoer via de opname van de wortels en de verdamping van de boom blijkbaar niet bijhouden. De deuk in het grondwater begint vanaf de sloot en heeft op 19 september ten opzicht van het slootpeil een diepte van ca. 75 cm. In figuur 17 is het verloop van het slootpeil van de diepe sloot en de grondwaterstanden onder het midden van de weg en in de berm gedurende het groeiseizoen 1991 gegeven. Van 29 april tot 2 juli stijgt het peil van de diepe sloot met 128 mm. Daarna zakt het slootpeil met 62 mm en blijft gedurende de droge periode na 2 juli ongeveer constant. De hoogste grondwaterstanden zijn gemeten op 2 juli, daarna zakken de grondwaterstanden in de berm met bomen en onder de weg 700-750 mm. Het is opvallend dat in het voorjaar de grondwaterstand onder het midden van de weg de hoogste grondwaterstand is op dat moment. Een verklaring hiervoor is dat de neerslag op de weg via het zand onder de weg infiltreert. In de berm wordt een deel van de neerslag door de begroeiing opgevangen en verdampt daar ook sneller.

Verzadigde horizontale en verticale doorlatendheid

De horizontale doorlatendheid van het klei- en veenpakket onder het grondwater is op 11 juli 1991 gemeten met de boorgatenmethode. Het grondwaterpeil stond toen bijna op het hoogste punt in de meetperiode. In de berm met bomen bleek de doorlatendheid zeer hoog te zijn, meer dan 10 m/dag. In de berm zonder bomen was de doorlatendheid juist zeer laag, 0,02 tot 0,04 m/dag. De conclusie kan worden getrokken dat de klei- en veenlaag in de berm met bomen door de wateronttrekking door de boomwortels is gerijpt en gestructureerd en daardoor sterk doorlatend is geworden. Bedacht moet

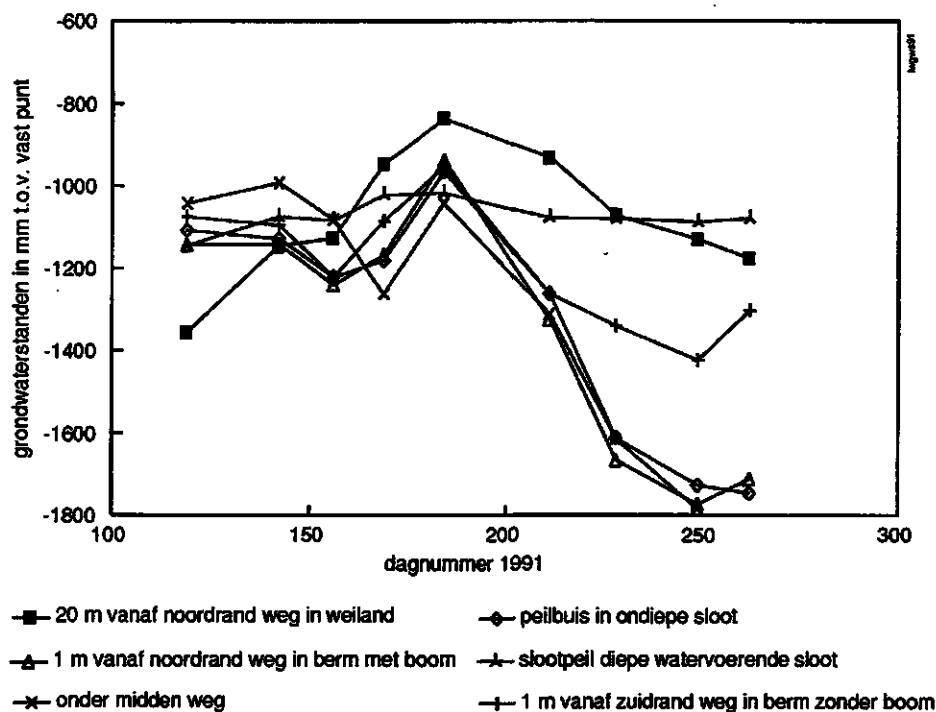


Fig. 17 Verloop van het slootpeil en de grondwaterstanden in 1991 bij de Lageweg

worden dat klei en in nog veel sterkere mate veen tijd nodig heeft om op te zwellen, zodat na een wat drogere periode het water door de scheuren kan lopen waardoor de doorlatendheid zeer hoog is.

Berekeningen van zakkings uit dichtheden en vochtverliezen

In de tabellen 3, 4 en 5 zijn uit vochtmetingen in het voorjaar en najaar de zakkings van de randen en het midden van de weg berekend met formule 4.9, tenzij anders vermeld. De berekende en gemeten zakkings kunnen niet met elkaar worden vergeleken, omdat de berekende zakkings betrekking hebben op de periode van 24 april tot 19 september, terwijl de zakkings zijn gemeten over de periode van 22 mei tot 19 september.

Tabel 3 Zakkingsberekening van de zuidrand van de weg (geen bomen) uit de vochtmeting in het voorjaar (24-4-1991) en het najaar (19-9-1991)

laag	- wegdek (cm)	d_s ($g \cdot cm^{-3}$)	W_n ($g \cdot g^{-1}$)	W_d ($g \cdot g^{-1}$)	Δz (cm)
wegfundering	0- 68	-	-	-	-
lichte klei	68- 82	2,70	0,49	0,46	0,13(*)
zware klei (1)	82- 125	2,70	0,35	0,36	-0,20
zware klei (2)	125- 140	2,70	0,50	0,51	-0,06
kleilig veen	140- 158	1,78	0,92	0,96	-1,62
veen	158- 180	1,60	1,97	2,06	-0,24
zavel	180- 188	2,70	0,61	0,52	0,12(**)
Totaal	0- 188				-1,87

* = 40% lutum, berekend met formule 4.30 met factor $r = 0,8$.

** = 12-25% lutum, berekend met formule 4.30 met factor $r = 0,5$.

Opm.: Zware klei (1) ligt boven en zware klei (2) onder de hoogste grondwaterspiegel.

Op 24 april zijn geen hoogten gemeten, de gemeten zakking vanaf de eerste hoogtemeting op 22 mei tot 19 september is -2 mm, oftewel een stijging.

De stijging van het wegdek in de periode van 22 mei tot 2 juli is echter veel groter, nl. 10 mm, waarvan de eerste 8 mm in de periode van 22 mei tot 5 juni. In de periode 2 juli tot 19 september zakt de wegrand 8 mm. Opmerkelijk is dat in de periode dat de wegrand 8 mm stijgt het niveau in peilbuis 7 (1 m ten zuiden van de beschouwde wegrand) 127 mm zakt. Het grondwaterpeil blijft echter boven het pakket kleiig veen en veen, dat volgens de berekening het grootste aandeel in de stijging veroorzaakt. Op 2 juli is het niveau in peilbuis 7 het hoogst, 175 mm hoger dan op 29 april. Op 19 september staat het niveau 307 mm lager dan op 29 april.

De berekende en gemeten stijging van de wegberm kunnen niet met elkaar worden vergeleken omdat ze betrekking hebben op verschillende perioden. Uit de trend van de metingen in de beginperiode volgt dat gestart is op een moment dat de grond aan het zwellen en de wegrand aan het stijgen was. De stijging van de wegrand van 24 april tot 22 mei kan groot genoeg zijn om het verschil tussen berekende en gemeten stijging te verklaren.

Tabel 4 Zakkingsberekening van het midden van de weg uit de vochtmetingen in het voorjaar (24-4-1991) en het najaar (19-9-1991)

laag	-wegdek (cm)	d_s (g.cm ⁻³)	W_n (g.g ⁻¹)	W_d (g.g ⁻¹)	Δz (cm)
wegfundering	0- 67	-	-	-	-
lichte klei	67- 85	2,70	0,49	0,31	1,07(*)
zwarte klei (1)	85- 124	2,70	0,35	0,31	0,74
zwarte klei (2)	124- 138	2,70	0,50	0,37	0,73
veen	138- 180	1,66	1,44	1,12	0,49(**)
zavel	180- 195	2,70	0,61	0,58	0,08(*)
Totaal	0- 195				3,11

* = zie opmerkingen tabel 3

** = de eerste 12 volumeprocenten water komt uit de grote poriën en veroorzaakt geen krimp.

Tabel 5 Zakkingsberekening van de noordrand van de weg (= boomzijde) uit de vochtmetingen in het voorjaar (24-4-1991) en het najaar (19-9-1991)

laag	-wegdek (cm)	d_s (g.cm ⁻³)	W_n (g.g ⁻¹)	W_d (g.g ⁻¹)	Δz (cm)
wegfundering	0- 70	-	-	-	-
lichte klei	70- 95	2,70	0,49	0,28	1,75(*)
zwarte klei (1)	95- 118	2,70	0,35	0,26	1,00
zwarte klei (2)	118- 137	2,70	0,50	0,36	1,08
veen	137- 180	1,66	1,44	1,13	0,43(**)
zavel	180- 198	2,70	0,61	0,55	0,19(*)
Totaal	0- 198				4,45

* = zie opmerkingen tabel 3

** = de eerste 12 volumeprocenten water komt uit de grote poriën en veroorzaakt geen krimp.

In de tabellen 4 en 5 is bij de berekening van de diktevermindering van de veenlaag rekening gehouden met 12 volumeprocenten water in de grote poriën. Bij het uitdrogen van de veenlaag wordt eerst deze 12 volumeprocent water aan het veen onttrokken,

waarbij geen krimp optreedt. Hiermee is rekening gehouden door formule 4.33 in plaats van formule 4.9 te gebruiken. Het in de formule benodigde droog volumegewicht van het veen was $\gamma_n = 0,4825 \text{ g.cm}^{-3}$. De reden om rekening te houden met het water in de grote poriën is de inschatting dat bij de bemonstering in het voorjaar met de grondboor dit water door het veen is gesmeerd en daardoor is meebemonsterd. In het najaar zijn volumemonsters gestoken vanuit de profielkuil dwars door de weg. Op dat moment moeten de grote poriën in het veen leeg zijn geweest.

Uit de berekeningen blijkt dat in de beschouwde periode het aandeel van de lichte en zware klei in de zakking veel groter is dan van het veen. Hierbij moet echter rekening worden gehouden dat de berekening van de krimp van het veen een grote onzekerheid in zich draagt, omdat niet goed bekend is hoeveel water aanwezig in de grote poriën is meebemonsterd in het voorjaar.

Potentiële zakking van de zuidrand van de weg

In de tabellen 6 en 7 is met respectievelijk de formules 4.19 en 4.9 de potentiële zakking van de zuidrand van de weg berekend. Uit de waarnemingen in de profielkuil is gebleken dat de grond onder de zuidrand van de weg nauwelijks is beïnvloed door de beworteling van de boom. Door de actuele dichtheid van de grond onder de zuidrand te vergelijken met de dichtheid van vergelijkbare, door de beworteling uitgedroogde grond, kan een indruk worden verkregen welke grond potentieel het grootste aandeel in de zakking kan leveren. De laag lichte klei op een diepte van 68-82 cm is hierbij buiten beschouwing gelaten omdat hiervan geen dichtheden zijn gemeten. Bij de bemonstering van de zware klei op 19 september onder het midden van de weg is in de aggregaten bemonsterd, zodat voor de berekening van het aandeel van de zware klei in de zakking gebruik is gemaakt van formule 4.25. De potentiële krimp van het kleiig veen en het veen blijkt vele malen groter te zijn dan van de zware klei. Hierbij moet worden aangetekend dat voor de dichtheid van het veen in de eindtoestand een bemonstering naast een boom is gebruikt en voor de zware klei een bemonstering onder het midden van de weg. Bij de boom is het veen waarschijnlijk langer en extremer uitgedroogd dan de grond onder de weg. De potentiële zakking zoals berekend uit de dichtheid in tabel 6 is hoger dan het gemeten hoogteverschil van 11,8 cm tussen de noord- en zuidrand van de weg op 19 september. Het is echter niet bekend of bij de aanleg van de weg de beide randen op gelijke hoogte stonden en wat er in de loop van de tijd met het wegdek is gebeurd. Bovendien hoeft de noordrand zijn potentiële zakking nog niet bereikt te hebben.

In tabel 7 is voor de zakkingsberekening van het veen rekening gehouden met 12 volumepercent water in de grote poriën door formule 4.33 te gebruiken. Het in de formule benodigde droog volumegewicht was $\gamma_n = 0,3863 \text{ g.cm}^{-3}$. Indien er van uit wordt gegaan dat in de voorjaarsbemonstering geen water uit de grote poriën is meebemonsterd, dan volgt uit de berekening dat de veenlaag niet 1,84 maar 2,91 cm dunner wordt. De potentiële zakking berekend uit het verschil in vochtgewicht onder de noord- en zuidrand van de weg in tabel 7 is kleiner dan het gemeten hoogteverschil op 19 september, waarbij bedacht moet worden dat de laag met kleiig veen buiten beschouwing is gelaten.

De potentiële diktevermindering van de veenlaag is in tabel 6 veel groter dan in tabel 7.

Hieruit kan voorzichtig de conclusie worden getrokken dat indien onder de noordrand de veenlaag op termijn evenveel uitdroogt als het veen bij de boom, ook de noordrand nog enkele cm's kan zakken.

Tabel 6 Berekening van de potentiële zakking van de zuidrand van de weg (geen bomen) uit de actuele droge dichtheid en de droge dichtheid van vergelijkbare nabijgelegen profielen die het krimproces reeds ondergaan hebben

laag	- wegdek (cm)	$\gamma_{act.}$ (g.cm ⁻³)	$\gamma_{toekomst}$ (g.cm ⁻³)	Δz (cm)
zware klei (1)	82- 125	1,31	1,41(*)	1,04
zware klei (2)	125- 140	1,10	1,34(*)	0,96
kleilig veen	140- 158	0,675	0,958(**)	5,66
veen	158- 180	0,386	0,541(**)	6,30
Totaal zware klei- en veenlagen				13,96

* = Profiel onder midden weg

** = Profiel bij wilg

Tabel 7 Berekening van de potentiële zakking van de zuidrand van de weg (geen bomen) t.o.v. de noordrand van de weg (met bomen) uit de vochtmetingen in het najaar (19-9-1991) onder de noord- en zuidrand

laag	- wegdek (cm)	d_s (g.cm ⁻³)	W_n (g.g ⁻¹)	W_d (g.g ⁻¹)	Δz (cm)
wegfundering	0- 68	-	-	-	-
lichte klei	68- 82	2,70	0,46	0,28	0,86(*)
zware klei (1)	82- 125	2,70	0,36	0,26	2,06
zware klei (2)	125- 140	2,70	0,51	0,36	0,91
kleilig veen	140- 158	1,78	0,96	?	?
veen	158- 180	1,60	2,06	1,13	1,84(**)
zavel	180- 188	2,70	0,52	0,55	(***)
Totaal	0- 188				5,67

* = 40% lutum, berekend met formule 4.30 met factor $r = 0,8$.

** = de eerste 12 volumeprocenten water komt uit de grote poriën en veroorzaakt geen krimp.

*** = niet berekend, wordt iets natter.

Rijping

Onder de zuidrand van de weg is de zware klei misschien nog niet volledig gerijpt, wat zou leiden tot extra grote zakkingen bij rijping. De laag zware klei op een diepte van 82-140 cm onder het wegdek heeft een lutumgehalte van $L = 55\%$ en een organischestofgehalte van $H = 3,5\%$. De rest is dan $R = 100 - 55 - 3,5 = 41,5\%$. Met formule 4.35 is dan het gewichtsvochtgehalte te berekenen behorende bij een rijpingsfactor $n = 0,7$ (grens gerijpt - ongerijpt).

$$W_d (\text{gerijpt}) = 0,002 R + 0,007 (L + 3H) = 0,54$$

Het gewichtsvochtgehalte bij een vochtspanning van bijna nul van de beide kleilagen onder de zuidrand van de weg is respectievelijk $W_d = 0,36$ en $W_d = 0,51$. Beide lagen blijken gerijpt te zijn en zullen daarom isotroop krimpen.

De rijpingsfactor n kan worden berekend met formule 4.26 en is voor de zware klei (1) $n = 0,42$ (volledig gerijpt!) en bij de zware klei (2) $n = 0,65$.

In hoeverre het veen is gerijpt is niet te bepalen, omdat voor de toepassing van formule 4.36 het aandeel van de organische stof in de dichtheid bekend moet zijn.

Conclusies

In het algemeen wordt aangenomen dat klei en veen aan het einde van de winter volledig gezwollen zijn en in rust zijn. Voor de meetcampagne is hiervan ook uitgegaan en is gedacht dat het begin van het voorjaar een goed beginpunt van de metingen zou zijn. Uit de metingen blijkt echter dat in ieder geval voor het veen en de zavel eronder geldt dat deze tot in de zomer blijven zwellen. Het zwelproces stopt pas en slaat om in krimp in een drogere periode waarin de boom water gaat onttrekken en het grondwaterpeil zakt. De zware klei krimpt gedurende de hele meetperiode, wat verklaart kan worden uit het feit dat deze voor een deel boven het grondwater ligt. Bovendien zal de boom als eerste aan deze kleilaag water onttrekken.

5.3 Kooiweg

De Kooiweg is de tweede locatie in het Land van Heusden en Altena. Hier komt een enkele rij populieren van ca. 20 jaar oud voor met een kroon van 10 m² per strekkende meter weg. Naast de bomenrij bevindt zich een diepe sloot met daarachter een ruigte. Aan de overzijde van de weg loopt een ondiepe sloot met daarachter een populierenbos.

De wegconstructie bestaande uit 0,20 m asfalt met daaronder funderingszand heeft een totale dikte van 0,70 tot 0,80 m. De profielopbouw daaronder bestaat van 0,80-1,10 m uit zware klei met daaronder veen. In het voorjaar ligt het slootpeil ongeveer 1,00 onder de hoogte van het wegoppervlak.

De dwarsdoorsnede

Gedurende het groeiseizoen van 1991 zijn van een dwarsdoorsnede van de Kooiweg het verloop van het oppervlakte en de grondwaterstand gevolgd. Met grondboringen en een profielkuil, die na het groeiseizoen dwars door de weg is gegraven, is het profielverloop en de wortelzone van de weg bepaald (figuur 18). De weg is aangelegd op een zandcunet van ca. 0,50 m dikte. Onderin het cunet blijft tijdelijk water op de zware kleilaag staan. Blijkbaar profiteren de wortels hiervan, want de onderste 0,20 m van het zandcunet is zeer dicht beworteld. Aan de boomzijde van het cunet, beneden een diagonale lijn vanaf de wegverharding, komen vele, dikke wortels voor. Deze hebben waarschijnlijk geprofiteerd van het inzijgend regenwater. In tegenstelling tot de beworteling onder de Lageweg is er geen duidelijk verschil in beworteling onder de beide weghelften. Bij de Kooiweg lopen de wortels onder de weg

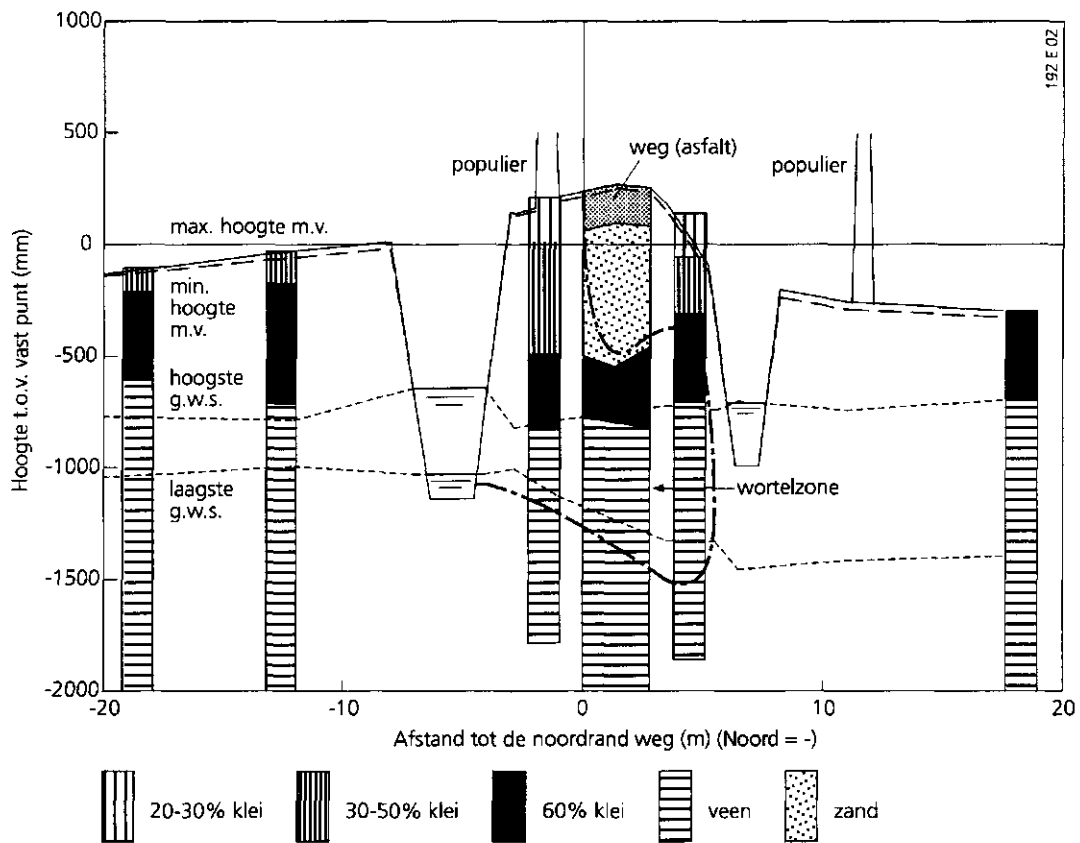


Fig. 18 Dwarsprofiel Kooiweg met grootste zakkingen maaiveld, grondwaterstanden en wortelzone

door naar de berm zonder boom. De zware klei onder het zandcunet bestaat uit grote prisma's met roest op de breukvlakken. In de zware kleilaag zitten veel wortels met veel haarwortels op de breukvlakken. Onder de zware kleilaag bevindt zich een 0,20 tot 0,40 m dikke zwartbruine, half veraarde broekveenlaag die sterk is uitgedroogd. In deze laag bevinden zich vele, sterk vertakte wortels. Het broekveen daaronder is bruin en gereduceerd en is niet beworteld. De wortels zijn maximaal 0,10 m onder het grondwaterpeil te vinden. Half augustus is in de ondiepe sloot tussen de weg en het populierenbosje geboord. De grond onder de sloot bleek drijfnaat te zijn, waaruit de conclusie kan worden getrokken dat de wortels van de bomen van het populierenbos niet onder deze sloot doordringen. Bij de Kooiweg is bij een deel zonder bomen in de noordelijke berm ook een profielkuil gegraven. Bij het graven van de kuil trad tussen 0,50 en 0,75 m diepte water uit de profielwand. Dit was water uit het zandcunet, dat op de zware klei was blijven staan. Vanaf 0,50 m diepte is de grond gereduceerd en niet beworteld. De bovenste 0,20 m bestaat uit humeuze klei en is sterk beworteld door de bermvegetatie. De zware kleilaag eronder is tot 0,50 m diepte sterk roestig en licht beworteld.

Zakking van het oppervlak en de bodemlagen

In figuur 19 is het verloop van de hoogte van de randen en het midden van de weg gedurende het groeiseizoen gegeven. Het blijkt dat de weg in het voorjaar eerst nog omhoog komt. Hierbij stijgt de noordelijke wegrand (boomzijde) meer dan de zuidrand en het midden van de weg. Na 30 juli begint een droge periode en gaat de weg zakken. De wegrand aan de zijde met boom reageert hierbij wat sterker dan de rest van de weg. Aan de boomzijde van de weg stijgt de rand van 22 mei tot 30 juli met 10 mm, daarna zakt de wegrand van 30 juli tot 19 september met 20 mm. In dezelfde perioden stijgt en daalt het wegmidden met respectievelijk 4 en 20 mm. Voor de wegrand zonder bomen is de stijging en daling in die perioden respectievelijk 4 en 16 mm. De grootste zakking vindt plaats in het populierenbos. Van 5 juni tot 19 september zakt daar het maaiveld met 34 mm. Ten opzichte van de elkaar zakken de wegranden en het wegmidden redelijk uniform. Het grootste verschil in zakking/stijging treedt op tussen de noordrand en het midden en is 7 mm.

In de bomenrij zijn op een diepte van 0,50; 1,00 en 1,50 m zakplaatjes aangebracht. Dit maakt het mogelijk om de maaiveldsdaling in de noordelijke berm (boomzijde) van 15 mm in de periode van 2 juli tot 6 september over de diepte te verdelen. In die periode zakte de grondwaterstand 0,28 m, met een grootste zakking op 16 augustus van 0,35 m. De zakking van de zakplaatjes in die periode was van hoog tot laag respectievelijk 8, 0 en 8 mm. De laag tussen het maaiveld en het zakplaatje op 0,50 m is in die periode 7 mm dunner geworden. Deze laag bestaat voor de bovenste 0,20 m uit lichte tot middelzware klei. Ter plaatse van de weg is deze laag vervangen door de wegconstructie en de zandlaag. De laag tussen de zakplaatjes op 0,50 en 1,00 m bestaat van 0,50 tot 0,70 m diepte uit middelzware klei en daaronder uit zware klei. In de beschouwde droge periode krimpt deze laag 8 mm.

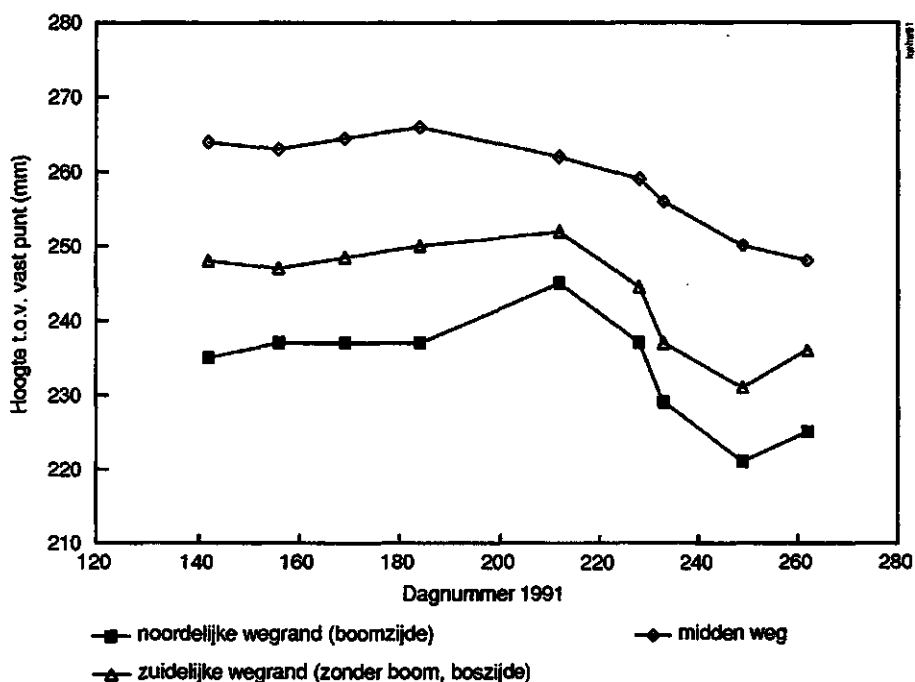


Fig. 19 Verloop van de hoogte van de randen en het midden van de Kooiweg

Ter plaatse van de weg is de middelzware klei vervangen door zand. Tussen de zakplaatjes op 1,00 en 1,50 m zwelt (!) de laag in de droge periode met 8 mm. De bovenste 0,05 m van deze laag is zware klei en de rest veen. Waarom deze laag in de beschouwde periode zwelt is niet duidelijk. Tijdens die periode zakt het grondwater maximaal 0,35 m en wordt op een diepte van 1,0 m een vochtspanning van -245 cm waterdruk bereikt, zodat een zekere krimp te verwachten zou zijn. Het zakplaatje op 1,50 m diepte staat in de veenlaag en blijkt in de droge periode 8 mm te zijn gezakt. Hierbij moet worden opgemerkt dat de zakplaatjes binnen een afstand van 2,0 m tot de boom zijn geïnstalleerd, zodat de bewortelingsdiepte daar bijna maximaal is. De beschouwde maaiveldsdaling is ongeveer halverwege de onderlinge boomafstand, op 4,0 m, gemeten.

In de berm zonder bomen zijn op dezelfde diepten zakplaatjes aangebracht. Ook in dit geval is de periode van 2 juli tot 6 september beschouwd, waarin op 2 juli de hoogste en op 6 september de laagste grondwaterstand werd bereikt. In die periode zakt de grondwaterstand 0,60 m. Het maaiveld en de zakplaatjes zakken van hoog tot laag respectievelijk 24, 21, 9 en 1 mm. De bovenste laag van lichte/middelzware klei krimpt 3 mm. De laag van 0,50-1,00 m diepte bestaat in deze berm bijna volledig uit zware klei en krimpt 12 mm. De laag van 1,00-1,50 m diepte bestaat uit veen en krimpt 8 mm. Uit vochtspanningsmetingen blijkt dat deze berm zonder bomen, maar op grotere afstand van een watervoerende sloot, droger wordt dan de berm met bomen. Op 6 september was de vochtspanning op 1,0 m diepte -807 cm waterdruk.

De grondwaterstanden

Uit figuur 18 blijkt dat vooral onder het populierenbos de grondwaterstand daalt. Deze daling heeft zijn invloed tot aan de diepe watervoerende sloot. De ondiepe sloot valt gedurende het groeiseizoen droog en heeft dan geen invloed meer op de grondwaterstand. Vanuit de diepe watervoerende sloot infiltreert er wel voldoende water in de grond voor de boom in de berm. De boom trekt geen deuk in het hellende grondwater en de zakking van het grondwaterpeil lijkt vooral door het populierenbos te worden veroorzaakt. Dit blijkt ook uit figuur 20 waarin het verloop van het slootpeil van de diepe sloot en de grondwaterstanden onder het midden van de weg, in de berm, in de ruigte en in het populierenbos gedurende het groeiseizoen 1991 is gegeven. Tot 2 juli blijft het peil van de diepe sloot ongeveer constant om daarna in de droge periode met ongeveer 0,30 m te zakken. Daarna stijgt het slootpeil sterk met 0,38 m tot zijn hoogste punt. De hoogste grondwaterstanden zijn gemeten op 2 juli, daarna zakken de grondwaterstanden afhankelijk van de afstand tot de diepe sloot in meer of minder sterke mate met het slootpeil. De daarop volgende stijging van het slootpeil wordt gevolgd door het grondwater tot onder de weg. In de zuidberm en in het populierenbos blijft de grondwaterstand sterk dalen tot 6 september. Daarna stijgt het grondwaterpeil in de zuidberm en stabiliseert zich in het populierenbos. Het is opvallend dat in het voorjaar de grondwaterstand onder het midden van de weg de hoogste grondwaterstand is op dat moment. Een verklaring hiervoor is dat de neerslag op de weg via het zand onder de weg infiltreert. In de berm wordt een deel van de neerslag door de begroeiing opgevangen en verdampt daar ook sneller.

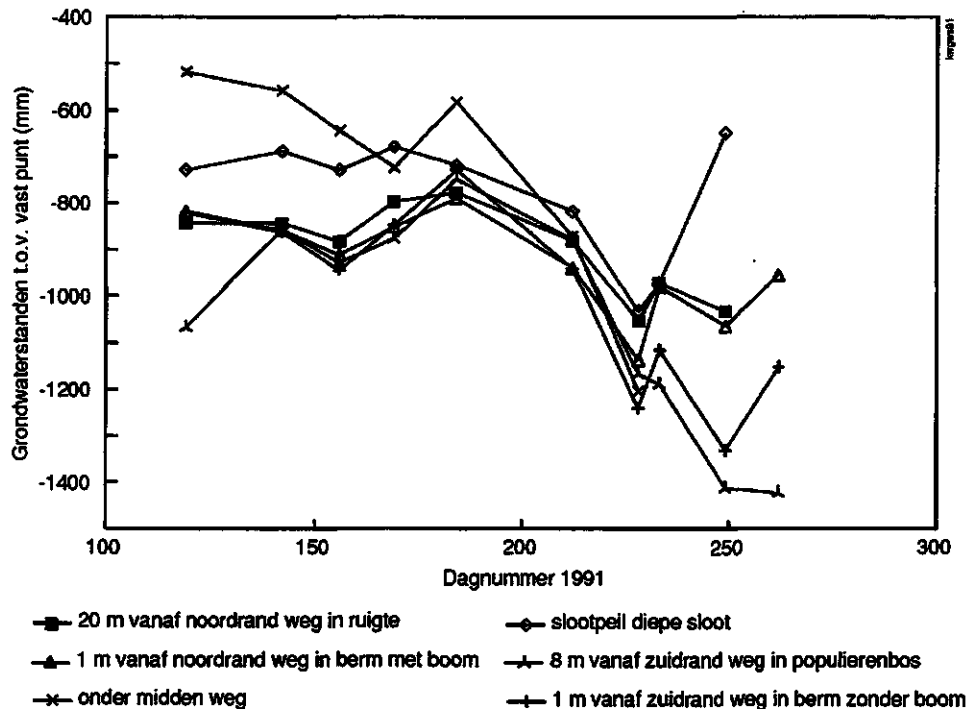


Fig. 20 Verloop van het slootpeil en de grondwaterstanden in 1991 bij de Kooiweg

Verzadigde horizontale en verticale doorlatendheid

De horizontale doorlatendheid van het klei- en veenpakket onder het grondwater is op 11 juli 1991 gemeten met de boorgatenmethode. Het grondwaterpeil stond toen bijna op het hoogste punt in de meetperiode. In zowel de berm met en zonder bomen bleek de doorlatendheid zeer hoog te zijn, meer dan 10 m/dag. In de ruigte op een afstand van ongeveer 7 m vanaf de diepe sloot en in het populierenbos bleek de doorlatendheid ook zeer hoog te zijn. In de berm van de Kooiweg zonder bomen op ongeveer 35 m vanaf de laatste boom in de rij was de doorlatendheid juist laag, 0,24 m/dag. De conclusie kan worden getrokken dat de klei- en veenlaag door de wateronttrekking door wortels is gerijpt en gestructureerd en daardoor sterk doorlatend is geworden. Bedacht moet worden dat klei en in nog veel sterkere mate veen tijd nodig heeft om op te zwellen, zodat na een verhoging van de grondwaterstand het water door de scheuren kan lopen waardoor de doorlatendheid zeer hoog is. Door deze hoge doorlatendheden zal de populier in de berm zolang er water staat in de diepe sloot nooit een deuk in het grondwater trekken, waardoor de zakkingen door krimp sterk beperkt blijven.

Potentiële zakking van een deel van de Kooiweg zonder bomen

In het najaar is op 19-9-1991 in de noordberm van een deel van de Kooiweg **zonder** bomen in beide bermen een profielkuil gegraven en zijn volumemonsters genomen. In de tabellen 8 en 9 is de potentiële zakking van de Kooiweg **zonder** bomen berekend indien daar bomen zouden worden aangeplant. Als ondergrens van het profiel is uitgegaan van de grondwaterstand zoals op 19-9-1991 ter plaatse van de meetraai onder het midden van de weg is gemeten. Dit is een pessimistische aanname, waarschijnlijk

zal bij de Kooiweg **zonder** bomen het grondwaterpeil hoger zijn omdat daar geen populierenbos aanwezig is die de grondwaterstand extra verlaagt zoals bij de dwarsdoorsnede van de Kooiweg met bomen.

Tabel 8 Berekening van de potentiële extra zakking van de Kooiweg zonder bomen indien daar bomen zouden worden aangeplant, uit de vochtmetingen in het najaar (19-9-1991) van de weg met en zonder bomen

laag	- wegdek (cm)	d_s ($g \cdot cm^{-3}$)	W_{zonder} ($g \cdot g^{-1}$)	W_{met} ($g \cdot g^{-1}$)	Δz (cm)
wegfundering	0- 75	-	-	-	-
zware klei	75- 115	2,469	0,67	0,42	3,38
veen	115- 129	1,407	2,07	1,74	0,58(*)
Totaal	0- 129				3,96

* = in beide gevallen ligt het veen boven het grondwater en wordt verondersteld dat het water al uit de grote poriën is gezakt.

Bij een aanplant van bomen in één van de bermten langs het deel van de Kooiweg waar nu geen bomen staan, zal het wortelstelsel zich in de loop van jaren onder de weg uitbreiden. Het gevolg hiervan is dat in het begin de wegrand aan de boomzijde meer zakt dan de wegrand met een berm zonder boom. Het potentiële verschil in zakking tussen de beide wegranden is in tabel 8 berekend met formule 4.9. Het grondprofiel van de Kooiweg **zonder** bomen heeft meer lagen dan het grondprofiel onder de weg met bomen in de meetraai. Wel lijken de lagen onder de weg met bomen overeen te komen met de lagen bij de weg zonder bomen. De berekende potentiële zakking in tabel 8 is gebaseerd op de overeenkomstige lagen en geeft dan ook eerder een schatting van de opgetreden permanente plus reversibele zakking van de weg **met** bomen dan van de potentiële zakking van de weg **zonder** bomen. Het lutumgehalte en het organischestofgehalte van de zware klei is bepaald op respectievelijk $L = 60,2\%$ en $H = 11,2\%$. Het specifiek gewicht van de zware klei is hieruit berekend: $d_s = 2,469 g \cdot cm^{-3}$. Om het specifiek gewicht van het veen te berekenen is aangenomen dat het veen bij de volumebemonsteringen op een diepte van 112 cm onder het wegdek nagenoeg volledig verzadigd was. Het specifiek gewicht van het veen is berekend op: $d_s = 1,407 g \cdot cm^{-3}$. Voor de zakkingsberekening van het veen is geen rekening gehouden met water in de grote poriën.

In tabel 9 is de potentiële zakking van de weg uit dichtheidsmetingen berekend. Bij de dichtheidsmetingen is in de aggregaten bemonsterd, zodat voor de berekening in tabel 9 formule 4.25 is gebruikt. De berekende potentiële zakking van de Kooiweg **zonder** bomen in tabel 9 blijkt ongeveer overeen te komen met de waarden in tabel 8.

Uit de zakkingsmetingen volgt een grootste (reversibele) zakking in het groeiseizoen van 20 mm. De potentiële irreversibele zakking van de weg **zonder** bomen door alleen de verdere rijping kan daarom op 17 tot 20 mm worden geschat.

Tabel 9 Berekening van de potentiële extra zakking van de Kooiweg zonder bomen uit de dichtheidsmetingen in het najaar (19-9-1991) van de weg met en zonder bomen

laag	- wegdek (cm)	γ_{zonder} (g.cm ⁻³)	γ_{met} (g.cm ⁻³)	Δz (cm)
wegfundering	0- 75	-	-	-
zware klei	75- 115	0,914	1,15	2,95
veen	115- 129	0,355	0,415	0,71
Totaal	0- 129			3,66

Rijping

Onder de Kooiweg **zonder** bomen in beide bermen is de klei misschien nog niet gerijpt, wat zou leiden tot extra grote zakkingen bij rijping. De laag zware klei op een diepte van 75-115 cm heeft een lutumgehalte van $L = 60,2\%$ en een organische-stofgehalte van $H = 11,2\%$. De rest is dan $R = 100 - 60,2 - 11,2 = 28,6\%$. Met formule 4.35 is dan het gewichtsvochtgehalte te berekenen behorende bij een rijpingsfactor $n = 0,7$ (grens gerijpt - ongerijpt).

$$W_d \text{ (gerijpt)} = 0,002 R + 0,007 (L + 3H) = 0,71$$

Het vochtgehalte als massafractie van de kleilaag bij de weg **zonder** bomen is $W_d = 0,67$. Deze waarde is na het groeiseizoen op 19 september bepaald. Het is echter aannemelijk dat de vochtspanning onder de weg **zonder** bomen op de beschouwde diepte bijna nul is, zodat een vergelijking met $W_d \text{ (gerijpt)} = 0,71$ mogelijk is. De conclusie is dat kan worden aangenomen dat de zware klei gerijpt is. Zoals volgt uit de berekeningen in de tabellen 8 en 9 en de metingen van de seizoenszakkingen kan de Kooiweg **zonder** bomen bij aanplant ongeveer 17 tot 20 mm irreversibel zakken door het verder volledig rijpen.

In hoeverre het veen is gerijpt is niet te bepalen, omdat voor de toepassing van formule 4.36 het aandeel van de organische stof in de dichtheid bekend moet zijn.

Conclusies

Vanuit de diepe watervoerende sloot, die langs de berm met bomen loopt, wordt voldoende water voor de populier in de berm aangevoerd. De boom trekt dan ook geen deuk in het grondwater. Een belangrijk gegeven hierbij is dat door de beworteling de grond is uitgedroogd en gestructureerd, zodat de doorlatendheid zeer hoog is geworden. Een storend element is de aanwezigheid van een populierenbos, waardoor het grondwaterpeil onder de weg toch zakt. Deze zakking van het grondwater is echter veel minder dan bij de Hutstraat en de Lageweg. Bij de Kooiweg blijft de dikte van de laag vanaf de zandfundering tot aan de grondwaterstand daarom dunner en de zakkingen daardoor kleiner dan bij de Hutstraat en de Lageweg.

De zware kleilaag onder de weg in de meetraai is geheel uitgerijpt, zodat het permanente deel van de zakking van de weg al plaats heeft gevonden.

De weg is op het einde van het groeiseizoen bijna gelijkmatig gezakt, na in de voorzomer gestegen te zijn. Tijdens het groeiseizoen is de stijging/zakking minder

gelijkmatig geweest en is een maximaal verschil van 7 mm tussen de noordrand (boomzijde) en het midden van de weg opgetreden.

5.4 Woutersdijk

In de Over-Betuwe is als meetlocatie de Woutersdijk in de gemeente Valburg uitgezocht. De wegbeplanting bestaat uit een dubbele rij populieren met in de rij een boomaafstand van 11 m. De rijen verspringen een halve boomaafstand ten opzichte van elkaar. Per strekkende meter weg is het kroonoppervlak $2 \times 6 \text{ m}^2$ met een LAI van 2-3. Aan weerszijden van de weg loopt een ondiepe sloot die grenst aan weilanden. Zoals blijkt uit de naam ligt de weg op een dijk. Deze dijk en de weg daarop is zeer oud.

De wegconstructie met fundering heeft een dikte van 0,80 m. Daaronder bestaat het profiel van 0,80-1,40 m uit zware klei, van 1,40-1,50 uit venige klei en daaronder uit veen. De vaste zandlaag begint op 3,0 m diepte.

Bij deze meetlocatie zijn in verband met de heterogeniteit en de beperkte grondmonsternamen geen krimp- en zakkingsberekeningen uitgevoerd.

De dwarsdoorsnede

Met grondboringen is eind juli het profielverloop en de beworteling bepaald (figuur 21 en 22). De raai waarin de bemonstering is uitgevoerd loopt aan de zuidzijde dicht langs de populier en aan de noordzijde ongeveer halverwege tussen twee populieren in. Aan de zuidzijde wordt dan ook een dichtere en zwaarder beworteling gevonden. De beworteling van de populieren gaat tot in de zware klei. Deze is in het algemeen goed gerijpt. Aan de zuidzijde komen daar nog vrij dikke wortels voor. In het veen dringen tot grote diepte dunne wortels door. Het is niet bekend of dit wortels van de populieren zijn. De dikte van de zware kleilaag varieert sterk. Aan de zuidzijde is het veen onder de zware kleilaag zeer slap, terwijl aan de noordzijde bij de boringen in de berm en nabij de sloot het veen juist vrij stevig is. Op 26 september is aan de zuidzijde in de berm op vier meter afstand van een populier een profielkuil gegraven. Daarin bleek het oude dijklichaam bestaande uit zware humeuze klei goed herkenbaar. Een rand van een oude weg bestaande uit grind en puin op de dijk was nog zichtbaar. De huidige weg ligt 0,40 tot 0,50 m hoger. De berm is daarbij opgehoogd en verbreed met een laag matig zware klei met grind, zand en puin. Deze opgebrachte grond heeft weinig structuur en heeft geen duidelijk scheurenpatroon. Deze scheuren hebben een breedte van enkele mm. Nabij de weg is deze laag 0,20 tot 0,30 m dik en op ongeveer 3,0 m afstand 1,0 m dik. Deze laag is slecht beworteld. Op deze laag is 0,20 tot 0,30 m humeuze klei aangebracht die brokkelig is en puin bevat. Deze bovenste laag is sterk beworteld. In de profielkuil aan de wegzijde begint de bovenkant van het oude dijklichaam op een diepte van 0,55 m onder het maaiveld. De onderkant ligt op een diepte van 1,15 m. De zware klei van het oude dijklichaam is gescheurd met doorlopende, 2-8 mm brede verticale scheuren en bestaat uit grote elementen met grondzijden van 0,12 tot 0,15 m en een hoogte van 0,25 m. In de scheuren komen vrij veel wortels voor. De dijk ligt op de oude bouwvoor met grondwaterstanden direct droge

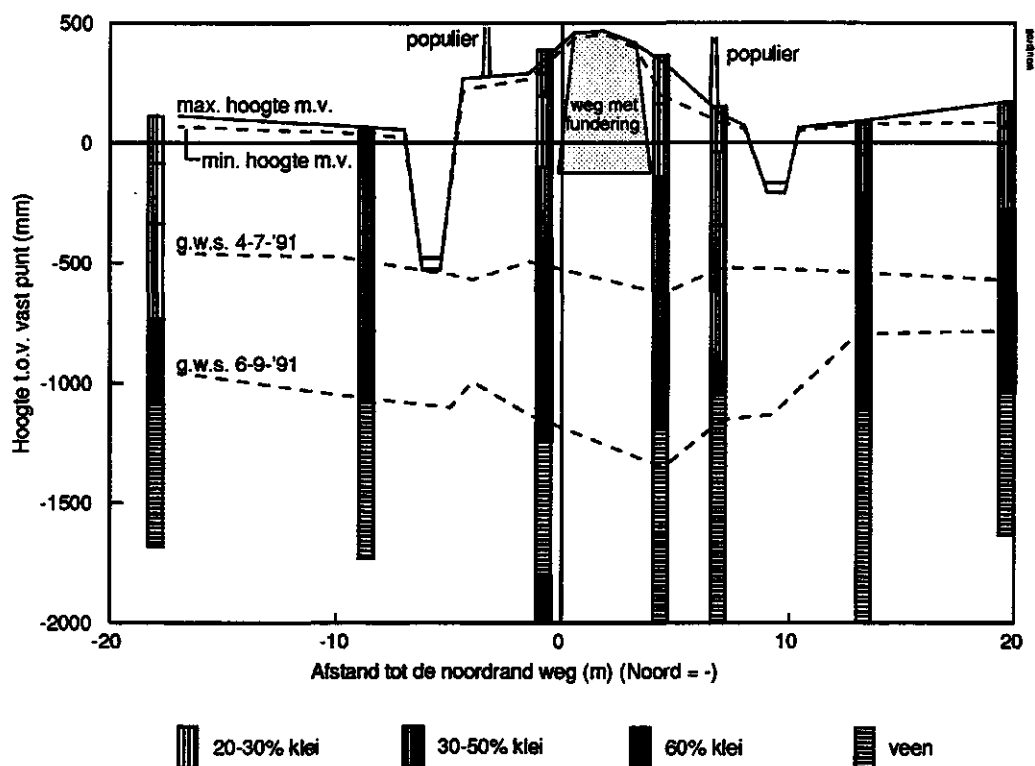


Fig. 21 Dwarsprofiel Woutersdijk met zakking maaiveld in de droge periode en de grondwaterstand direct voor en na de droge periode

periode een dikte van 0,30 m bestaande uit humusrijke klei in de vorm van een zwarte laklaag met bovenin vrij veel wortels. Het veen onder de oude bouwvoor begint op een diepte van 1,45 m en is gereduceerd en bevat geen wortels.

Zakking van het oppervlak en de bodemlagen

In figuur 23 is het verloop van de hoogte van de randen en het midden van de weg gedurende het groeiseizoen gegeven. Het blijkt dat de weg tot 29 juli omhoog komt. Hierbij stijgt de noordelijke wegrand 59 mm, het midden 48 mm en de zuidrand 18 mm. Een storende factor is geweest dat tussen twee meetseries op 19 juni en 4 juli het wegdek vernieuwd is! In de tussenliggende periode zijn de hoogteveranderingen in de berm nihil. Indien aangenomen wordt dat de stijging van het wegdek in de tussenliggende periode door zwel van de grond net als in de berm nihil is, dan volgt uit de metingen dat de asfaltlaag ca. 15 mm dikker is geworden. Na correctie met 15 mm worden de stijgingen van de noordelijke wegrand 44 mm, het midden 33 mm en de zuidrand 3 mm. Na 29 juli begint een droge periode. De wegrand aan de noordzijde reageert hierop wat sterker dan de rest van de weg. Aan de noordzijde van de weg zakt de rand van 29 juli tot 26 september met 25 mm. In dezelfde periode stijgt de zuidrand met 12 mm en daalt het wegmidden met 5 mm. Uiteindelijk is de weg in het groeiseizoen meer gestegen dan gedaald, zodat op 26 september ten opzichte van de beginmeting op 28 mei de noordelijke wegrand 19 mm, het wegmidden 28 mm en de zuidelijke wegrand 15 mm hoger ligt. Hierin is met de correctie van 15 mm voor het vernieuwde wegdek rekening gehouden.

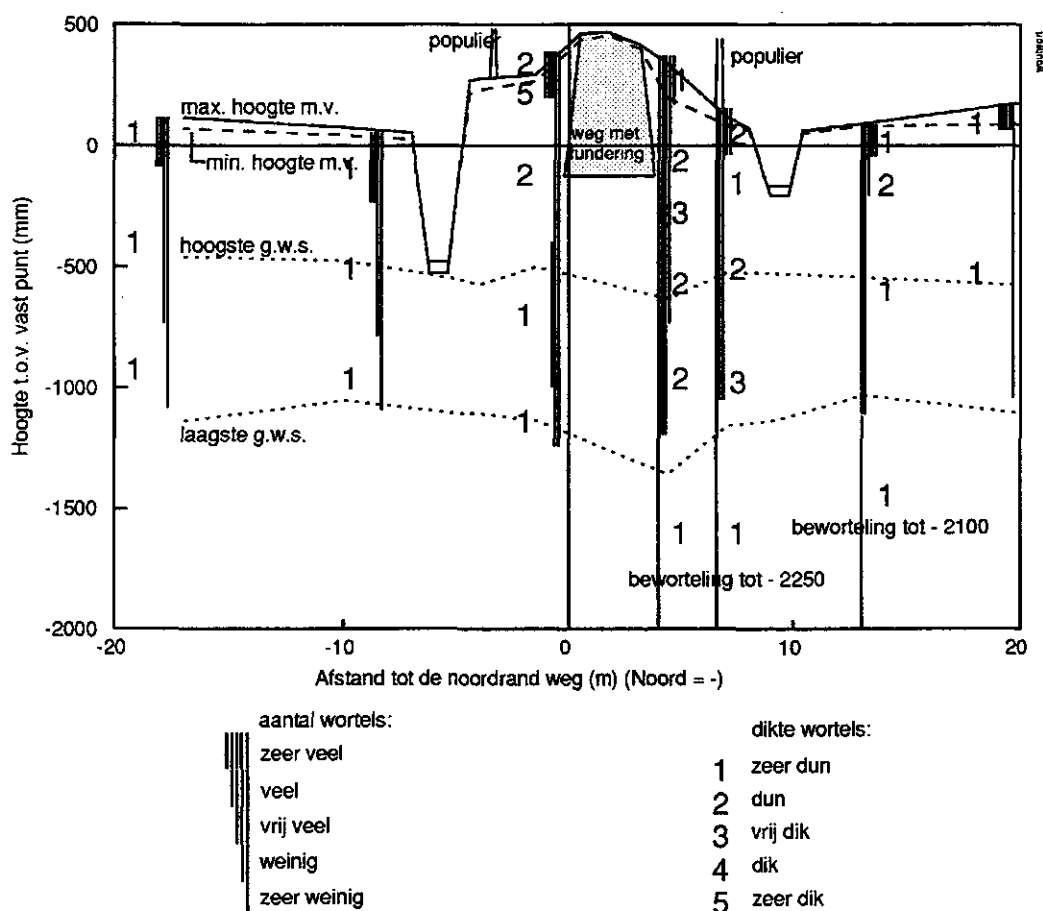


Fig. 22 Dwarsprofiel Woutersdijk met beworteling, zakking maaiveld in de droge periode en grondwaterstanden

Het grootste verschil in zakking/stijging treedt op 29 juli op tussen de zuidrand en het midden van de weg en is 30 mm.

In de bomenrij in de zuidberm op 3,80 m vanaf de wegrand zijn op een diepte van 0,50; 1,00 en 1,50 m zakplaatjes aangebracht en de maaiveldhoogte gemeten. Dit maakt het mogelijk om de maaiveldsdaling over de diepte te verdelen. In de periode van 28 mei tot 29 juni zakte het maaiveld 5 mm. Dit was een relatief natte periode waarin het grondwater met ongeveer 0,14 m tot zijn hoogste stand rees. Daarna zakte het maaiveld in de daarop volgende droge periode tot 22 augustus nog 30 mm. Van 22 augustus tot 26 september steeg het maaiveld 35 mm, zodat het maaiveld aan het einde van de meetperiode op zijn beginhoogte was uitgekomen. De laagste grondwaterstand werd gemeten op 6 september (zie figuren 21 en 22). In de eerste periode stegen de zakplaatjes van hoog tot laag respectievelijk 2, 1 en 4 mm. De laag tussen het maaiveld en het zakplaatje op 0,50 m is in die periode 7 mm dunner geworden. Deze laag bestaat voornamelijk uit opgebrachte humeuze klei met puin en is sterk beworteld. De laag tussen de zakplaatjes op 0,50 en 1,00 m bestaat uit opgebrachte, slecht gestructureerde middelzware klei met zand en puin en is slecht beworteld. In de beschouwde beginperiode zwelt deze laag 1 mm. De laag tussen de zakplaatjes op 1,00 en

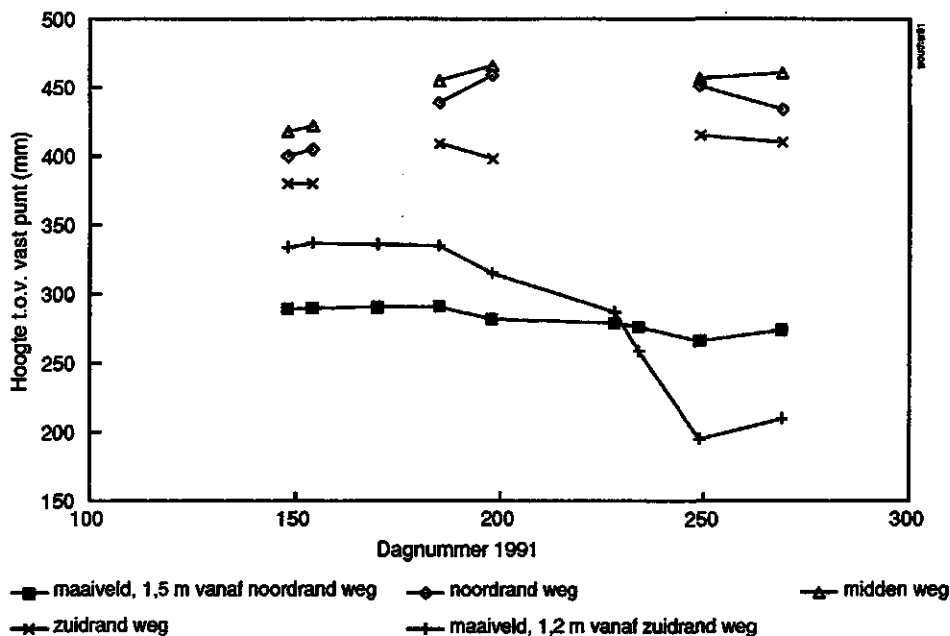


Fig. 23 Verloop van de hoogte van de bermen, randen en het midden van de Woutersdijk in 1991

1,50 m en 1,50 m is van hetzelfde opgebrachte materiaal en krimpt in de beschouwde periode met 3 mm. Het zakplaatje op 1,50 m diepte staat op of net onder de 0,10 m dikke oude bouwvoor bestaande uit humeuze klei met daaronder kleilig broekveen. Dit plaatje is 4 mm omhoog gekomen. In de daarop volgende droge periode tot 22 augustus zakten de plaatjes van hoog tot laag respectievelijk 12, 7 en 6 mm. Hieruit volgt dat de drie beschouwde lagen van hoog tot laag met respectievelijk 18, 5 en 1 mm zijn gekrompen. Uit de zakplaatmetingen blijkt dat vooral de zwel en krimp van de bovenste 0,50 m van het profiel de zakking en stijging van het maaiveld bepaalt. Het profiel bij de zakplaatjes bestaat voornamelijk uit opgebrachte grond en verschilt daarmee sterk van het profiel onder de weg bestaande uit zware klei. De zakplaatmetingen kunnen daarom niet worden gebruikt om hoogteveranderingen van de weg te verklaren.

In de noordberm zijn op dezelfde diepten zakplaatjes aangebracht. De metingen hieraan blijken echter onbetrouwbaar te zijn en zijn daarom buiten beschouwing gelaten.

De grondwaterstanden en vochtspanningen

Uit figuur 21 en 22 blijkt dat aan de zuidzijde van de weg, waar zich de ondiepste sloot bevindt, in het grondwaterpeil een deuk met een diepte van 0,50 m wordt gevormd. De sloot aan de zuidzijde valt in juli al droog en heeft weinig invloed op de grondwaterstand in de droge periode. De wat diepere sloot aan de noordzijde valt in de loop van augustus droog en heeft daarna geen invloed meer op de grondwaterstand. Uit het verloop van de grondwaterstanden gedurende de meetperiode in figuur 24 blijkt dat in het begin de grondwaterstand op enige afstand van de weg zeer laag staat. Bij de plaatsing van de peilbuizen op 9 april was het opgevallen dat de klei boven het veen, ook nabij de weg, droog was. Daarna stijgt het grondwater gedurende de natte

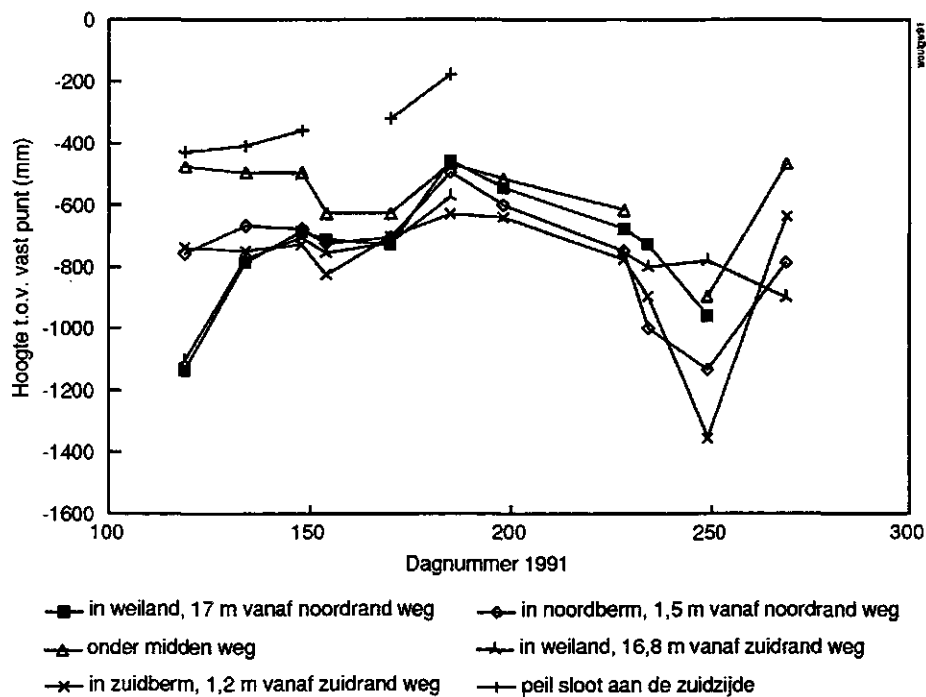


Fig. 24 Verloop van de grondwaterstanden en slootpeil in 1991 bij de Woutersdijk

voorzomer de natte voorzomer tot op 4 juli de hoogste grondwaterstand wordt gemeten. In de daarop volgende droge periode zakt de grondwaterstand sterk, vooral nabij de weg. Op enige afstand in het weiland is deze zakking veel minder uitgesproken, vooral aan de zuidzijde. In de bermen en onder de weg is op een aantal diepten de vochtspanning met tensiometercups gemeten. Hieruit blijkt dat alleen aan de zuidzijde de grond sterk uitdroogt. Op 16 augustus gaven tensiometercups op een diepte van 0,106 m onder het vaste punt aan dat de grond daar sterk was uitgedroogd. Op 26 september was dit ook het geval voor tensiometercups op een diepte van 0,606 m onder het vaste punt. Een halve meter daaronder gelegen cups bleven aangeven dat de grond daar verzadigd of nat bleef.

Verzadigde horizontale en verticale doorlatendheid

De doorlatendheid van het klei- en veenpakket onder het grondwater is op 11 juli 1991 gemeten met de boorgatenmethode. Het grondwaterpeil stond toen bijna op het hoogste punt in de meetperiode. In de zuidberm is in de bomenrij in twee boorgaten gemeten. De grondlagen waarvan de doorlatendheid is bepaald is de eerder beschreven slecht gestructureerde opgebrachte grond bestaande uit middelzware klei met zand en puin. De gemeten doorlatendheden zijn $k = 0,195$ m/dag en $k = 0,055$ m/dag. In het weiland op een afstand van ongeveer 2,5 m vanaf de ondiepe zuidsloot blijkt de doorlatendheid zeer hoog te zijn, meer dan 10 m/dag. Het betreft hier klei met veel boomwortels tot een diepte van 1,0 m onder het maaiveld. Hetzelfde profiel maar dan zonder boomwortels op een afstand van 12,5 m van de sloot blijkt veel slechter doorlatend te zijn met een doorlatendheid van $k = 0,08$ m/dag. Bij het graven van profielkuilen op 26 september in de zuidberm en ver in het weiland bleek uit het feit dat het grondwater

snel in de kuil stroomde dat de doorlatendheid door de droogteperiode sterk was toegenomen.

Discussie en conclusies

Aan het begin van de meetperiode was de grondwaterstand laag, waarna deze in de natte voorzomer steeg. Hierdoor zal de zware klei onder de weg opzwellen waardoor het wegdek zal stijgen. De hoogtemetingen laten zien dat deze verwachting overeenkomt met de praktijk. Wel blijkt de noordrand veel meer te stijgen dan de zuidrand. Het waarom hiervan is onduidelijk. Omdat de weg in zijn geheel op een oude dijk van zware klei ligt, aan beide zijden een bomenrij heeft en de afstand van de boom tot de meetraai aan beide zijden gelijk is, was de verwachting dat de weg min of meer symmetrisch zou zakken en stijgen. In de daaropvolgende droge periode zakt het grondwater, waarbij onder de weg en de berm een deuk in het grondwaterpeil wordt getrokken. Zoals te verwachten zakt door de hieruit volgende krimp ook de hoogte van het wegdek aan de noordzijde en het midden. Tegen de verwachting in stijgt de zuidrand! Dit is des te meer onverwacht omdat aan deze zijde het grondwaterpeil het meeste zakt en de grond volgens de vochtspanningsmetingen het droogste wordt en de ondergrond het slapste is. Aan het einde van de meetperiode blijkt de weg 15 tot 28 mm ten opzichte van de beginmeting te zijn gestegen, waarbij het midden van de weg het meeste is gestegen. Uit de hoogtemetingen van het diepste zakplaatje blijkt dat de ondergrond met de stijging en zakking van het grondwater mee stijgt en zakt. Dit blijft echter beperkt tot enkele mm. Aan het einde van de meetperiode blijkt de ondergrond 6 mm te zijn gezakt.

De grondwaterstand in de winter en misschien zelfs de droogte van het voorafgaande jaar blijken van groot belang te zijn voor de dynamiek van stijgen en zakken van de weg. Door de lage stand van het grondwaterstand in het voorjaar is de beginhoogte van de weg zo laag dat op het eind van het groeiseizoen de weg meer gestegen dan gezakt blijkt te zijn.

Ondanks het feit dat in beide berm en bomenrij aanwezig is blijken de beide wegranden niet evenveel te stijgen en zakken. Het aanplanten van bomen in beide berm en bomenrij in plaats van in één berm blijkt geen garantie te zijn voor een gelijkmatiger zakking van de weg. Bij de Wouterdijk kunnen de ongelijke zakkingen en stijgingen van de wegranden worden verklaard uit het feit dat de ondergrond nogal specifiek is omdat het een zeer oude dijk betreft met daarop een weg waarbij de berm met slecht bewortelbare grond zijn verbreed en opgehoogd. Hierdoor ontstaan grote verschillen in grondprofielopbouw en bewortelingsmogelijkheden.

5.5 Conradsweg

De Conradsweg bij Rouveen ligt in een veengebied. Aan één kant van de weg komt een enkele rij essen voor met een kroon van 2 m² per strekkende meter weg. Aan de overzijde van de weg bevindt zich het Conradskanaal. De bodemopbouw in de berm is: 0-10 cm zand, 10-300 cm veen en daaronder zand. Achteraf bleek zich onder de weg een dik zandpakket te bevinden. Dit maakt de keus van deze locatie minder

gelukkig omdat onttrekking van water aan dit zandpakket geen zakking zal veroorzaken. De zakkingen en stijgingen in de berm van het maaiveld en vooral de zakplaatjes blijft echter waardevolle informatie.

De dwarsdoorsnede

Met grondboringen is eind juli het profielverloop en de beworteling bepaald (figuur 25 en 26). De beworteling van de essen gaat dieper dan de laagste grondwaterstand zoals in de meetperiode is gemeten. De bij de boringen in de noordberm bepaalde GLG gaat wel veel dieper en is bepaald op 2,8 m minus maaiveld. In de zuidberm is de GLG bepaald op 1,25 m onder maaiveld en in het weiland aan de noordzijde op 0,60 tot 1,15 m onder maaiveld. De bepaalde waarden voor de GLG en de aanwezigheid van vrij dikke wortels tot meer dan een meter diepte wijzen erop dat er in vroegere tijden een deuk in het grondwater is getrokken. In de meetperiode lijkt hier echter geen sprake van te zijn. Uit de boringen volgt dat het veen met een soms dikke laag zand is afgedekt. In het veen komen dunne zandlaagjes voor.

Zakking van het oppervlak en de bodemlagen

De zakkingen van de weg en het maaiveld in de bermen en het weiland bleken gering te zijn. Het maaiveld in zowel de beide bermen als het weiland zakte maximaal 14 mm. De weg lijkt enigszins scheef te zakken naar de berm met de bomen toe met een maximale zakking van de noordrand van de weg van 8 mm. In beide bermen zijn zakplaatjes op een diepte van 0,5; 1,0 en 1,5 m aangebracht. Het grootste hoogteverschil gedurende de meetperiode is 10 mm en treedt op bij het zakplaatje op 1,5 m diepte in de zuidberm. De grootste zakkingen en krimp zijn te verwachten in de noordberm omdat daar de essen het profiel het sterkst uitdrogen. De maximale zakking is daar echter slechts 14 mm. Uit de metingen met de zakplaatjes volgt dat de laag van 0-0,5 m diepte in het meetseizoen 6 mm zwelt en 4 mm krimpt. Voor de lagen 0,5 -1,0 m en 1,0-1,5 m zijn deze waarden respectievelijk 1 mm zwel en 2 mm krimp en 8 mm zwel en 1 mm krimp. In de zuidberm stijgt het maaiveld in de natte voorzomer met 14 mm en zakt in de natte periode daarna 3 mm. Deze stijging wordt voornamelijk veroorzaakt door het zwellen van de laag 0-0,5 m diepte met 17 mm in de natte periode.

De grondwaterstanden en vochtspanningen

Uit figuur 25 en 26 blijkt dat de variatie in de grondwaterstand klein is. De bomen trekken geen diepe deuk in het grondwater. Met het kanaalpeil wordt de grondwaterstand enigszins gereguleerd. Aan het einde van de natte periode staat het kanaalpeil op zijn laagst. Aan het einde van de droge periode is het kanaalpeil opgezet. De sloot aan de noordzijde valt in de droge periode droog en heeft dan geen invloed meer op het grondwaterpeil. In de bermen en onder de weg zijn de vochtspanningen gemeten. Gedurende de hele meetperiode bleken de vochtspanningen weinig te variëren. Dit gold zelfs voor de vochtspanningen in de bermen op een diepte van 0,5 m. De verklaring hiervoor is dat 1) de bomen nog klein zijn zodat verdampingsoverschot beperkt blijft, 2) het veen uit de grotere poriën een aanzienlijke hoeveelheid water kan leveren zonder dat de vochtspanning sterk daalt en waarbij het veen slechts weinig krimpt, 3) door de aanwezigheid van zandlaagjes in het veen de doorlatendheid hoog is.

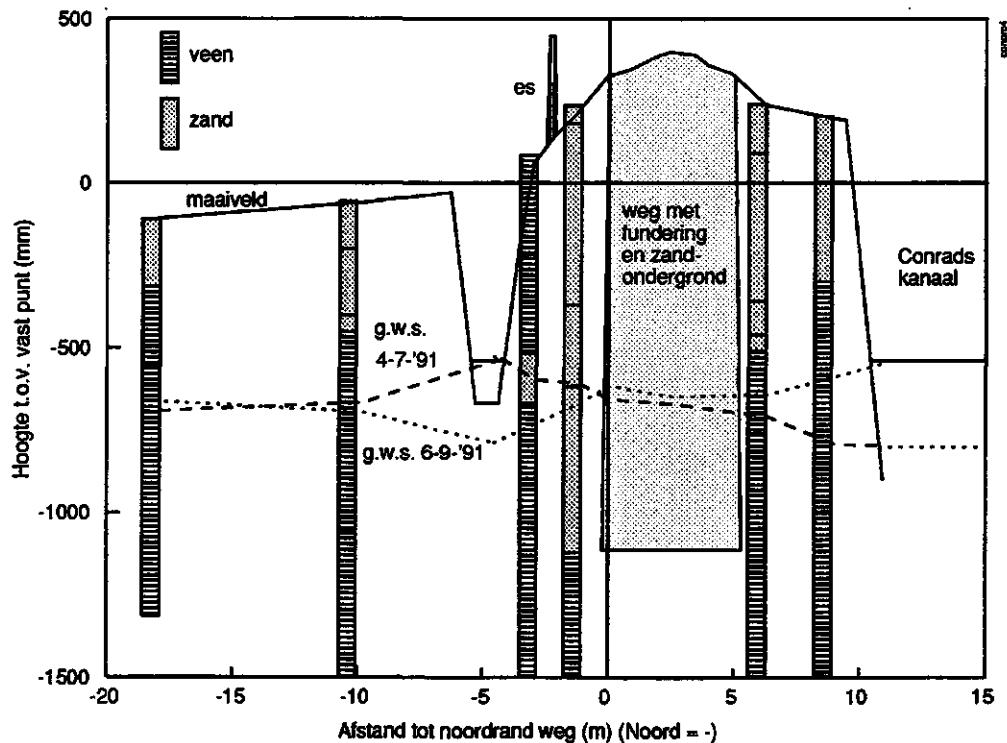


Fig. 25 Dwarsprofiel Conradsweg met profielopbouw en grondwaterstanden direct voor en na de droge periode

In de droge periode is bij een wilg in het weiland het grondwaterpeil op verschillende afstanden van de boom gemeten. Ook hier werd geen deuk in het grondwaterpeil getrokken.

Discussie en conclusies

Uit de metingen volgt dat de schade aan de weg die op sommige delen van de Conradsweg is geconstateerd, niet aan zakkingen door vochtonttrekkingen door bomen kan zijn veroorzaakt. Omdat de weg op een zandlaag ligt die onder de laagste grondwaterstand eindigt, zijn er ook geen (ongelijke) zakkingen te verwachten. De veranderingen van de maaiveldhoogten blijven beperkt. Dit is een gevolg van het feit dat het veen wordt bedekt door een laag zand. Omdat gras ondiep wortelt, blijven de meeste wortels in deze zandlaag en wordt het veen eronder niet sterk uitgedroogd en blijft de krimp beperkt. In de berm met bomen dringen de wortels diep in het veen door en zou een sterke indroging en krimp te verwachten zijn. De waterreserve die het veen heeft in combinatie met het water uit het opgezette kanaal dat door de hoge doorlatendheid van het veen met daarin zandlaagjes gemakkelijk wordt aangevoerd blijken groot genoeg te zijn om het verdampingsoverschot van de boom te compenseren. Er wordt wel een ondiepe deuk in het grondwater wordt getrokken. Uit de vochtspanningsmetingen blijkt dat de vochttoestand van het veen in de noordberm in het hele groeiseizoen bijna niet verandert.

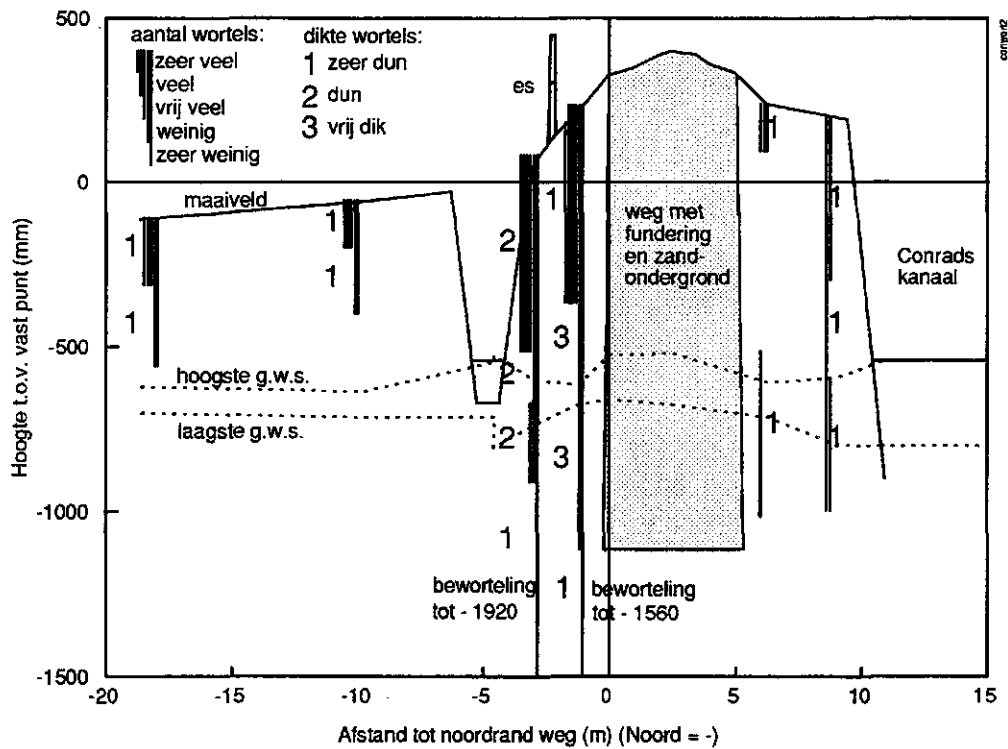


Fig. 26 Dwarsprofiel Conradsweg met beworteling en grondwaterstanden

Een belangrijke conclusie die uit de metingen aan deze locatie kan worden getrokken is dat bij voldoende doorlatendheid de grond door de boomwortels niet extreem wordt uitgedroogd en de krimp en de zakkingen beperkt blijven. Het opzetten van het sloot- of kanaalpeil bij droogte of juist het verlagen ervan in natte omstandigheden heeft bij voldoende doorlatendheid een positief effect.

5.6 Vergelijking en samenvatting meetlocaties

Van de vijf meetlocaties zijn de Hutstraat, de Lageweg en de Kooiweg het beste onderzocht en kunnen het beste met elkaar worden vergeleken. De Woutersdijk en de Conradsweg hebben elk een specifiek omstandigheid waardoor een vergelijking met de andere meetlocaties moeilijk wordt. De Woutersdijk ligt op een oud dijklichaam van zware klei, waarbij de opbouw van het grondprofiel in de berm anders is dan onder de weg. De Conradsweg blijkt op een diep zandlichaam te liggen, waardoor nauwelijks zakkingen optreden.

In tabel 10 zijn de Hutstraat, de Lageweg en de Kooiweg met elkaar vergeleken. Uit de combinatie van de profielopbouw met de laagste grondwaterstand volgen de lagen die boven het grondwater uitkomen en dan door wortels kunnen worden uitgedroogd. Onder de Hutstraat blijkt dit lagenpakket uit sterk krimpgevoelige grondsoorten te bestaan en 2,10 m dik te zijn. Deze dikte is voor een belangrijk deel het gevolg van

de vorming van een 0,80 m diepe deuk in het grondwater door de vochtonttrekking door de boom en voor een ander deel door de nogal dunne wegconstructie. Zonder de deuk in het grondwater en een wat dikkere wegconstructie zou de dikte van de uitdrogende lagen tot 1,10 m worden beperkt. Een belangrijk aspect hierbij is dat met de diepte de grond minder sterk is gerijpt en meer krimppotentieel heeft. Bij de Lageweg heeft het uitdrogende lagenpakket een dikte van 1,35 m. Hierin is een 0,25 m dikke laag klei/zware zavel begrepen die niet zo sterk krimpgevoelig is. Bij deze meetlocatie wordt de beschouwde dikte voor een groot deel veroorzaakt door een 0,75 m diepe deuk in het grondwater. Zonder deze deuk in het grondwater zou de dikte van het uitdrogende lagenpakket worden beperkt tot 0,60 m. De grote invloed van zo'n deuk in het grondwater blijkt uit een vergelijking van de meetlocaties Lageweg en Kooiweg. Bij de Kooiweg treedt deze deuk niet op, hoewel het grondwaterpeil wel enigszins helt van Noord naar Zuid door de aanwezigheid van een populierenbosje aan de zuidzijde van de weg. Bij de Kooiweg is de dikte van het uitdrogende lagenpakket 0,70 m, ongeveer de helft van het uitdrogende lagenpakket van de Lageweg. Dit lijkt tot uitdrukking te komen in de zakking in de droge periode. De Lageweg zakt aan de boomzijde twee maal zo veel als de Kooiweg. Bovendien blijkt de Kooiweg op het eind van het seizoen veel gelijkmatiger gezakt te zijn dan de Lageweg. Als in beschouwing wordt genomen dat de dikte van het uitdrogende pakket onder de Kooiweg vergelijkbaar is met de 0,60 m dikte van dit pakket van de Lageweg zonder deuk, dan kan de conclusie worden getrokken dat een deuk in het grondwater de kans op scheuren in de weg sterk vergroot.

Bij de Kooiweg treedt deze deuk in het grondwater niet op omdat aan de boomzijde van de weg een diepe, watervoerende sloot loopt, die in de droge periode bovendien is opgezet. Het opzetten van de sloot ná een zekere uitdroging van de grond lijkt een slimme strategie te zijn, omdat uit de doorlatendheidsmetingen blijkt dat de grond door uitdrogen sterk doorlatend wordt. Zeker voor de grond nabij de sloot is dit van groot belang. De ondiepe sloten blijken al vroeg in de droge periode droog te vallen en geven geen enkele bijdrage aan het voorkomen van een deuk in het grondwater.

Tabel 10 Vergelijking Hutstraat, Lageweg en Kooiweg, N = noordrand, M = midden en Z = zuidrand van de weg

Meetlocatie: Wegzijde:	Hutstraat			Lageweg			Kooiweg		
	N	M	Z	N	M	Z	N	M	Z
Profiel									
Wegconstructie + grondverbetering (m)	0,0-0,50			0,0-0,70			0,0 -0,75		
Zware klei	0,50-2,00			0,70-1,40			0,75-1,15		
Kleiig veen	2,00-2,40			1,40-1,60			-		
Zware klei	2,40-2,80			-			-		
Veen	2,80-3,20			1,60-1,80			1,15-6,00		
Ondergrond	zand			klei/zavel			zand		
Grondwaterstand t.o.v.									
hoogte wegmidden (m)									
Laagste	-2,60	-2,60	-1,90	-2,05	-2,05	-1,85	-1,39	-1,45	-1,58
Hoogste	-1,45	-1,45	-1,45	-1,35	-1,40	-1,35	-1,07	-0,77	-0,98
Verschil	1,15	1,15	0,45	0,70	0,65	0,50	0,35	0,68	0,60
Diepte 'deuk'		0,80			0,75				
Krimpemde lagen									
Boven grondwater:									
— Zware klei (m)	0,95	0,95	0,95	0,65	0,70	0,65	0,29	0,02	0,23
Onder grondwater:									
— Zware klei	0,65	0,65	0,55	0,05	-	0,05	0,11	0,38	0,17
— Kleiig veen	0,40	0,40	-	0,20	0,20	0,20	-	-	-
— Zware klei	0,20	0,20	-	-	-	-	-	-	-
— Veen	-	-	-	0,20	0,20	0,20	0,24	0,30	0,43
— Klei/zavel	-	-	-	0,25	0,25	0,05	-	-	-
Totaal:	2,10	2,10	1,50	1,35	1,35	1,15	0,64	0,70	0,83
Hoogteverandering									
weg (mm)									
Stijging natte periode	3	9	6	13	11	10	10	4	4
Zakking droge periode	59	61	31	40	27	8	20	20	16
Zakking berm									
droge periode									
Maaiveld (mm)	64		20	45		20	15		24
Zakplaatje op:									
0,50 m - mv.	56		14	29		-	8		21
1,00 m - mv.	58		1	26		-	0		9
1,50 m - mv.	48		5	11		-	8		1
2,00 m - mv.	32		10	-		-	-		-
Boom	Wilg		-	Wilg		-	Populier		-
Sloot	Ondiep		Diep	Ondiep	Diep		Diep	Ondiep	

Bij een vergelijking van de drie meetlocaties ten aanzien van de zakkings in de droge periode in tabel 10 valt op dat deze ruwweg evenredig zijn met de dikte van het uitdrogende pakket. Ten tweede valt op dat de zakkingsverschillen tussen de weghelften bij de Hutstraat en zeker bij de Lageweg groot zijn. Bij de Kooiweg is dit niet het geval. Behalve de door de deuk veroorzaakte ongelijke grondwaterstand onder de beide weghelften, lijkt los daarvan het feit dat het uitdrogende lagenpakket onder de Hutstraat en de Lageweg dikker is dan onder de Kooiweg van belang. Uit het bewortelingsonderzoek in de profielkuilen dwars door de weg blijkt dat onder de Hutstraat en de Lageweg de door de wortels ge-exploiteerde en uitgedroogde grond per jaar in horizontale richting opschuift. Op de grens beworteld (droog) en onbeworteld (nat) ontstaan de scheuren in de weg. Bij de Hutstraat heeft deze grens (en de scheur) de berm zonder boom al bereikt, bij de Lageweg is dit nog niet het geval en is in 1991 de grens de zuidrand van de weg op ca. 0,5 m genaderd. Onder de Kooiweg is de bewortelingsdichtheid onder beide weghelften gelijk. Blijkbaar is daar het verleggen van de grens reeds lang voltooid. Als het bewortelde gebied tot in de berm zonder boom reikt, heeft een groot deel van de permanente zakking van de weg door (volledige) rijping reeds plaatsgevonden en is een groot deel van het 'leed' geleden. Een groot voordeel van een dun uitdrogend lagenpakket is dat de uitbreiding van het wortelstelsel alleen in horizontale richting kan plaatsvinden, zodat de bewortelings- en uitdrogingsgrens in korte tijd onder de weg door is. Hierdoor zijn de grootste en ongelijkmatige zakkings al snel verleden tijd.

In de voorzomer is bij alle meetlocaties behalve de Conradsweg de weg gestegen door het zwellen van de grond. De Woutersdijk blijkt sterk en onregelmatig te stijgen. De noordrand steeg 44 mm en de zuidrand 3 mm. De zakking van de noordrand in de droge periode is zelfs minder dan de stijging in de natte periode, zodat na het groeiseizoen de noordrand hoger ligt dan in het voorjaar. De zuidrand blijkt zelfs in de droge periode nog te stijgen. Uit de eerste grondwaterstandsmetingen blijkt dat in het vroege voorjaar de grondwaterstand zeer laag stond. Dit vormt waarschijnlijk de verklaring voor het afwijkende gedrag van de Woutersdijk. Bedacht moet worden dat net als onregelmatige zakkings ook onregelmatige stijgingen een zware belasting vormen voor de asfaltconstructie. De Woutersdijk heeft aan twee zijden een rij bomen. De verwachting was dat hierdoor de weg vanaf twee zijden, dus intensiever, zou worden beworteld, zodat de weg gelijkmatiger zou zakken. Bij de Woutersdijk is dit niet het geval. Dit blijkt uit het onderzoek naar de beworteling in een doorsnede dwars op de weg op gelijke afstand tot de boom in de noordberm en in de zuidberm. De beworteling aan de noordzijde blijkt veel intensiever te zijn dan aan de zuidzijde. Waarom dit zo is blijft onduidelijk, maar zou een gevolg kunnen zijn van de ophoging van de berm met slecht doorwortelbare grond, zoals blijkt uit een profielkuil in de zuidberm.

Het grote belang van de doorlatendheid van de grond en van de mogelijkheid van veen om veel water te leveren uit de grotere poriën zonder dat er veel krimp optreedt blijkt uit de metingen aan de Conradsweg. Het blijkt dat de bomen nauwelijks een deuk in het grondwater trekken, terwijl de bomen zelfs in de berm staan die niet aan het kanaal grenst. Het veen droogt zelfs in de berm met bomen nauwelijks uit. De zakkings in de berm blijven dan ook beperkt.

De conclusies van het onderzoek aan de vijf locaties zijn vertaald in:

1. Een kaart die de kans op schade aan een weg door zakking ten gevolge van vochtonttrekking door bomen geeft (toelichting in aanhangsel 2);
2. De aanbevelingen die in hoofdstuk 6 'Preventie van schade' worden gedaan.

6 Preventie van schade

In dit hoofdstuk worden uit de resultaten van het literatuuronderzoek en het onderzoek aan de vijf meetlocaties aandachtspunten en aanbevelingen gedestilleerd om schade aan wegen door zakkingen ten gevolge van vochtonttrekking door bomen te voorkomen of te beperken.

Boomkeuze

Uit ervaringen blijkt als volgorde van schadelijkheid: 1) Populier en wilg, 2) eik, iep en es, 3) kastanje, robinia, esdoorn, plataan en linde, 4) beuk, berk, prunus, appel en peer. Bomen die ondiep wortelen doordat de wortels bij lange tijd onder water afsterven zijn geschikte kandidaten: Appel, peer, berk, prunus, zwarte noot, gleditsia en noorse esdoorn, zie ook 'Stadsbomen van Acer tot Zelkova' (Janson, 1989). In een aantal gevallen kunnen bomen die een lage potentiële verdamping hebben uitkomst bieden. Deze zijn: Acer platanoides, gleditsia, plataan, juglans nigra en robinia.

Locatie boom

- 1) Bij slecht doorlatende grond is de kans groot dat de toestroming van grondwater de verdamping van de boom bij lange na niet kan bijhouden, zodat bij de boom het grondwater plaatselijk sterk zakt. Daardoor ontstaat een 'deuk' in het grondwaterpeil waardoor tot een grotere diepte grondlagen worden blootgesteld aan krimp, wat resulteert in zakking. Bovendien is deze zakking plaatselijk, waardoor de weg ongelijkmatiger gaat zakken. Door de boom zo dicht mogelijk bij een diepe sloot die óók in droge tijden water aanvoert te planten, kan het ontstaan van de 'deuk' in het grondwater worden voorkomen of de diepte daarvan worden beperkt;
- 2) Het zo groot mogelijk nemen van de afstand tussen boom en wegrand zal de kans op schade doen afnemen. De bij **Boomkeuze** als schadelijkste gekenmerkte boomsoorten hebben echter grote afstanden nodig om enig effect te sorteren. De boomsoorten die in **Boomkeuze** in categorie 4 vallen bieden wat dat betreft betere mogelijkheden, zie ook tabel 1;
- 3) Beide bermbeplantingen heeft als voordeel dat de grond onder de weg sneller geheel is beworteld, waardoor de permanente zakkingen in korte tijd zijn gerealiseerd en de reversibele zakkingen gelijkmatiger zijn. Er zal wel eerder een deuk in het grondwater worden getrokken!

Grondsoort

Zware klei (> 50% lutum) en veen kennen de grootste krimp en zullen aanleiding geven tot de grootste zakkingen. Veen heeft als voordeel dat het veel grote poriën heeft waaruit de boom veel water kan trekken zonder dat het veen sterk krimpt. Indien de veenlaag dik is en in natte periode verzadigd raakt kan de hoeveelheid water in de grote poriën het verdampingsoverschot van kleine bomen of bomen met een beperkte verdamping (zie **Boomkeuze**) voor een groot deel compenseren. Het nadeel van veen is dat als het sterk uitdroogt ook sterk kan krimpen. De consequentie is dat een dunne veenlaag die een grote kans heeft om sterk uit te drogen 'gevaarlijker' is dan een dikke veenlaag die natter blijft. Met het afnemen van het lutumgehalte neemt het krimppotentieel van klei af. Lichte zavel (< 17,5% lutum) zijn ongevaarlijk. Zandgronden krimpen niet. Ongerijpte grond heeft een zeer groot krimppotentieel en geeft al snel aanleiding tot

grote schade.

Grondwaterstand

Samen met de grondsoort is de ontwateringstoestand van groot belang voor de zakking en eventueel optredende schade aan de weg. Het gaat hierbij om de dikte en aard van de grondlagen die bij de laagste grondwaterstand beschikbaar komen voor de beworteling. Een twee maal zo dikke laag krimpemde grond tussen fundering of grondverbetering en de laagste grondwaterstand geeft twee maal zoveel zakking. Een combinatie van sterk krimpemde grondlagen en diepe grondwaterstanden levert het grootste gevaar voor schade aan wegen. Een diepe grondwaterstand heeft namelijk ook als groot nadeel dat er grote zakkingsverschillen optreden tussen het deel van de weg met en het deel zonder een bewortelde ondergrond. Bovendien duurt het lang voordat de beworteling onder de weg door is, waardoor de zakkingsverschillen en de daardoor veroorzaakte schade lang blijven bestaan.

De grondwaterstand die langdurig tijdens de winter en voorjaar wordt bereikt is van belang voor boomsoorten die zoals aangegeven in **Boomkeuze** niet lange tijd met hun wortels onder water kunnen blijven. Door een hoge grondwaterstand in de winter en het voorjaar sterven bij deze boomsoorten de diepere wortels af, waardoor de bewortelingsdiepte wordt beperkt, zelfs als in de zomer de grondwaterstanden veel lager zijn. Bij een diepte van de fundering of grondverbetering die wat groter is dan diepte van het grondwaterpeil in de winter en het voorjaar zullen deze boomsoorten niet onder de fundering of grondverbetering wortelen en geen zakkingen veroorzaken.

Combinatie grondsoort en grondwaterstand

Voor de kaart die de kans geeft op schade door zakkingen ten gevolge van vochtonttrekking door bomen is voor verschillende combinaties van grondsoorten en grondwatertrappen de kans op schade ingeschat, zie tabel 11.

Tabel 11 Kans op schade aan wegen door vochtonttrekking door bomen bij combinaties van grondsoorten en grondwatertrappen

Grondsoort	Grondwatertrap:			
	I	II,II*	III,III*,IV	Rest
Veen	B	C	D	E
Zware zavel	A	A	B	B
Lichte klei	A	B	C	C
Zware klei	B	C	D	E

De in de tabel gegeven letters A t/m E komen overeen met de volgende kansen:

A = zeer klein, B = klein, C = matig, D = groot, E = zeer groot

In de toelichting op de kaart in aanhangsel 2 wordt dieper ingegaan op de samenstelling van tabel 11

Bij de kaart is uitgegaan van de bodemkaart 1 : 50 000 en zijn er veel meer kaarteenheden beschouwd en op hun kans op schade ingeschat. In veel gevallen zal de weg iets hoger liggen dan het omringende gebied waarvoor de grondwatertrap geldt. Ook zal in veel gevallen de aanlegdiepte van de weg onder het oude maaiveld liggen. Bij de inschatting van kans op schade is uitgegaan van een weg die 0,25 m boven het oude maaiveld is aangelegd en een constructiedikte heeft van 0,50 m. Dit houdt in dat

vanaf 0,25 m onder het oude maaiveld tot aan de diepste grondwaterstand de kans op krimp wordt ingeschat.

Peilverlaging

Een peilverlaging kan zeer grote gevolgen hebben voor de kans op schade. Behalve dat er een verandering optreedt van ondiep naar diep grondwaterpeil, met alle nadelen en gevaren van dien, is de grond die voor het eerst boven het diepste grondwater komt nog niet volledig gerijpt en heeft een groot krimmpotentieel. Bovendien kunnen diepe watervoerende sloten in de nieuwe situatie in de zomer droog komen te vallen. Gecombineerd met het feit dat de doorlatendheid van de minder gerijpte grond in het algemeen slecht is, zal er op termijn het gevaar van een deuk in het grondwater bestaan.

Wegconstructie

Door het wegdek flexibeler, sterker en beter bestand tegen herhaalde belasting te maken kan de levensduur worden verlengd en de schade worden voorkomen of beperkt. Het gebruik van warm bereid koud asfalt is hierbij een mogelijkheid. Op dit aspect wordt hier echter niet verder ingegaan en de aandacht zal zich richten op het voorkomen van de zakkingen.

Van de wegconstructie is de funderingsdiepte en de diepte van een eventueel aangebrachte grondverbetering met zand van groot belang. Immers pas vanaf die diepte hoeven de krimpende lagen te worden geteld, zodat een wat grotere funderings- of grondverbeteringsdiepte de dikte van het lagenpakket met krimpende gronden sterk kan verminderen. Een funderings- of grondverbeteringsdiepte die tot onder het laagste grondwaterpeil reikt zal beworteling onder de weg en de daardoor veroorzaakte zakkingen verhinderen. Indien deze funderings- of grondverbeteringsdiepte tot onder het grondwaterpeil in de winter en het vroege voorjaar reikt, kan worden overwogen om boomsoorten aan te planten die met hun wortels niet lange tijd onder water kunnen blijven.

Bij de profielkuilen dwars door de weg bij de meetlocaties is het opgevallen dat de neerslag op het asfalt grotendeels in de fundering of grondverbetering stroomt. Het water stagneert daar op een ondoorlatende laag, die samen met de grond in de berm een 'bak' vormt waarin het water blijft staan. Hierdoor wordt de grond onder de weg natter en zal in eerste instantie meer zwellen en later in de droge periode meer krimpen. De dynamiek van het stijgen en zakken van de weg wordt hierdoor sterker en er zal eerder schade optreden. Door op bepaalde afstanden de fundering af te laten wateren naar de sloot met een buis of drainagesleuf kan dit worden voorkomen.

Het dieper maken van de fundering of het aanbrengen van een grondverbetering biedt bij het ontwerp van een nieuwe weg de mogelijkheid om zakkingen te voorkomen.

Vooronderzoek

Indien overwogen wordt om langs een bepaalde weg bomen aan te planten, kan met een vrij eenvoudig vooronderzoek de kans op schade worden beperkt of voorkomen. In een dergelijk vooronderzoek komen de voorgaande punten aan de orde en zal bestaan uit een grondonderzoek en het vaststellen van de hydrologische situatie. Op grond daarvan kan worden beslist of het verantwoord is om bomen langs die weg te planten. Zelfs indien de kans op schade groot wordt geacht, kan het risico in veel gevallen tot

aanvaardbare proporties worden teruggebracht door de bomen nabij een watervoerende sloot te planten en/of door de juiste, minder agressieve boomsoorten te kiezen.

Grondonderzoek

Het grondonderzoek kan beginnen met het bestuderen van de schadekanskaart en de bodemkaart 1 : 50 000. Dit kan slechts ter oriëntatie zijn omdat deze kaarten niet gedetailleerd genoeg zijn om de aanwezigheid en dikte van krimpgevoelige lagen te geven. Vooral in het rivierengebied kunnen op korte afstanden grote verschillen in ondergrond voorkomen. Bovendien is kenmerkend voor wegen dat er sterke ingrepen door mensen hebben plaatsgevonden waardoor de grond nabij de weg heterogener en anders is dan de omringende grond. De weg kan ook op een oude dijk of op een zandrug liggen.

Met een eenvoudige handgrondboor kan ter plekke al snel een goede indruk worden verkregen of er sterk krimpende lagen aanwezig zijn en in hoeverre de grond is gerijpt. Aan de hand van de boring kan in veel gevallen ook de laagste en hoogste grondwaterstand worden ingeschat. Hiervoor is wel enige deskundigheid vereist. Indien tot onder de grondwaterstand wordt geboord geeft de snelheid waarmee het grondwater toestroomt een indruk van de doorlatendheid. Als de boring direct na een grondwaterstandsverhoging na een droge periode plaatsvindt, kan een te optimistische indruk van de doorlatendheid worden verkregen. Met behulp van de grondboor kan ook de diepte van de fundering en de eventuele grondverbetering worden vastgesteld. Door langs de weg op niet te grote afstanden dit grondonderzoek te herhalen kunnen in combinatie met de hydrologische situatie in het algemeen verantwoorde beslissingen worden genomen.

Hydrologische situatie

Er zal in samenwerking met de plaatselijke waterbeheerders moeten worden vastgesteld in hoeverre eventueel langs de weg aanwezige sloten het hele jaar door watervoerend zijn. Ook het peilbeheer is van belang, het opzetten van het slootpeil in de loop van een droge periode heeft een gunstige invloed op het voorkomen van een deuk in het grondwater. Bekend moet zijn of het polderpeil al is verlaagd of in de toekomst zal worden verlaagd. Verder moeten de hoogste en laagste grondwaterstanden zo goed mogelijk worden vastgesteld. Door in de nazomer na een droge periode bij grotere bomen in de omgeving van de weg te boren kan de vorming en de diepte van een deuk in het grondwater worden vastgesteld.

Met de bovenstaande aandachtspunten en aanbevelingen moet het in het algemeen mogelijk zijn om een goede afweging te maken of, waar en welke bomen langs een weg kunnen worden geplant.

Literatuur

- Atsma, J. en Y. in 't Veld, 1992. *Stadsbomen Vademecum, deel 2, Groeiplaats en aanplant*. Arnhem: Praktijkschool Arnhem. pp.527.
- Bakker, J.W., 1978. *Snelle vochtspanningsmetingen door tensiometers met elektrische drukopnemers*. Landbouwkundig tijdschrift Vol. 90: 132-137.
- 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*, pp. 223-228. Kluwer Ac. Pub.
- Bakker, J.W., 1990. *Bodemverlies door oxydatie van organische stof*. In: Handboek voor milieubeheer en bodembescherming. Deel D3410. Alphen a/d Rijn, Samson.
- Bennema J. en K. van der Meer, 1952. *De bodemkartering van Nederland, deel XII. De bodemkartering van Walcheren*. Wageningen, Stiboka.
- Biddle, P.G., 1983. *Patterns of soil drying and moisture deficit in the vicinity of trees on clay soils*. *Geotechnique* 33,2: 107-126.
- Biddle, P.G., 1987. *Trees and buildings*. *Adv.in Prac. Arb., FC- Bull.* 65: 121-132.
- Bruin, H.A.R. de, 1979. *Neerslag, open water verdamping en potentieel wateroverschot, frequentieverdelingen in het groeiseizoen*. K.N.M.I., Wetenschappelijk Rapport 79-4
- Bozozuk, M and K.N. Burn, 1960. *Vertical ground movements near elm trees*. *Geotechnique* 10,1: 19-32.
- Bronswijk, J.J.B., 1990. *Shrinkage geometry of a heavy clay soil at various stresses*. *Soil Science Society of America Journal* 54: 1500-1502.
- Bronswijk, J.J.B., 1991. *Magnitude, modeling and significance of swelling and shrinkage processes in clay soils*. Doctoral thesis. Wageningen Agricultural University, Wageningen, The Netherlands, 145 pp.
- Bronswijk, J.J.B. en J.J. Evers-Vermeer, 1987. *Krimpkaracteristieken van kleigronden in Nederland*. Wageningen, ICW-rapport 22. pp 58.
- Bronswijk, J.J.B. and J.J. Evers-Vermeer, 1990. *Shrinkage of dutch clay soil aggregates*. *Neth. J. Agric.Sc.* 38: 175-194.
- Cutler, D.F. and I.B.K. Richardson, 1989. *Tree roots and buildings*. Second Edition. Singapore, Longman, Scientific and Technical. pp. 71.
- Diepen van D., 1952. *De bodemkartering van Nederland, deel XIII. De bodemgesteldheid vn de Maaskant*. Wageningen, Stiboka.

Dobbelsteen, M. en W.C. van Krimpen, 1990. *Schade aan wegverharding door (langdurige) droogte*. Wegenbouwkundige werkdagen 1990. Publicatie CROW no.37-I, Deel I: 253-260.

Driscoll, R., 1983. *The influence of vegetation on the swelling and shrinking of clay soils in Britain*. Geotechnique 33,2: 93-105.

Heidemaatschappij, 1991. *Onderzoek naar oorzaken van scheurvorming en wegzakken fietspad langs de Vogelweg in Zuidelijk Flevoland*. Rapportnummer 635/21002 Rijkswaterstaat Directie Flevoland.

Hendriks, R.F.H., 1992. *Afbraak en mineralisatie van veen*. Wageningen, SC-DLO. Rapport 199.

Holz, G.W., 1983. *The influence of vegetation on the swelling and shrinking of clays in the United States of America*. Geotechnique 33,2: 159-163.

Janssen, F.B., 1992. *Schade en schaderisico's aan gebouwen en wegen bij polderpeilverlagingen*. Landinrichting 32,3: 25-30.

Janson, T.J.M., 1989. *Stadsbomen, van Acer tot Zelkova*. Utrecht, Bomenstichting. pp 285.

Koorevaar, P., G. Menelik and C. Dirksen, 1983. *Elements of soil physics. Developments of soil science 13*. Amsterdam. Elsevier.

Koolen, A.J. and H. Kuipers, 1983. *Agricultural soil mechanics. Advanced series in agricultural sciences 13*. Berlin. Springer-Verlag. pp 243.

Kuipers, S.F., 1960. *De bodemkartering van Nederland deel XIX, Een bijdrage tot de kennis van de bodem van Schouwen-Duiveland en Tholen naar de toestand voor 1953*. Wageningen, Stiboka.

Pons, L.J. and I.S. Zonneveld, 1965. *Soil ripening and soil classification*. ILRI publ. no. 13, Wageningen.

Rijkswaterstaat, Directie Flevoland en Heidemaatschappij Adviesbureau, 1991. *Onderzoek naar oorzaken scheurvorming en wegzakken fietspad langs de Vogelweg in Zuidelijk Flevoland*. Rapportnr. 635/21002.

Rijniersce, K., 1983. *Een model voor de simulatie van het fysische rijpingsproces van gronden in de IJsselmeerpolders*. Van Zee tot Land nr. 52. Lelystad.

Schothorst, C.J., 1978. *Het zakkingsproces bij de ontwatering van de veenweidegronden*. Landb. Tijdschr. 90,6: 167-175.

Sonneveld F., 1958, *De bodemkartering van Nederland deel XVIII. Bodemkartering en daarop afgestemde landbouwkundige onderzoekingen in het land van Heusden en*

Altena. Wageningen, Stiboka.

Soos, P. von, 1980. *Eigenschaften von Boden und Fels*. In: U. Smoltzyk (ed) *Grundbautaschenbuch*, Teil I. pag. 59-116. Verlag Wilhelm Ernst und Sohn. Berlin.

Staring Centrum, 1964/1990. *Bodemkaart van Nederland*, Schaal 1 : 50 000. Staring Centrum, Wageningen.

Staring Centrum, 1985. *Bodemkaart van Nederland*, Schaal 1 : 250 000. Staring Centrum, Wageningen.

Stiboka, 1965. *De bodemkartering van Nederland deel XVIII*. Bodemkartering en daarop afgestemde landbouwkundige onderzoeken in het land van Heusden en Altena. Wageningen, Stichting voor bodemkartering.

Stiboka, 1969. *Bodemkaart van Nederland*, schaal 1 : 50 000. Toelichting bij het kaartblad 45 West 's-Hertogenbosch. Wageningen, Stichting voor bodemkartering.

Stiboka, 1970. *Bodemkaart van Nederland*, schaal 1 : 50 000. Toelichting bij het kaartblad 31 Oost Utrecht. Wageningen, Stichting voor bodemkartering.

Stiboka, 1974. *Bodemkaart van Nederland*, schaal 1 : 50 000. Toelichting bij de kaartbladen 10 west en 10 Oost Sneek. Wageningen, Stichting voor bodemkartering.

Stiboka, 1975. *Bodemkaart van Nederland*, schaal 1 : 50 000. Toelichting bij de kaartbladen 40 West en 40 Oost Arnhem. Wageningen, Stichting voor bodemkartering.

Stiboka, 1976. *Bodemkaart van Nederland*, schaal 1 : 50 000. Toelichting bij de kaartbladen 45 Oost 's-Hertogenbosch en 46 West en 46 Oost Vierlingsbeek. Wageningen, Stichting voor bodemkartering.

Stiboka, 1981. *Bodemkaart van Nederland*, schaal 1 : 50 000. Toelichting bij de kaartbladen 6 West en Oost Leeuwarden. Wageningen, Stichting voor bodemkartering.

Stiboka, 1987. *Bodemkaart van Nederland*, schaal 1 : 50 000. Toelichting bij de kaartbladen 48 Oost-Middelburg en 49 West Bergen op Zoom. Wageningen, Stichting voor bodemkartering.

Stiboka, 1988. *Bodemkaart van Nederland*, schaal 1 : 50 000. Toelichting bij de kaartbladen 16 West en 16 Oost Steenwijk. Wageningen, Stichting voor bodemkartering.

Tschebotarioff, G.P., 1951. *Soil mechanics, foundation and earth structures*. McGraw-Hill Book Company, New York, London.

Ward, W.H., 1953. *Soil movement and weather*. Proc. 3rd. Int. Conf. Soil Mech. Zurich, 4: 477-482.

Williams, A.A.B. and J.T. Pidgeon, 1983. *Evapo-transpiration and heaving clays in South Africa*. Geotechnique 33,2: 141-148.

Niet-gepubliceerde bronnen

Bakker, J., 1977. *On yield functions in soil mechanics, soil testing methods and shear strength of soils*. I.C.W. nota 983 pp 105.

Draijer, G., 1990. *Onderzoek naar de factoren die de waterhuishouding beïnvloeden waardoor schade aan wegconstructie ontstaat*. Afstudeeropdracht cultuurtechniek. Internationale agrarische hogeschool Larenstein, afd. tuin- en landschapsinrichting, Boskoop.

Vessem, A.B. van, 1989. *Invloed van belasting op de vochthuishouding van kleigronden*. Verslag van doctoraal onderzoek uitgevoerd op het I.C.W. pp.70.

**Aanhangsel 1. Tabellen inventarisatie van de relatie tussen
scheurvorming in plattelandswegen en bodemtype**

Aanhangsel 1-a Noord Brabant - Land van Heusden en Altena

schadegeval	bodemtypen (Sonneveldt, 1958)	geschatte peilverl. 1963-1970	schade waarneming
Woudrichemseweg(N)	Eo/k1v	-0,80(m)	'69,83,84,86,88
Woudrichemseweg(Z)	og22/k,og22/k1v	-0,95	'69,83,84
Pelseweg	k2v	-1,20	'69,72,81,88-90
De Groenheuvel	Eo/k1v	-1,05	'89,90
Lage weg	k2v	-1,05	'89-90
Poortweg(Z)	sl,sw	+0,20	'69,72,75,79,80,82,83
Poortweg	sl,sl,Eo/k1v	+0,20	'69,72,75,79,80,82,83
Schenkeldijk	Ng21		'69
Midgraaf(W)	Eo/k1v	-0,65	'69,89,90
Midgraaf	Eo/k2s/k,k1s/k1vk	-0,55	'69,72,82,83,86,89,90
Midgraaf(O)	k2s	-0,50	'69,83,89,90
Broekgraaf	k1vs,k1v	-0,55	'69,75,83,88-90
Hilsestraat(W)	Eo/k	-0,65	'69
Hilsestraat	Eo/k1s	-0,95	'69
Hilsestraat(O)	Eo/k2s	-0,95	'69
Meeuwensesteeg	k	-0,95	'69
Z.Broeksedijk(W)	Ro2k	-0,90	'69
Z.Broeksedijk(O)	s1k	-0,90	'69
Hagoort	s1k,s2k	-0,90	'69,83
Matersteeg	s1k	-0,90/-0,50	'69,83
Tol(Drongelen)	sw,s1k,s2k	-0,70	'69,72,82,83,89,90
Tol(Tolhoeve)	sw,s1k	-0,30	'69,83,89,90
Wardeweg	s1k,s1ks,sw,sk,s1k	-0,30/-0,90	'69,76,78
Molensteeg	s2k,sw,s1ks	-0,65	'69
Biesheuvelweg(Z)	k	-0,70	'69,76,82-85,88-90
Broeksestraat(W)	k2s	-0,45	'69,88-90
Broeksestraat(O)	k2s	-0,70	'69,88-90
Klaverplak	k,k2s	-0,70	'69,82,84,89,90
Biesheuvelweg(N)	k	-0,50	'69,78,82,83,89,90
Achterdijk	k	-0,75/-1,35	'69,79,83,85,89,90
Parallelweg	k,k2v	-0,50	'69,78,79,83,86,88-90
Neer Andelseweg	k	-0,50/-1,25	'69,81-85
Middenweg	k,so1k,gwo1k	-1,25	'69,89,90
Dodesteeg	k	-0,55/-1,35	'69,82,84,89,90
Het Hakkevelt	k	-0,55/-0,48	'69,83,84
Veldtstraat(W)	sw,sl,s1ks	-0,58/-0,68	'69,89,90
Veldtstraat(O)	s1k,s2k	-0,78	'89,90
Aalburgsestraat	s1k		'69
Hoofdstraat	sl,sz,s2k	-1,00	'89,90
Spijk	s1k,k	-0,78/-0,98	'89,90

verklaring codering.

sz	zandige stroomruggrond met 8-15% lutum in de bovengrond.
sl	lichte stroomruggrond met 15-25% lutum in de bovengrond, homogeen of aflopend profiel.
sw	zwarte stroomruggrond met 25-40% lutum in de bovengrond bij een homogeen of aflopend profiel of 20-30% lutum in de bovengrond indien op minder dan 0,8 m een laag met 30-40% lutum voorkomt.
s2k	0,60-1,20 m stroomruggrond met <40% lutum in de bovengrond op komklei.
s1k	0,20-0,60 m stroomruggrond met <40% lutum in de bovengrond op komklei.
s1ks	0,20-0,60 m stroomruggrond met <40% lutum in de bovengrond op komklei op stroomrug.
k	meer dan 1,20m komgrond, >40% lutum, soms in de bovenste 0,2 m 30-40% lutum.
k2s	0,60-1,20 m komgrond op stroomrug.
k2v	0,60-1,20 m komgrond op veen.
k1v	0,20-0,60 m komgrond op veen.
k1vs	0,20-0,60 m komgrond op veen op stroomrug
Ro2k	0,60-1,20 m overslaggrond, met 8-15% lutum in de bovengrond, op komklei.
gwo1k	0,20-0,60 m zware gebroken overslaggrond met 25-40% lutum in de bovengrond, op komklei.
so1k	0,2-0,6 m fijnzandige slihboudenden overslaggrond met 15-40% lutum in de bovengrond op komklei.
ENg21	estuariumgronden met rivierkleigronden dieper dan 1,20 m; meer dan 25% lutum tot een diepte van 0,50-0,80 m, op een ondergrond met <18% lutum.
ENg32	estuariumgronden met rivierkleigronden dieper dan 1,20 m; lutumgehalte van 18-25% tot een diepte van 0,25-0,50 m op een ondergrond met < 18% lutum.
Eog21/s	0,50-0,80 m estuariumgrond met >25% lutum in de bovengrond op stroomrug
Eog22/k	0,50-0,80 m estuariumgrond met 18-25% lutum in de bovengrond op een ondergrond van zware klei.
Eog22/k1v	0,50-0,80 estuariumgrond met 18-25% lutum op 0,30-0,60 m komklei op veen.
Eo/k	0,20-0,50 m dik estuariumdek met 18-30% lutum op komklei.
Eo/k2s	0,20-0,50 m dik estuariumdek met 18-30% lutum op >0,60 m komklei op stroomrug.
Eo/k1s	0,20-0,50 m dik estuariumdek met 18-30% lutum op 0,30-0,60 m komklei op stroomrug.
Eo/k1v	0,20-0,50 m dik estuariumdek met 18-30% lutum op 0,30-0,60 m komklei op veen.
Eo/k1vk	0,20-0,50 m dik estuariumdek met 18-30% lutum op 0,30-0,60 m komklei op veen op komklei.

Aanhangsel 1-b Noord Brabant - Midden Maasland

schadegeval	bodemtype (Stiboka, 1969,1976)	grondwater- trap	bodemtype (Diepen, '52)
Hogeweg	Rn-15C,94C,95C	V,VI	Ro,Rot,Rt,Rtk
Marenew.(N)	Rn-15C,94C,95C,44C	III*,V,VI	Rot,Rt,Rtk,Rk
Wijlsegweg	Rn-15C,94C,95C,44C	III*,V,VI	Rot,Rt,Rtk
Liesdaalsew.	Rn15C	V,VI	Ro
Nolderweg	Rn-15C,95C	V,VI	Ro,Rot
Kesselsew.(N)	Rn-94C,95C	V,VI	Rtb,Rt,Rtk
Lankerweg	Rn95C	V,VI	Rtb,Rt
Kesselsegraaf	Rn95C	V,VI	Rtb
H.Janstr.(N)	Rn95C	V,VI	Rtb
O.parallelweg	Rn-44C,94C	III*,V*	Rok,Rtk
Tiendweg	Rn-44C,94C,95C,67C	III*,V,VI	Rtk,Rok,Rrb
Hutweg	Rn44c	III*	Rk
Middelweg	Rn44C	III*	Rk
Mareneweg(Z)	Rn44Cv	III*	Rtb,Rkv
B.Smitsweg	Rn44Cv	III*	Rk
Kesselsew.(Z)	Rv01C	III*	Rkv
H.Janstr.(Z)	Rn44C	III*	Rk

Peilverlagingen (0,7-1,0 m) hebben plaatsgevonden in de jaren 1980-1983. De schadegevallen dateren van 1982,1983,1989,1990

verklaring codering

(Stiboka 1969 en 1976)

- Rn15C Poldervaaggrond, kalkloos. Tot ca. 1,0 m lichte zavel (8-12% lutum). Tot dieper dan 1,2 m komt zware zavel voor (18-25% lutum)
- Rn44C Poldervaaggrond, kalkloos. Zeer zware klei (55-60% lutum) tot dieper dan 1,2 m voorkomend. Tussen 0,4 en 0,7 m - mv. komt een nog zwaardere kleilaag (75% lutum) voor, de zgn laklaag
- Rn44Cv Poldervaaggrond, kalkloos. Zeer zware klei (55-60% lutum) tot een diepte van 0,8 m. Tussen 0,8 en 1,2 m komt een laag venige klei of veen voor. Daar beneden bevindt zich weer zware klei.
- Rn94C Poldervaaggrond, kalkloos. Lichte klei (25-35% lutum) tot 0,3 m. Tot dieper dan 1,2 m komt zware klei (55-60% lutum) voor.
- Rn95C Poldervaaggrond, kalkloos. Lichte klei (25-35% lutum) tot dieper dan 1,2 m voorkomend. In de diepere ondergrond kan lichtere of zwaardere klei voorkomen.
- Rn67C Poldervaaggrond,kalkloos.Zavel/lichte klei (18-35% lutum) tot een diepte van 0,4-0,8 m. Tot dieper dan 1,2 m komt zware komklei (35-50% lutum) voor.
- Rv01C Drechtvaaggrond,kalkloos.Zzware klei (35-50% lutum) met plaatselijk laklagen bestaand uit zeer zware klei (75%lutum). Op een diepte 0,7-1,2 m komt een venige kleilaag voor. Op ca. 2,0 m - mv. begint de zandondergrond.

watertrap	GHG	GLG (cm - mv.)
III	<40	80-120
III*	25-40	80-120
V	<40	>120
V*	25-40	>120
VI	40-80	>120

NB. III* : droger gedeelte na verbeterde ontwatering

(Diepen, 1952)

- Ro Overslaggrond dikker dan 50 cm op komklei
- Rot Overslaggrond (<40% <16 µm) dunner dan 50 cm op stroomrug
- Rt Kalkarme stroomruggrond (<40% <16 µm). Lichte klei tot een diepte van 1,0 m daarna overgaand in rivierzand.
- Rtk Kalkarme stroomruggrond (lichte klei), dunner dan 50 cm op zware komklei (61-80% <16 µm).
- Rk Komgrond. Zeer zware kalkloze klei (>80% <16 µm)
- Rtb Stroombeddinggrond. Deze gronden zijn gelegen in verlande beddingen van oude rivierlopen. In de bovengrond zware klei en in de ondergrond zeer zware klei
- Rok Overslaggrond dunner dan 50 cm op komklei
- Rrb Stroombeddinggrond. Het gehele profiel bestaat uit zeer zware klei, plaatselijk kunnen veenlagen voorkomen als gevolg van het verlandingsproces.
- Rk(v) Komgrond dikker dan 80 cm op veen. De veenlaag komt tot een diepte van ca. 1,2 m voor
- Rkv komgrond dunner dan 80 cm op veen.

Aanhangsel 1-c Zeeland - Tholen

schadegeval	bodemtype (Stiboka, 1987)	grondwater- trap	bodemtype (Kuipers, '60)	gemoerneerd
Pierhoekseweg	Mn15A,Mn25A	VI	9,10,12	nee
Oude landweg	Mn25A	III*	2,3	ja
Randweg	Mn15A	VI	2,3,6,12	nee
Engelaarsdijk	Mn15A,gMn58C	VI	2,6,12	nee
Schoondorpseweg	kSn13A,Mn15A, Mn56Cv/Mn15C	VI V*	3,6 12(v)	nee nee
Boomdijk	Mn15A	VI	6,7,9	nee

Peilverlagingen hebben plaatsgevonden in 1965. Schadegevallen zijn waargenomen in 1989 en 1990.

verklaring codering

(Stiboka, 1987)

Mn15A	Poldervaaggrond, kalkrijk. Gehele profiel lichte tot zware zavel (8-18% lutum).
Mn25A	Poldervaaggrond, kalkrijk. Gehele profiel zware tot lichte zavel (18-25% lutum).
gMn58C	Knippige poldervaaggrond,kalkarm. Tot 0,5 m zavel (8-25% lutum). Van 0,5 to 0,7 m lichte klei (25-35% lutum). In de ondergrond zware klei (35-50% lutum). Beneden 1,3 m veen.
kSn13A	Vlakvaaggrond, kalkhoudend. Tot 0,4 m diepte lichte zavel (8-15% lutum), daaronder kleiig fijn zand.
Mn56C/Mn15C	Poldervaaggrond, kalkarm. Lichte zavel

grondwatertrap	GHG	GLG (cm - mv.)
III*	25-40	80-120
V*	25-40	>120
VI	40-80	>120

(Kuipers, 1960)

- 2 Oude kreekruggrond. In de bovengrond lichte zavel, in de ondergrond slibarm fijn zand. Deze gronden zijn droogte gevoelig.
- 3 Oude overgangsggrond. Lichte tot zware zavel. Tussen 1,0 en 2,0 m bevindt zich veen
- 6 Jonge kreekruggrond. In de bovengrond zavel en in de ondergrond slibhoudend zand
- 7 Jonge overgangsggrond. Het profiel bestaat uit zavel die bovenin zwaar is en in de diepte in zwaarte toeneemt
- 9 Schorgrond. In de bovengrond (0,3-1,0 m) meer of minder kleihoudend overgaand in minder kleihoudend, vrij fijnzandig, slibhoudend materiaal
- 10 Lage plaatgrond. In de bovengrond klei of zavel. In de ondergrond zand.
- 12 Kreekbeddinggrond. Rommelige profielen met veen, klei, zand en schelpresten.
- 12(v) Kreekbeddinggrond met veen binnen 60 cm

Aanhangsel 1-d Zeeland - Walcheren

schadegeval	bodemtype (Bennema e.a., 1952)	gemoerneerd
Trommelweg	MMb,MOa	nee
Schoutsweg	MMb,MOa,MMk	nee
Melsesweg	MOa,MMk,MMt+MMp	gedeeltelijk
Bergweg	MMb,MMk,MMt+MMp	gedeeltelijk
Zwaanweg	MMk,MMt+MMp	gedeeltelijk
Strandweg	MOa,MMt+MMp,MOt+MOp	gedeeltelijk
Kloosterweg	MMR	nee
H.Duvekotsweg	MMb,MOa,MMr	nee
Zoetendaalseweg	MMb,MOK	nee
Noordorpseweg	MOK	nee
Zandvoortseweg	MMb,MMk,MOK,MOt+MOp	gedeeltelijk
Schellechseweg	MMb,MOK,MOt+MOp	gedeeltelijk
Zanddijkseweg	MMb,MOK,MMt+MMp	gedeeltelijk
Landbouwweg	MMb,MOK,MMt+MMp	gedeeltelijk
Verbrande Hofweg	MMk,MMt+MMp,MOt+MOp	gedeeltelijk

Peilverlagingen hebben plaatsgevonden in 1960. De schadegevallen zijn waargenomen in 1988, 1989 en 1990.

verklaring codering

MMb	Kreekbeddinggrond. De bovengrond bestaat uit zavel of lichte klei (25-35% <16 µm). Het profiel wordt naar onder toe lichter en is geheel kalkrijk.
MOa	Oude kleiplaatgrond. De bovengrond is zavelig tot licht kleiig (18-35% <16 µm). Daaronder (0,3-0,5 m) bevindt zich een zware kleilaag (40-50% <16 µm) die stagnatie veroorzaakt in de waterbeweging. Onder deze kleilaag bevindt zich kalkrijke zavel (25-35% <16 µm).
MOK	Oude kreekruiggrond. Licht zavelige tot zavelige (18-35% <16 µm), kalkloze bovengrond. De ondergrond is lichtzavelig tot grofzandig. Het zand begint meestal beneden 1,0 m. De gronden zijn droogtegevoelig.
MMr	Jongere kreekruiggrond. De kalkloze tot kalkarme bovengrond varieert van zavel tot klei (20-50% <16 µm). Het profiel wordt naar beneden toe eerst iets zwaarder en geleidelijk weer lichter. De ondergrond is kalkrijk. Beneden de 1,0 m komt zand voor.
MMk	Jonge kreekruiggrond. De bovengrond varieert van licht zavelig (25-35% <16 µm) tot kleiig (35-45% <16 µm). Dieper in het profiel wordt de grond lichter (18-25% <16 µm).
MMt+	Jonge overgangs- en poelgronden. De overgangsgronden bestaan uit zavel of klei, de zwaarte neemt met de diepte toe.
MMp	De poelgronden bestaan uit kalkhoudende klei (45-60% <16 µm) op veen. De dikte van de veenlaag is afhankelijk van de mate van veenontgraving
MOt+	Oude overgangs- en poelgronden. Overgangsgronden hebben een vrij homogeen zavelig tot licht kleiig, kalkarm profiel met
MOp	zilt veen in de ondergrond, dat soms is uitgegraven (moermering). De poelgronden hebben een homogeen kalkarm kleiprofiel (40-80% <16 µm) op veen (tussen 0,5 en 1,2 m). Bij ontwatering scheuren de poelgronden sterk. Na lange regenperioden trekken de poelgronden gedeeltelijk dicht, de grond is dan ondoorlatend.

Aanhangsel 1-e Gelderland - Valburg/Heteren

Schadegeval	bodemtype (Stiboka, 1975)	grondwater- trap
Polderstraat	Rn44C	III
Uilenburgsestraat	Rn66A,Rn47C	VI,V
De Langstraat	Rn44Cv	III
De Heterensestraat	Rn44Cv	III*
De Meilanden	Rn44Cv	III*
Logtsestraat	Rn67C,Rn44C	VI,V/VI
Reethsestraat(W)	Rn67C	V/VI
Reethsestraat(O)	Rn95A	VI/VII

verklaring codering

Rn44C	Poldervaaggrond, kalkloos. De bovengrond (tot ca. 0,3 m) bestaat uit zware komklei (55-65% lutum), plaatselijk komen hierin laklagen voor. In de ondergrond (tot dieper dan 1,2 m) bevindt zich zeer zware klei (>60% lutum). In de ondergrond tussen 0,8 en 1,2 m is de klei vaak zeer humeus en ongerijpt.
Rn44Cv	Poldervaaggrond, kalkloos. Profiel als Rn44C met dit verschil dat er in de ondergrond venige klei tot kleilig veen voorkomt
Rn47C	Poldervaaggrond, kalkloos. De bovengrond (tot ca. 0,3 m) bestaat uit lichte klei. Daaronder bevindt zich een laag (0,3-0,4m dik) zware komklei (45-60% lutum). Onder de komklei bevindt zich lichte klei tot lichte zavel (20-40% lutum).
Rn66A	Poldervaaggrond, kalkhoudend. De bovengrond (tot ca. 0,4 m) bestaat uit lichte klei (25-25% lutum). Daaronder bevindt zich matig zware klei (35-45% lutum) tot een diepte van 0,7 m. Vanaf 0,7 tot 1,2 m komt een zware kleilaag (45-60% lutum) voor. Incidenteel ligt onder de zware klei weer kalkrijke lichte klei.
Rn67C	Poldervaaggrond, kalkloos. De bovengrond (tot 0,7 m) bestaat uit zware zavel of lichte klei (18-35% lutum). Hieronder bevindt zich tot ca. 1,2 m zware klei (35-45% lutum). In de ondergrond komt lichte klei, zavel of zand voor
Rn95A	Poldervaaggrond, kalkhoudend. Profiel bestaat uit lichte klei die in diepte in zwaarte afneemt. Plaatselijk kan op een diepte van 0,7 m een ca. 0,3 m dikke laag kalkloze, zware klei voorkomen.

grondwatertrap	GHG	GLG (cm - mv.)
III	<40	80-120
III*	25- 40	80-120
V	<40	>120
VI	40- 80	>120
VII	>80	>120

Aanhangsel 1-f Utrecht - Maarsen

Schadegeval	bodemtype (Stiboka, 1970)	grondwatertrap
Nieuweweg	Avp	II

De weg is gelegen op een verhoging van ca. 2 m die bestaat uit verwerkte grond (ca. 1,5 m dik) en een kleilaag (ca. 0,5 m dik). De slootpeilen van de aan beide zijden gelegen sloten verschillen 2,5 m van elkaar.

verklaring codering

Avp Madeveengrond op zand met een humuspodzol, ondieper dan 1,2 m beginnend. Tot ca. 1,2 m komt verslagen veen voor. Daaronder begint de zandgrond.

grondwatertrap	GHG	GLG (cm - mv.)
II	--	50-80

Aanhangsel 1-g Overijssel

Schadegeval	bodemtype (Stiboka, 1988)	grondwater trap-	bodemtype (Stiboka, '65)
Steenwijk: Beukers- Steenwijkkanaal	aVp,vWp,vWz,aVz	II,III	
Giethoorn: Kapelweg	aVp	III	
Blokszjl: Wetering (O)	aVc,aVp,aVz	III*	
Rouveen: Conradsweg			80,81,86

verklaring codering

(Stiboka, 1988)

aVp	Madeveengrond op zand met humuspodzol, beginnend ondieper dan 1,2 m. Het veenpakket bestaat veelal uit moeilijk herkenbaar, sterk verweerd zeggeveen. Het veen gaat via een gliedelaag over in de zandondergrond.
aVc	Madeveengrond op zeggeveen, nietzeggeveen of broekveen. De bovengrond (0-0,2 m) bestaat uit sterk veraard zandig veen. Daaronder bevindt zich tot een diepte van ca. 0,9 m een laag iets verweerd zeggeveen. Onder deze laag komt niet geoxydeerd zeggeveen voor.
aVz	Madeveengrond op zand zonder humuspodzol, beginnend ondieper dan 1,2 m. Tot 0,2 m komt weinig zand voor. Van 0,2 tot 0,5 m komt verweerd zeggeveen voor. Tussen 0,5 en 0,7 m komt iets verweerd zeggeveen voor. Hieronder bevindt zich een dunne meerbodem. Tussen 0,8 en 1,2 m begint de zand ondergrond.
vWz	Moerige eerdgrond met een moerige bovengrond op zand. De bovengrond is ca. 0,4 m dik en bestaat uit veraard veen met een wisselende hoeveelheid zandbijmenging. Plaatselijk komt veen onder de bovengrond voor die veelal uit verweerd broekveen of zeggeveen bestaat. Onder deze lagen komt een laag meerbodem voor, daaronder (0,4-0,5 m) begint de zandondergrond.
vWp	Moerige podzolgrond met een moerige bovengrond. De bovengrond is sterk veraard en kan sterk zandig zijn. De dikte van de moerige bovengrond bedraagt ca. 0,4 m, daaronder begint de zandondergrond.

grondwatertrap	GHG	GLG (cm - mv.)
II	(<40)	50- 80
III	<40	80-120
III*	25- 40	80-120

(Stiboka, 1965)

80	Veengrond op veenmosveen of zeggeveen. De bovenste 0,1 m bestaat uit veraard zwak kleiig (30-40% lutum) veen; geheel gerijpt. Tussen 0,1 en 0,5 m komt een laag sterk veraard, broekig zeggeveen voor; bijna gerijpt. Daaronder bevindt zich tot ongeveer 1,2 m half gerijpt broekig zeggeveen. Beneden 1,2 m bevindt zich zwak lemig, matig fijn zand.
81	Veenkleigrond op veenmosveen of zeggeveen. Deze gronden hebben een dek van venige en humusrijke klei, dat rust op veen of veenslik
86	Dunne klei op veengronden. Het kleidek is 0,2-0,4 m dik. De bovenste 0,1-0,2 m bestaat uit humeuze tot venige klei, roestig en zandhoudend. Daaronder bevindt zich humeuze tot humusarme, roestige klei. Dieper wordt de klei humeuzer en gaat via venige klei over in veen. De zware klei heeft een ongunstige structuur, bij opdrogen zijn de structurelementen scherp en pilaarvorming en in vochtige toestand is de klei stug en stopverfachtig.

De hier beschreven veengronden zijn gevoelig voor een juiste waterhuishouding (stiboka,'65). Er kan gemakkelijk verdroging optreden. Door grondwaterstands daling kan het veen gaan scheuren. Vooral de overgangslaag tussen kleidek en veen kan irreversibel uitdrogen.

Aanhangsel 1-h Friesland

Schadegeval	bodemtype (Stiboka, 1974, 1981, 1988)	grondwatertrap
Wonseradeel: Parrega-Hielsum	kMn48Cv	III
Tytsjerksteradeel: Symen Halbeswij	hVz,vWp	II,III
Oldelamer: Hogeweg	Vs,Vsc,hVs,Vz	II*
Scherpenzeel: Nieuweweg	Vc	II
Spanga	Vc	II

verklaring codering

kMn48Cv	Knippoldervaaggrond, kalkloos. Het profiel bestaat overwegend uit zware tot zeer zware klei (55-65% lutum). Binnen 1,2 m begint de veenondergrond.
vWp	Moerige podzolgrond met een moerige bovengrond. De ca. 0,2-0,3 m dikke, moerige bovengrond is meestal vrij goed veraard en bevat vrij veel matig fijn zand.
hVz	Koopveengrond op zand, beginnend ondieper dan 1,2 m. De 0,15-0,3 m dikke bovengrond bestaat overwegend uit matig veraarde kalkoze, venige klei of kleilig veen. Het lutumgehalte varieert van 10-30% op de grond (12-55% op de minerale delen). Tot 0,5-0,6 m diepte komt geoxideerd veen voor (veenmosveen, broekveen). Hieronder komt lemig zand voor.
Vs	Vlierveengrond op veenmosveen. De bovengrond is ca. 0,1 m dik en bestaat uit veraard kleilig veen. Hieronder ligt het veenmosveen dat tot ca. 0,6 m licht verweerd is en daaronder niet geoxydeerd.
Vsc	Vlierveengrond op veenmosveen. Het verschil met bovenstaand bodemtype is het voorkomen van een laag spalterveen in de bovengrond (0,15-0,50 m)
Vc	Vlierveengrond op zeggeveen, rietzeggeveen of broekveen. De bovengrond bestaat uit weinig tot niet veraard kleilig veen en heeft een dikte van ongeveer 0,2 m. Daaronder komt tot ca. 0,6 m iets geoxydeerd zeggeveen voor. Beneden deze laag is het veen niet geoxydeerd.
Vz	Vlierveengrond op zand zonder humuspodzol, beginnend ondieper dan 1,2 m. De bovengrond bestaat uit iets veraard kleilig veen of venige klei. Daaronder bevindt zich zeggeveen dat tot ca. 0,6 m licht veraard is en daaronder niet geoxydeerd. Op een diepte van ongeveer 0,8 m begint de zwak lemige zandndergrond.
hVs	Koopveengrond op veenmosveen. De bovengrond bestaat uit kleilig veen of venige klei met een dikt van 0,2-0,3 m. Hieronder bevindt zich veenmosveen dat tot ca. 0,8 m iets verweerd is en daaronder niet geoxydeerd.

grondwatertrap	GHG	GLG (cm - mv.)
II	-	50- 80
II*	>25	
III	<40	80-120

Aanhangsel 2. Toelichting op de 'Kaart met kans op schade aan wegen door vochtonttrekking door bomen'.

De kaart is gebaseerd op de bodemkaart van Nederland schaal 1 : 50 000. Deze nauwkeurigheid is noodzakelijk omdat de grondwatertrap, die alleen op deze schaal van de bodemkaart staat aangegeven, een zeer belangrijk gegeven is om de schadekans te bepalen.

De schadekans wordt bepaald door de krimpgevoeligheid en de dikte van de grondlagen onder de weg die zich langdurig boven het grondwater bevinden. De doorlatendheid van de grond speelt ook een rol omdat een boom zoveel water kan verdampen dat bij lage doorlatendheid het water niet snel genoeg kan toestromen, zodat onder de boom de grondwaterstand plaatselijk zakt en een 'deuk' in de grondwaterspiegel wordt getrokken. Bij een diepe fundering en/of een grondverbetering met zand worden krimpgevoelige lagen vervangen door materiaal dat niet krimpt en wordt de dikte van het pakket met krimpgevoelige lagen vanaf de onderkant van de fundering/grondverbetering tot aan de laagste grondwaterstand beperkt.

Diepte fundering of grondverbetering

Bij de schadekaart is voor alle zekerheid van een beperkte funderings- of grondverbeteringsdiepte uitgegaan. Er is aangenomen dat bij de aanleg van de weg een 0,25 m dikke bouwvoor wordt weggegraven en wordt gebruikt om de bermen met 0,25 m op te hogen. De zo ontstane 0,50 m diepe sleuf wordt opgevuld met zand en funderingsmateriaal, waarop de weg wordt aangelegd. Dit houdt in dat bij de bodemkaart 1 : 50 000 de (onder-)grond vanaf 0,25 m onder het (oude) maaiveld moet worden beschouwd. De grondwatertrap heeft betrekking op het oude maaiveld, zodat de bij die grondwatertrap horende grondwaterstanden ten opzichte van het nieuwe maaiveld (het oppervlak van de bermen) 0,25 m dieper liggen.

Grondwatertrap en bewortelingsdiepte

Van de door de grondwatertrap (Gt) bepaalde gemiddeld hoogste grondwaterstand (GHG) en gemiddeld laagste grondwaterstand (GLG) is de GLG voor de schadekanskaart het belangrijkste gegeven. Er is aangenomen dat de bewortelingsdiepte ten opzichte van het oude maaiveld 0,40 m dieper is dan de GLG. Bij de inschatting van de extra 0,40 m bewortelingsdiepte ten opzichte van de GLG is rekening gehouden met een grotere grondwaterstands daling in een droog jaar en/of de vorming van een deuk in de grondwaterspiegel (N.B. In het onderzoek was de grootste grondwaterstandsverlaging bij de diepste deuk 0,80 m). De beschouwde dikte Z van het lagenpakket is dan:

$$Z = (GLG - 0,25 + 0,40) = (GLG + 0,15) \text{ meter} \quad (1)$$

De GHG is van belang bij bomen waarvan de wortels slechts korte tijd onder het grondwaterpeil kunnen verblijven in verband met het ontstaan van zuurstofgebrek. Bij een GHG die kleiner of gelijk is aan 0,25 m zullen deze boomsoorten niet onder de fundering wortelen.

In tabel 12 zijn de gemiddeld hoogste en laagste grondwaterstand per grondwatertrap

en de dikte Z van het lagenpakket dat aan krimp onderhevig is gegeven. De grondwatertrap en de daarbij behorende GHG en GLG hebben betrekking op het 'oude' maaiveld, wat overeenkomt met het land links en rechts van de weg. Aan de hand van de dikte Z van het lagenpakket is een wegingsfactor van 1 t/m 4 toegekend die aangeeft of de bijdrage van de grondwaterstand aan de schadekans klein (factor = 1) of groot (factor = 4) is.

Tabel 12. Gemiddeld hoogste (GHG) en laagste (GLG) grondwaterstand per grondwatertrap (Gt) en de dikte Z van het lagenpakket dat aan krimp onderhevig is. Daaruit volgt een wegingsfactor voor de kans op schade.

Gt	GHG (cm-mv.)	GLG (cm-mv.)	Z (cm)	Wegingsfactor
I	-	< 50	< 65	1
II	-	50- 80	65- 95	2
II*	> 25	50- 80	65- 95	2
III	< 40	80-120	95-135	3
III*	25-40	80-120	95-135	3
IV	> 40	80-120	95-135	3
V	< 40	> 120	> 135	4
V*	25-40	> 120	> 135	4
VI	40-80	> 120	> 135	4
VII	> 80	> 160	> 175	4
VII*	> 140	> 160	> 175	4

Grondsoort

De mate waarin een grond krimpt hangt af van de hoeveelheid lutum en/of organische stof in die grond. Zwarte klei (> 50% lutum) en veen kennen de grootste krimp en zullen aanleiding geven tot de grootste zakkingsen. Kenmerkend voor veen is dat het veel grote poriën heeft waaruit de boom veel water kan trekken zonder dat het veen sterk krimpt. Bij dikke bewortelbare veenlagen die in de natte periode verzadigd raken kan de hoeveelheid water in de grote poriën het verdampingsoverschot van kleine bomen of bomen met een beperkte verdamping voor een groot deel compenseren. Het veen blijft dan in het begin van zijn krimpkarakteristiek, waarin de krimp beperkt is. Het nadeel van veen is dat als het sterk uitdroogt ook sterk kan krimpen. De consequentie is dat een dunne veenlaag die een grote kans heeft om sterk uit te drogen 'gevaarlijker' is dan een dikke veenlaag die natter blijft.

Met het afnemen van het lutumgehalte neemt het krimmpotentieel van klei af. Lichte zavel (< 17,5% lutum) zijn ongevaarlijk. Zandgronden krimpen niet. Ongerijpte grond heeft een zeer groot krimmpotentieel en geeft al snel aanleiding tot grote schade.

Net als bij de grondwatertrappen zijn aan de verschillende grondsoorten een wegingsfactor toegekend die de bijdrage aan de schadekans weergeeft. Deze wegingsfactoren zijn aangegeven in tabel 13. Door voor het veen een wegingsfactor = 4 te nemen wordt uitgegaan van de ongunstigste situatie waarbij het aandeel van het water in de grote poriën buiten beschouwing wordt gelaten. Vooral voor dikke veenlagen kan dit een te ongunstig beeld geven.

Tabel 13. Wegingsfactoren die de bijdrage van de grondsoort aan de schadekans geven

Grondsoort	Lutumgehalte (%)	Wegingsfactor
Zand/lichte zavel	0 -17,5	0
Zware zavel	17,5 -25	1
Lichte klei	25 -35	2
Zware klei	>35	4
Veen	-	4
Ongerijpte gronden	-	4

Selectiecriteria schadekaart

Bij de interpretatie van de bodemkaart 1 : 50 000 moet worden bedacht dat voor de schadekanskaart alleen het grondprofiel onder de 0,25 m funderingsdiepte van belang is. Voor de verschillende combinaties van grondsoorten in tabel 13 en de grondwatertrappen in tabel 12 is de kans op schade ingeschat door de in de tabellen gegeven wegingsfactoren met elkaar te vermenigvuldigen. De mogelijke uitkomsten van deze vermenigvuldiging zijn: 0, 1, 2, 3, 4, 6, 8, 9, 12 en 16. Er zijn zes klassen van schadekans onderscheiden die worden aangegeven met de letters O en A t/m E. Deze komen overeen met de volgende uitkomsten van de vermenigvuldiging en kansen: O=(0) = geen, A = (1, 2) = zeer klein, B = (3, 4) = klein, C = (6, 8, 9) = matig, D = (12) = groot en E = (16) = zeer groot. Op de kaart is dit in kleuren aangegeven, waarbij O = (0) = 'geen' met wit wordt weergegeven. In tabel 14 zijn voor vier hoofdgrondsoorten het resultaat van de combinaties met de grondwatertrappen gegeven. Bij de kaart zijn veel meer kaarteenheden beschouwd en op hun kans op schade ingeschat, waarbij ook rekening is gehouden met tussenlagen of diepere lagen van moerig materiaal of (on-)gerijpte zavel of klei.

Tabel 14. Kans op schade aan wegen door vochtonttrekking door bomen bij combinaties van grondsoorten en grondwatertrappen

Grondsoort	Grondwatertrap:			
	I	II,II*	III,III*,IV	Rest
Veen	B	C	D	E
Zware zavel	A	A	B	B
Lichte klei	A	B	C	C
Zware klei	B	C	D	E

Beperkingen

Een belangrijke beperking van de nauwkeurigheid van de kaart is dat de karteringen van de grondwatertrappen voor een deel verouderd zijn. In het algemeen zal het grondwaterpeil zijn verlaagd zodat de kans op schade aan wegen bij aanplant van bomen in de berm toeneemt. De gebruiker van de kaart moet hiermee terdege rekening houden en moet bekend zijn met eventuele peilverlagingen.

Een tweede beperking houdt verband met het feit dat er geen bodemkaart van Zuidelijk Flevoland, schaal 1 : 50 000 bestaat. In dit geval is uitgeweken naar de bodemkaart van Nederland, schaal 1 : 250 000, wat als nadeel heeft dat op deze kaart de grondwatertrappen bijeengevoegd zijn tot globalere eenheden. Dit heeft tot gevolg dat de schadekanskaart van Zuidelijk Flevoland ook globaler en minder nauwkeurig is.