

Onderzoek naar grondstabilisatie met ongebluste kalk en met een alternatief materiaal van bouw- en slooppuin

Lies Libbrecht

Academiejaar 2009–2010

*Scriptie voorgelegd tot het behalen van de graad
van Master in de Geologie*

Promotor: Prof. Dr. E. Van Ranst

Co-promotor: Y. Brijse

Leescommissie: Prof. Dr. W. Cornelis, Ir. G. Di Emidio

VOORWOORD

Bij aanvang van deze thesis wil ik graag alle mensen even bedanken die mij geholpen hebben bij het realiseren van deze thesis.

Eerst en vooral zou ik graag mijn promotor prof. dr. Eric Van Ranst willen bedanken, voor de vrije keuze in een thesisonderwerp en voor zijn tijd, aandacht en kritische evaluatie tijdens het verloop van dit onderzoek.

Ik zou ook Yvan Brijse van de firma MGP (Mineralen, granulaten en Poeders) hartelijk willen bedanken voor het aanbrengen van dit onderzoek en zijn hulp bij de uitvoering en evaluatie ervan.

Een speciale dankjewel voor Nicole Vindevogel en Veerle Vandenhende, die altijd klaarstonden voor hulp en advies bij het uitvoeren van de vele analyses in het bodemkundig laboratorium .

Graag zou ik ook Gemina di Emidio willen bedanken om het laboratorium van de Afdeling Geotechniek open te stellen voor de uitvoering van een reeks testen, en voor haar begeleiding en advies bij deze testen.

Tenslotte gaat mijn bijzondere dank uit naar mijn ouders voor hun onvoorwaardelijke steun en vertrouwen en om mij de kans te geven deze opleiding tot een goed einde te brengen.

INHOUDSTABEL

VOORWOORD.....	2
INHOUDSTABEL.....	3
SAMENVATTING.....	5
1. INLEIDING.....	6
1.1. Situering.....	6
1.2. Doelstelling.....	8
2. LITERATUURSTUDIE	10
2.1. Structuur van kleimineralen en zwelling van bodems	10
2.1.1. Opbouw van een kleimineraal	10
2.1.2. Zwelling in bodems.....	15
2.2. Grondstabilisatie.....	17
2.2.1. Grondstabilisatie met kalk.....	18
2.2.2. Grondstabilisatie met cement.....	21
2.2.3. Grondstabilisatie met vliegass.....	22
2.3. Samenstelling van beton.....	23
3. MATERIALEN EN METHODES.....	24
3.1. Materialen.....	24
3.1.1. Boomse klei.....	24
3.1.2. Ieperse klei.....	25
3.1.3. Leem.....	25
3.1.4. Aanvullende materialen.....	26
3.1.5. Ongebluste kalk.....	27
3.1.6. Betonmeel.....	28
3.1.7. Overzicht stalen.....	29
3.2. Methodes.....	31
3.2.1. Monstervoorbereiding	31
3.2.2. Chemische analyses.....	31
3.2.2.1. Zuurtegraad (pH).....	31
3.2.2.2. Kationenuitwisselingscapaciteit (CEC).....	32
3.2.2.3. Water-oplosbare zouten.....	32
3.2.2.4. Water-dispergeerbare klei.....	33
3.2.2.5. Watergehalte.....	33
3.2.2.6. Totale chemische samenstelling.....	34
3.2.2.7. Totaal specifiek oppervlak (TSO).....	34
3.2.3. Mineralogische analyses.....	35
3.2.3.1. X-stralendiffractie (XRD).....	35
3.2.4. Fysische analyses.....	36
3.2.4.1. Korrelgroottesamenstelling.....	36
3.2.4.2. Zweltest.....	36
3.2.4.3. Atterbergse grenzen.....	38

4. RESULTATEN.....	40
4.1. Korrelgroottesamenstelling.....	40
4.2. Zuurtegraad (pH).....	41
4.3. Kationuitwisselingscapaciteit (CEC).....	42
4.4. Waterdispergeerbare klei (WDK).....	43
4.5. Totaal specifiek oppervlak (TSO).....	45
4.6. Water-oplosbare zouten.....	45
4.7. X-stralendiffractie van onbehandelde stalen en mengsels.....	48
4.7.1. Boomse klei.....	48
4.7.2. Ieperse klei.....	50
4.7.3. Leem.....	51
4.7.4. Loess.....	53
4.7.5. Aanvullende materialen.....	54
4.8. Zweltest.....	58
4.9. Aantasting mineralen.....	61
4.10. Samenstelling betonmeel.....	62
5. DISCUSSIE.....	63
5.1. Veranderingen in chemische eigenschappen.....	63
5.2. Veranderingen in mineralogische eigenschappen.....	69
5.3. Veranderingen in fysische eigenschappen.....	71
5.4. Puzzolane reacties.....	74
6. CONCLUSIE.....	76
7. REFERENTIES.....	78
LIJST VAN FIGUREN.....	82
LIJST VAN TABELLEN.....	83
BIJLAGEN.....	84

SAMENVATTING

In de algemene trend van duurzame ontwikkeling wordt in de bouwsector zoveel mogelijk bouw- en sloopafval gerecycleerd. De deelstroom betonpuin van het bouw- en sloopafval wordt praktisch volledig hergebruikt in de wegenbouw en in de aanmaak van nieuw beton. Voor de fractie kleiner dan 30 μm (betonmeel) is men nog op zoek naar een mogelijke functie.

Dit onderzoek gaat na of het betonmeel kan aangewend worden als een materiaal voor het stabiliseren van gronden. Grondstabilisatie zorgt voor een verbetering in chemische en fysische eigenschappen van een grond (e.g., korrelgroottesamenstelling, plasticiteit en zwellingscapaciteit) zodat deze grond voor geotechnische en constructie-doeleinden kan toegepast worden. Een veel gebruikte methode is de toevoeging van ongebluste kalk aan de bodem. In dit onderzoek wordt nagegaan of een betonmeel gelijkwaardige stabiliserende effect heeft op een grond als ongebluste kalk. Van verschillende soorten gronden werd een mengsel met 5% ongebluste kalk en een mengsel met 20% betonmeel gemaakt.

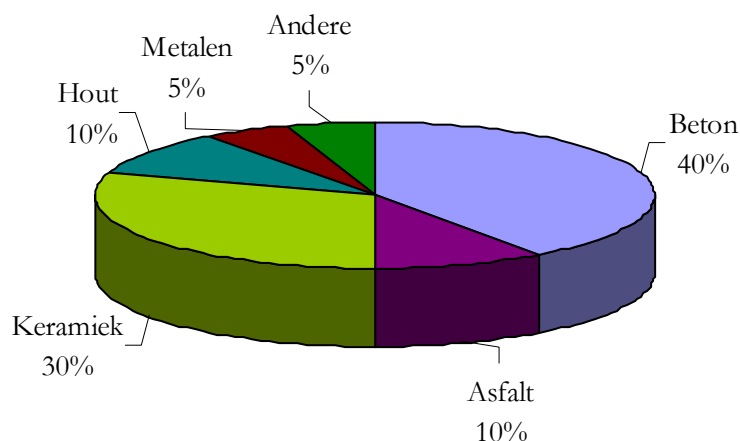
Met een aantal chemische en fysische analyses zijn de belangrijke reacties van grondstabilisatie (kationuitwisseling, flocculatie en aggregaatvorming en puzzolane reacties) onderzocht. Bij toevoeging van betonmeel werd wel degelijk voor een aantal eigenschappen een positief resultaat behaald, zoals ionuitwisseling en flocculatie, maar dit geldt niet voor alle eigenschappen. Na behandeling met betonmeel wordt nog steeds een aanzienlijke zwelling van de grond waargenomen. Uit dit onderzoek zal blijken dat betonmeel niet gebruikt kan worden als een volwaardig alternatief voor ongebluste kalk bij grondstabilisatie.

1. INLEIDING

1.1. Situering

De algemene trend van duurzame ontwikkeling oefent een druk uit op de industrie voor het creëren van een duurzame en milieuvriendelijke manier van werken. Van nature uit is de bouwsector geen milieuvriendelijke sector. Het maakt gebruik van natuurlijke grondstoffen waarvan de voorraad eindig is en produceert enorme hoeveelheden bouw- en sloopafval. De impact van de bouwsector op het milieu kan verlaagd worden door recyclage van het gecreëerde bouw- en sloopafval tot bouwgrondstoffen. Hierdoor daalt de vraag naar natuurlijke grondstoffen, verkleint de nood aan stortplaatsen en verminderen de energie- en transportkosten (De Schepper, 2009).

Dit onderzoek werd uitgevoerd in opdracht van het bedrijf MGP (Mineralen, Granulaten en Poeders). Het is een bedrijf dat bouw- en sloopafval (BSA) verwerkt met als doel herbruikbare bouwgrondstoffen te creëren. BSA is de verzamelnaam voor alle afvalstoffen afkomstig van enerzijds bouwen, renoveren en slopen van gebouwen en constructies en anderzijds van de aanleg en afbraak van wegen. BSA bestaat voor 90% uit een steenachtige fractie waaronder beton-, metselwerk- en asfaltpuin. De resterende 10% is een heterogeen mengsel bestaande uit hout, gips, papier/karton, metalen, en kunststoffen (OVAM, 1995; Oikonomou, 2005). Figuur 1 geeft een benaderende samenstelling weer van bouw- en sloopafval. Keramiek bevat onder andere metselwerk, tegels en dakpannen.



Figuur 1: Samenstelling bouw- en sloopafval (een benadering) (Oikonomou, 2005)

Het gemengde afval wordt gesorteerd en gescheiden in verschillende zuivere deelstromen. Eén van de deelstromen omvat het beton- en metselwerkpuin dat verder door kleurscheiding wordt gesplitst in betonpuin en baksteenpuin. Beide soorten puin worden verpulverd naar verschillende fracties en verder verwerkt tot grondstoffen voor de bouwsector. Andere recycleerbare deelstromen worden ook verwerkt tot herbruikbare materialen. Het residu of restfractie wordt verwijderd door te storten of te verbranden.

Het betonpuin wordt voornamelijk verwerkt tot puingranulaten en wordt ingezet als ongebonden materiaal bij funderingen in de wegenbouw. Betonpuin wordt ook vermalen tot een fijne fractie dat kan gebruikt worden als grondstof voor de productie van nieuw beton. MGP is op zoek naar een mogelijke toepassing voor het betonpuin met een fractie kleiner dan 30 μm waar momenteel nog geen toepassingen voor zijn. Deze fractie wordt betonmeel genoemd en MGP heeft een vermoeden dat deze stof als alternatief materiaal bij grondstabilisatie kan gebruikt worden.

In dit onderzoek wordt de toevoeging van betonmeel aan een grond geanalyseerd en er wordt nagegaan of het materiaal een stabiliserende werking heeft. Een vergelijkende studie wordt uitgevoerd tussen betonmeel en ongebluste kalk, een goed gekend en veel gebruikt materiaal bij grondstabilisatie.

Grondstabilisatie is een proces waarbij de eigenschappen van een grond worden verbeterd, zodat de grond kan gebruikt worden voor geotechnische en constructie doeleinden. Een onderscheid wordt gemaakt in mechanische en chemische stabilisatie. Mechanische stabilisatie houdt in dat enkel aanpassingen in fysische eigenschappen gebeuren zoals bijvoorbeeld veranderingen in de schikking van de grondpartikels door middel van compactie (Purushothama Raj, 1999). Chemische stabilisatie omvat het vermengen van een grond met materialen als kalk (ongebliste of gebluste), cement, vliegashuis, staal- en hoogovenslak en andere chemische elementen waardoor verschillende chemische en fysische eigenschappen van een grond aangepast worden. De doeleinden van grondstabilisatie zijn een toename van de sterkte van een grond, een daling van de samendrukbaarheid, een verbetering van de zwel- en krimpeigenschappen en een toename van de slijtvastheid (Bergado et al., 1996).

1.2. Doelstelling

De doelstelling van deze thesis is nagaan of betonpuin, afkomstig van bouw- en sloopafval, met een fractie kleiner dan 30 μm , genoemd betonmeel als grondstabilisator kan benuttigd worden. Eén van de materialen die frequent ter stabilisatie van een grond wordt gebruikt is ongebluste kalk. Er wordt een vergelijkende studie uitgevoerd tussen betonmeel en ongebluste kalk.

In de literatuurstudie wordt eerst onderzocht welke chemische, fysische en mineralogische eigenschappen van een grond er voor zorgen dat deze niet geschikt is voor gebruik in geotechnische en constructiedoeleinden. Grondstabilisatie wordt toegepast om de zwellingscapaciteit van een grond te verminderen, de permeabiliteit te verlagen en de sterkte en het draagvermogen te verhogen. Allereerst wordt kennis genomen van de opbouw van kleimineralen omdat deze een bepalende rol spelen in de zwellingscapaciteit van een grond. Ook de achterliggende reacties en krachten die een bodem in staat stellen om te zwellen, worden toegelicht zodanig dat verder in het onderzoek geanalyseerd kan worden welke invloed toevoeging van ongebluste kalk en betonmeel heeft op de zwelling van een grond.

Een tweede element van de literatuurstudie omvat de bespreking van verschillende methodes die toegepast worden bij grondstabilisatie. De belangrijkste materialen die vandaag gebruikt worden voor het stabiliseren van een grond zijn kalk, cement en vliegashoudend beton. Van deze materialen wordt uiteengezet wat de reacties zijn die zullen plaatsvinden in de grond na toevoeging van het product. Ook de samenstelling en het oorsprong van de materialen wordt kort toegelicht.

Tenslotte wordt de algemene samenstelling van beton beschreven zodanig dat geweten is waaruit het betonmeel is opgebouwd. Dit is belangrijk voor interpretatie van reacties die plaatsvinden tussen grond en betonmeel.

Voor de uitvoering van de analyses selecteren we een aantal gronden waarop de werking van ongebluste kalk duidelijk merkbaar is en die goed is te vergelijken met de effecten dat betonmeel heeft op deze soorten grond. De geselecteerde gronden zijn: Boomse klei, Ieperse klei, loess, een plastische leemgrond en een fijnkorrelig baggerspecie.

Chemisch en mineralogisch onderzoek van betonmeel zal uitgevoerd worden zodat dat de opbouw van het materiaal gekend is en de reacties die ontstaan door de vermenging van het betonmeel met de verschillende gronden kunnen geïnterpreteerd worden. De parameters die een indicatie zijn voor de stabiliteit van een grond zoals de kationuitwisselingscapaciteit, hoeveelheid

water-oplosbare klei en de graad van zwellings worden bepaald van zowel onbehandelde als behandelde stalen (mengsel van grond met ongebluste kalk of betonmeel) met behulp van verschillende analysemethoden.

Door interpretatie van de analyseresultaten kan afgeleid worden welke reacties en veranderingen in chemische, mineralogische en fysische eigenschappen plaatsvinden bij vermenging van grond met ongebluste kalk en met betonmeel. Een vergelijking tussen de resultaten van stabilisatie met ongebluste kalk en met betonmeel zal uitwijzen of betonmeel als alternatief voor ongebluste kalk kan aangewend worden bij grondstabilisatie.

2. LITERATUURSTUDIE

Bij grondstabilisatie wordt getracht de plasticiteit van een grond te verminderen en ook de zwellingscapaciteit te reduceren. Zwelling is een proces waarbij het volume van een grond toeneemt door opname van water. Hoe meer water kan opgenomen worden door een grond, hoe groter de zwelling van deze grond zal zijn, met een minder goede stabiliteit als gevolg. Zwelling komt vooral voor bij gronden waarin 2:1 kleimineralen met een zwellende eigenschap, smectieten genaamd, aanwezig zijn.

In deze literatuurstudie volgt eerst een beschrijving over de opbouw van kleimineralen en een uiteenzetting over welke eigenschappen aan de oorsprong liggen van zwelling in een grond. Daarna volgt een bespreking van de verschillende methodes van grondstabilisatie en de reacties in de grond die hierbij plaatsvinden

2.1. Structuur van kleimineralen en zwelling van bodems

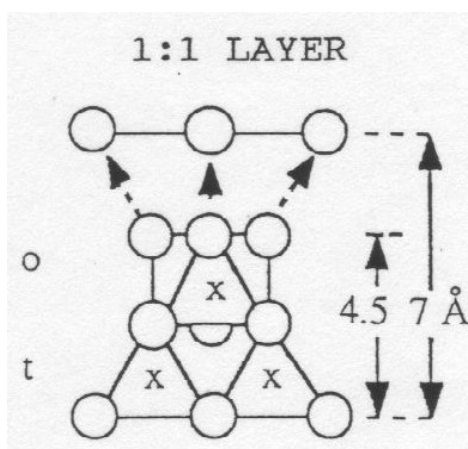
2.1.1. Opbouw van een kleimineraal

Kleimineralen zijn fyllosilicaten die opgebouwd zijn uit een opeenvolging van tetraëdrisch (T) en/of octaëdrische lagen (O). In deze lagen zijn atomen respectievelijk tetraëdrisch of octaëdrisch geordend.

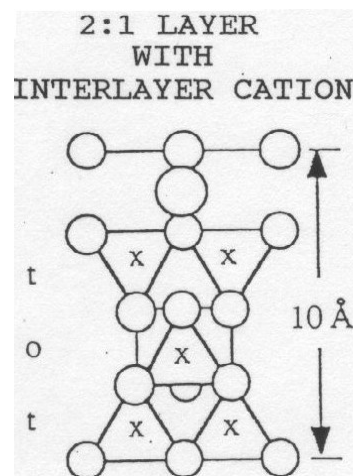
In fyllosilicaten zijn de tetraëdrische lagen gevormd uit ringen met een hexagonaal patroon door het verbinden van 6 tetraëders. Een tetraëder bestaat uit een siliciumatoom omringd met vier zuurstofatomen, waarvan drie in één vlak liggen en gedeeld worden met aangrenzende tetraëders. Een octaëdrische laag daarentegen is opgebouwd uit 2 vlakken van zuurstofatomen of hydroxylionen, die een even grote radius hebben als zuurstofatomen, geordend in de dichtste bolstapeling. Dit resulteert in een octaëdrische opening tussen de 2 vlakken, die ingenomen wordt door kationen zoals Al^{3+} , Mg^{2+} , Fe^{2+} , Fe^{3+} en soms Li^{+} .

Een kleimineraal kan di- of trioctaëdrisch zijn. Dit wordt bepaald door de kation/anion – verhouding van de octaëdrische laag. Afhankelijk van de valentie van het kation kan de laag op 2 manieren gevuld worden. Een trioctaëdrische laag is gekenmerkt door divalente kationen die zich op 3 van iedere 3 sites bevinden. Bij een dioctaëdrische laag zijn de openingen opgevuld met trivalente kationen en worden 2 van iedere 3 sites gevuld zodat de laag elektrisch neutraal is.

De classificatie van kleimineralen is vooral gebaseerd op de opeenvolging van T en O-lagen in het mineraal. Een 1:1 kleimineraal is gekenmerkt door een opeenvolging van een T- en een O-vlak die aan elkaar gebonden zijn. In een tetraëdrisch vlak is er in elke tetraëder één van de 4 zuurstofatomen waarvan de lading niet gebalanceerd is. Dit zuurstofatoom (het apicale zuurstofatoom) neemt de plaats in van een hydroxyl in het onderste vlak van een octaëdrisch vlak en vormt zo de 1:1 laag (T-O) (Fig. 2). Kaolinite is een mineraal opgebouwd uit T-O structuren. Bij een 2:1 kleimineraal, zoals mica en smectiet, worden 2 octaëdrische vlakken gebonden aan een tetraëdrisch vlak (T-O-T) (Fig. 3).



Figuur 2: T-O structuur van een kleimineraal (Van Ranst, 2006)



Figuur 3: T-O-T structuur van een kleimineraal (Van Ranst, 2006)

In zowel tetraëdrische als octaëdrische lagen kan isomorfe substitutie optreden. De meest gebruikelijke substituties zijn Al^{3+} die de plaats inneemt van Si^{4+} in een tetraëdrische laag en Mg^{2+} die Al^{3+} vervangt in de octaëdrische laag. Die substitutie heeft als gevolg dat de lagen negatief geladen zijn. Deze negatieve lading wordt geneutraliseerd door ofwel kationen, al dan niet gehydrateerd, in de interlamellaire ruimte, ofwel door de positieve lading van de interlamellaire hydroxyl laag. Met 'interlamellaire ruimte' wordt de zone bedoeld tussen 2 lagen met een T-O of T-O-T – structuur.

Het type kleimineraal aanwezig in een grond speelt een bepalende rol in de zwellingscapaciteit van een grond. De opbouw van de mineralen bepaalt of het mineraal in staat is om water in de interlamellaire ruimte op te nemen. Kaolinite, mica en smectiet zijn de belangrijkste drie kleimineralen die aanwezig zijn in de materialen gebruikt bij dit onderzoek.

Zoals eerder vermeld is kaolinit een dioctaëdrische 1:1 fyllosilicaat en heeft het een heel stabiele structuur. Het mineraal wijkt weinig af van zijn ideale formule: $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$. Kaolinit is elektrisch neutraal omdat weinig tot geen isomorfe substitutie plaats vindt waardoor geen kationen in de interlamellaire zone komen te liggen. De weinige Al^{3+} - Si^{4+} substitutie die plaatsvindt wordt opgevangen aan de plaatranden door daar kationen aan te trekken. Kaolinit bevat aan de plaatranden een variabele lading die afhankelijk is van de activiteit van H^+ en OH^- (i.e. de pH) in de omgevende oplossing. Een lage pH geeft een positieve lading, een hoge pH een negatieve lading.

Mica's zijn een groep 2:1 kleimineralen met een variabele chemische samenstelling door de vele verschillende substituties die kunnen plaatsvinden in de structuur. De negatieve lading ten gevolge van de substituties wordt grotendeels gecompenseerd in de interlamellaire ruimte door kalium. Het bevindt zich in 2 hexagonale openingen, die elk behoren tot één van de 2 tetraëdrisch lagen waartussen de interlamellaire zone ligt. Het kalium is niet uitwisselbaar aangezien het niet gehydrateerd is.

De derde belangrijke groep kleimineralen zijn smectieten, die ook een 2:1 mineraalstructuur bevatten. De negatieve lading in smectieten is vooral afkomstig van de isomorfe substitutie, die voorkomt in zowel de tetraëdrische (Al^{3+} vervangen door Si^{4+}) als octaëdrische (Mg^{2+} vervangen door Al^{3+}) lagen. Het ladingstekort gecreëerd door substitutie is bij smectieten ongeveer 0,50 tot 1,20. Dat is in vergelijking met mica's (ladingstekort 2,0) vrij laag, de bindingen met kationen in de interlamellaire ruimte zijn bijgevolg veel zwakker ten opzichte van de bindingen bij mica's. De kationen in de interlamellaire ruimte worden bij smectieten dus vlotter uitgewisseld. Door deze zwakke bindingen gaat de interlamellaire ruimte uitzetten bij een grotere opname van water..

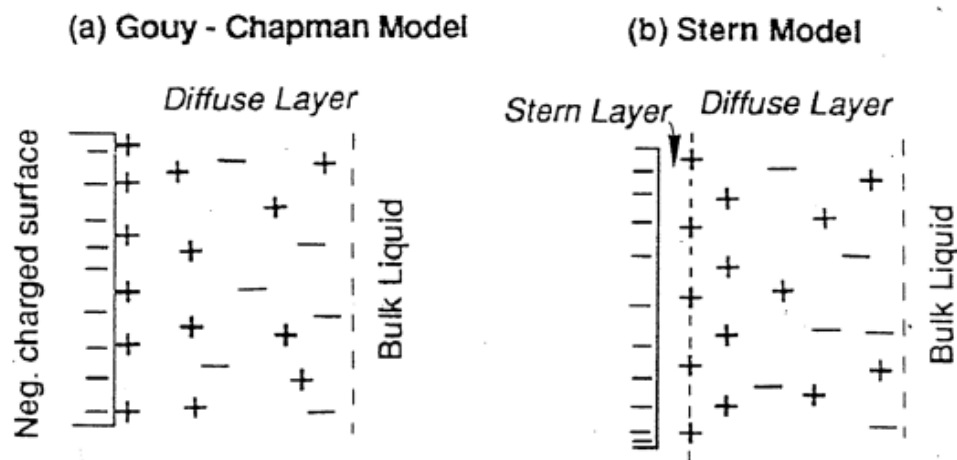
Elektrische dubbellaag

Het concept van de elektrische dubbellaag is opgesteld voor de verdeling van ionen aan het colloïdale oppervlak te kunnen voorstellen en kan aangegeven worden dat die ionen een invloed hebben op de zwelling van een grond.

Onafhankelijk van de herkomst van een oppervlaktelading op een colloïdaal oppervlak eist elektrische neutraliteit dat een even groot aandeel van de tegenovergestelde lading aanwezig is in

de vloeibare fase nabij de geladen oppervlaktes. Kleimineralen bezitten meestal een negatieve lading op hun oppervlak en deze wordt gebalanceerd door kationen zoals bijvoorbeeld Na^+ , Ca^{2+} en Mg^{2+} . Naast de elektrostatische aantrekking naar de negatieve oppervlaktelading worden de kationen ook ten gevolge van diffusiekrachten aangetrokken naar de bulkoplossing. Een ‘atmosferische’ distributie van de kationen in de ‘diffuse laag’ vindt plaats waar de concentratie van kationen stijgt in de richting van het colloïdale oppervlak, vertrekkende van de concentratie gelijk aan die van de omgevende oplossing en gaande naar een hogere concentratie die afhankelijk is van de omvang van de oppervlaktelading (Sparks, 1998). Samen vormen de oppervlaktelading en de diffuse laag de elektrische dubbellaag (EDL). De kationen vastgehouden door de dubbellaag worden uitwisselbaar genoemd omdat met deze kationen een snelle uitwisseling met de kationen van de bulkoplossing kan plaatsvinden.

Verskillende mathematische modellen zijn opgesteld om de distributie van de ionen in de elektrische dubbellaag te voorspellen. De twee meest gebruikte zijn (1) het Gouy-Chapman model (Fig. 4a) en (2) het Stern-Grahame model (Fig. 4b).



Figuur 4: Verdeling van elektrische ladingen aan een negatief geladen oppervlak volgens (a) het Gouy-Chapman model en (b) het Stern model

In het Gouy-Chapman model is de lading aan het oppervlak van een deeltje afhankelijk van het potentiaalverschil aanwezig in de EDL (ψ_0), de elektrolyetconcentratie (n), de valentie van de ionen met tegengestelde lading (z), de diëlektrische constante van het medium (ϵ) en de temperatuur. De Gouy-Chapman vergelijking is:

$$\sigma = \left(\frac{2n\varepsilon RT}{\pi} \right)^{1/2} \sinh \left(\frac{zF}{2RT} \psi_0 \right) \quad (a)$$

met:	σ	=	Dichtheid oppervlaktelading	(C/m ²)
	n	=	Elektrolietconcentratie	(kmol/m ³)
	ε	=	Dielektrische constante van het medium	(C ² /Jm)
	R	=	Gas constante	(8,314x10 ³ J/(kmol x K))
	T	=	Absolute temperatuur	(298 K)
	z	=	Valentie van ionen met tegengestelde lading	
	F	=	Faraday constante	(9,6487 x 10 ⁷ C/(kmol))
	ψ_0	=	Oppervlakte potentiaal	(volt)

De dikte van de elektrische dubbellaag wordt volgens de Gouy-Chapman theorie gegeven door (Sharma en Reddy, 2004):

$$t = \sqrt{\frac{\varepsilon_0 D k T}{2 n_0 e^2 v^2}} \quad (b)$$

met:	t	=	Dikte elektrische dubbellaag	$\overset{o}{\text{\AA}}$
	D	=	Diëlektrische constante van het medium (poriënwater)	
	ε_0	=	Permittiviteit van vacuum	(8,8542 x 10 ⁻¹² C ² /Jm)
	k	=	Boltzmann constante	(1,38 x 10 ⁻²³ J/K)
	T	=	Absolute temperatuur	(K)
	n_0	=	Elektrolietconcentratie	(ionen/m ³)
	e	=	Elementaire elektrische lading	(1.062 x 10 ⁻¹⁹ C)
	v	=	Valentie van kationen	(volt)

Deze vergelijking toont dat de dikte van de dubbellaag groter wordt wanneer de D en/of T stijgt en kleiner wordt als n_0 en/of v stijgt. Wanneer een stijging plaatsvindt in de diffuse dubbellaag van de hoeveelheid ionen en meer bepaald van ionen met een hogere valentie, zoals bijvoorbeeld

Ca^{2+} , zal volgens de formule (b) de diffuse dubbellaag afnemen in dikte. Een kleinere diffuse dubbellaag aanwezig op het oppervlak van de kleimineralen geeft een kleinere zwelling van een grond tot gevolg.

Aangezien verschillende belangrijke factoren zoals geadsorbeerd water, grootte ionen en pH niet in deze formule zijn ingebracht, is de formule meer een hulpmiddel in het begrijpen van het effect van verschillende systeemvariabelen op de dikte van de dubbellaag dan effectief met de formule een dikte van de EDL te kunnen berekenen.

Het Gouy-Chapman model heeft zijn limieten omdat geen rekening gehouden wordt met de reële grootte van de ionen die de oppervlaktelading tegenwerken en in dit model worden aanzien als puntladingen. Het Stern-Grahame model houdt hier wel rekening mee en neemt aan dat de ionen maar tot op een bepaalde afstand het geladen oppervlak kunnen benaderen. Er is dus een ionvrije, neutrale zone, de Stern-laag genaamd, aanwezig tussen het oppervlak en eerste laag geadsorbeerde tegenwerkende ionen (Fig. 4b).

2.1.2. Zwelling in bodems

Zwelling van een grond is afhankelijk van zowel het type kleimineraal als ook de interacties die plaatsvinden tussen de kleipartikels. Deze wisselwerking tussen kleipartikels in de bodem, en dan voornamelijk hun reactie tegenover veranderingen in het watergehalte, is afhankelijk van het evenwicht tussen aantrekkings- en afstotingskrachten aan hun oppervlak. Tussen kleimineralen komen 2 soorten aantrekkingskrachten voor: (1) elektrostatische krachten tussen het negatief geladen oppervlak en de positieve geladen kationen en (2) Van der Waals' krachten tussen de individuele atomen in twee partikels. De oorsprong van aantrekkingskrachten, uitgezonderd het effect van het uitwisselbare kation, varieert weinig met veranderingen in de oplossing. De afstotingskrachten, ontstaan ten gevolge van de interactie van de diffuse lagen, zijn wel afhankelijk van de samenstelling en concentratie van de omgevende oplossing en de dichtheid van de oppervlaktelading van de klei. De dikte van de diffuse laag wordt bepaald door de valentie van de tegenwerkende ionen en de concentratie van de bulkoplossing. In bodems kunnen partikels zich zodanig dicht bij elkaar bevinden dat de diffuse lagen van de partikels interageren. De balans tussen de aantrekkings- en afstotingskracht bepaald de nettokracht. Als deze kracht aantrekkend is, blijven de partikels dicht bij elkaar en worden ze omschreven als geflocculeerd. De nettokracht kan ook afstotend zijn, de deeltjes liggen dan verder uit elkaar en zijn gedeflocculeerd (Van Ranst, 2006).

Kleien zwellen vaak niet verder dan een maximale gehydrateerde toestand. De uitzetting van de interlamellaire laag wordt initieel aangedreven door de energie van de hydratatie van uitwisselbare kationen. Het hydratatie-water doet dienst als een 'diëlektrische link' naar het geladen oppervlak en brengt de lading van het kation over naar het O-atoom in het oppervlak (model van H-binding). De zwelling die gepaard gaat met de adsorptie van de eerste twee tot drie laagjes water in de interlamellaire zone wordt benoemd als 'kristallijne zwelling' (Norrish, 1954). Het eenvoudige model van H-binding is geschikt voor de verklaring van de hydratatie waarbij de interlamellaire ruimte niet groter wordt dan 1 nm, wat overeen komt met 4 laagjes water (Van Ranst, 2006).

Zwelling die partikels meer dan 1nm uit elkaar drijft, verder dan de zogenaamde 'kristallijne zwelling' wordt door beschouwd als osmotisch zwelling (Norrish, 1954). Door een verschil in elektrolytenconcentratie van de bulkoplossing en van de zone tussen de twee partikels (interlamellaire ruimte) ontstaat er een osmotische druk tussen de twee platen. Deze druk zorgt er voor dat de interlamellaire ruimte verder uitzet, de twee platen verder van elkaar verwijderd worden en meer water wordt opgenomen in de interlamellaire ruimte. Deze osmotische zwelling komt voornamelijk voor bij smectieten (dit zijn 2:1 kleimineralen met een zwellende eigenschap). Hierdoor bezit een grond waarin een grote hoeveelheid smectieten aanwezig is, een grote zwellingscapaciteit. Dit zorgt voor een grote instabiliteit van een grond.

2.2. Grondstabilisatie

Een grond moet aan bepaalde technische voorwaarden in sterkte, stabiliteit, permeabiliteit en duurzaamheid voldoen vooraleer die als basis kan gebruikt worden voor geotechnische en constructiedoeleinden kan gebruikt worden. De gronden, die in hun natuurlijke gesteldheid deze eigenschappen bevatten, zijn steeds minder voorradig waardoor de prijs van deze hoge kwaliteitsmaterialen toeneemt (Sariosseiri & Muhunthan, 2009). Dit heeft als gevolg dat men bij constructieprojecten men alsmaar meer is aangewezen op het gebruik van lokaal aanwezige gronden die echter niet altijd de geschikte eigenschappen bezitten. Door middel van grondstabilisatie is een verbetering in sterkte, stabiliteit, permeabiliteit en duurzaamheid van gronden mogelijk. De ontwikkeling van een hogere sterkte en stijfheid wordt bereikt door:

(1) een vermindering in poriënvolume door middel van bindingen tussen partikels en aggregaten, (2) het onderhouden van flocculering, en (3) zwellen te reduceren. De permeabiliteit wordt gewijzigd door een verandering in poriëngrootte en – distributie (Bell, 1993).

Grondstabilisatie is een procedure die één of meerdere eigenschappen van de grond verbetert. De twee meest voorkomende vormen van grondstabilisatie zijn mechanische en chemische stabilisatie. De doeltreffendheid van stabilisatie hangt onder meer af van de graad van uniformiteit die bereikt wordt bij het mengen van verschillende materialen.

Een veel voorkomende toepassing is het vermengen van natuurlijke grofkorrelige en fijnkorrelige gronden waarbij een mengsel bekomen wordt dat voldoende interne wrijving en cohesie ontwikkelt en hierdoor een materiaal vormt dat hanteerbaar is gedurende de plaatsing van de grond, maar verder ook stabiel blijft. Dit proces van het gelijkmatig verdelen van grof- en fijnkorrelige bodems is een vorm van mechanische grondstabilisatie. Andere mechanische processen waarbij de schikking van de partikels verandert, zoals bijvoorbeeld compactie, behoren ook tot mechanische grondstabilisatie (Purushothama Raj, 1999).

Chemische stabilisatie is een andere vorm van grondstabilisatie waarbij er materialen zoals kalk (ongeblust of geblust), cement, vliegashuis, staal- en hoogovenslak, asfalt, polymeren, vezels of andere chemische elementen en combinaties van deze verschillende materialen (Bell, 1993; Bergado et al., 1996; Wild et al., 1998; Purushothama Raj, 1999; Sariosseiri & Muhunthan, 2009) aan de grond worden toegevoegd. De doeleinden van chemische stabilisatie zijn toename van de sterkte van een grond, daling van de samendrukbaarheid, verbetering van de zwel- en

krimpeigenschappen en toename van de slijtvastheid (Bergado et al., 1996). Kalk en cement zijn de additieven die het meest aangewend worden voor chemische grondstabilisatie.

2.2.1. Grondstabilisatie met kalk

De term kalk bij grondstabilisatie verwijst zowel naar (1) ongebluste kalk (calcium oxide – CaO), als (2) gebluste (of gehydrateerde) kalk (calciumhydroxide – Ca(OH)_2) en (3) kalk'slurry' (een suspensie van gehydrateerde kalk in water). Kalk voor grondstabilisatie mag niet verward worden met inerte carbonaten zoals kalksteen, 'agstone' of 'aglime', die gebruikt worden in agriculturele toepassingen (Mallela et al., 2004).

Volgens Purushothama Raj (1999) zijn er 5 basistypes van kalk:

Hoogwaardig-calcium ongebluste kalk:	:	CaO
Dolomitisch ongebluste kalk	:	$\text{CaO} + \text{MgO}$
Hoogwaardig-calcium gehydrateerde kalk	:	Ca(OH)_2
Normaal gehydrateerde dolomitische kalk	:	$\text{Ca(OH)}_2 + \text{MgO}$
Druk-gehydrateerde dolomitische kalk	:	$\text{Ca(OH)}_2 + \text{Mg(OH)}_2$

In dit onderzoek wordt enkel gebruik gemaakt van ongebluste kalk bestaande uit hoogwaardige calcium, i.e. ongebluste kalk dat maximaal 5% magnesiumoxide bevat.

Ongebluste kalk ontstaat wanneer kalksteen (calciumcarbonaat – CaCO_3) verpulverd en gebrand wordt tot temperaturen van 900°C . Bij hogere temperaturen in de oven, zal de reactiviteit en dus ook de kwaliteit van de ongebluste kalk dalen (Moropoulou et al., 2001). De hoge temperaturen verdrijven koolstofdioxide (CO_2) waardoor calciumoxide of ongebluste kalk (CaO) overblijft. Dit proces vindt plaats in een horizontale of verticale kalkoven ('kiln'). Gebluste of gehydrateerde kalk wordt gevormd wanneer calciumoxide reageert met water. Dit hydratatieproces kan gebeuren direct na productie in de fabriek of door toevoeging van water op de constructiesite.

De toename in sterkte bij een met kalk behandelde grond is het gevolg van de reacties die hebben plaatsgevonden: dehydratatie van de grond, ionuitwisseling, flocculatie en puzzolane reacties (Bell, 1996; Bergado et al., 1996; Eren & Filiz, 2009). Sherwood (1993) verdeelde deze processen onder in twee groepen: modificatie en stabilisatie. Modificatie vindt plaats in de eerste 24 uur na toevoeging en vermenging van de kalk en klei. Dit kan oplopen tot 72 uur, afhankelijk van het type kleimineralen dat aanwezig is. Modificatie omvat de processen dehydratatie, ionuitwisseling en flocculatie. Stabilisatie omvat de puzzolane reacties en verwijst naar de processen die veel

trager verlopen en een langdurige toename in sterkte veroorzaken door progressieve kristallisatie van gehydrateerde calciumsilicaten (CSH)¹ en calcium-aluminaten (CAH)¹ die gevormd worden na reactie van kalk met silicium en aluminium, afkomstig van de klei.

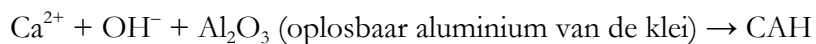
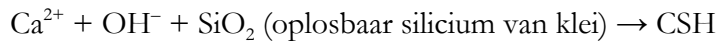
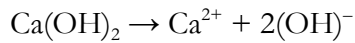
Een grote hoeveelheid warmte komt vrij wanneer een kleigrond wordt gemengd met ongebluste kalk. Dit is het gevolg van de hydratatie van de ongebluste kalk met het poriënwater aanwezig in de grond. De ontwikkelde warmte veroorzaakt op zijn beurt evaporatie van een hoeveelheid poriënwater. Hoe langer de hydratatie van ongebluste kalk doorgaat en hoe meer de temperatuur stijgt, des te groter de vermindering in poriënwater. Ongebluste kalk wordt vooral gebruikt bij kleien met een hoog natuurlijk watergehalte waarbij een daling in poriënwater beoogd wordt (Bergado et al., 1996).

De volgorde in de uitwisselbaarheid van kationen, uitgaande van gelijke concentratie, wordt gegeven door de volgende serie: $\text{Na}^+ < \text{K}^+ < \text{Mg}^{2+} < \text{Ca}^{2+}$ (Grim, 1953). In het algemeen vervangen kationen met een hogere valentie deze met een lagere valentie en worden kleinere kationen vervangen door grotere kationen met eenzelfde valentie. In de aanwezigheid van voldoende water, dissocieert calciumhydroxide (gevormd door hydratatie van CaO of rechtstreeks aangewend als stabilisator) in Ca^{2+} en OH^- . De toevoeging van voldoende hoeveelheden kalk veroorzaakt een overmaat aan Ca^{2+} -ionen die de minder sterk gebonden metallische kationen in het uitwisselingscomplex van de klei vervangen. De kationuitwisseling verandert de dichtheid van de elektrische lading rond een kleipartikel waardoor de dikte van de diffuse dubbellaag verkleint. Hierdoor wordt het mogelijk voor kleipartikels om elkaar dichter te benaderen, elkaar meer aan te trekken en om te flocculeren. Volgens Sherwood (1993) is het vooral flocculatie dat verantwoordelijk is voor de verandering van de technische eigenschappen van kleigronden behandeld met kalk. Door te flocculeren en het vormen van aggregaten ontstaat een verandering in de structuur van de klei. De plasticiteit (de Atterbergse grenzen) wordt gereduceerd, alsook het potentieel om te zwellen, wat allebei meetbaar is in een daling van de Plasticiteit Index (PI). De textuur van de grond verandert van een samenhangende naar een korrelige textuur (Rogers & Glendinning, 1996).

Wanneer een beduidende hoeveelheid kalk aan een grond wordt toegevoegd stijgt de pH van het mengsel tot ongeveer 12,4; de pH van water verzadigd met kalk. Voor natuurlijke gronden is dit een aanzienlijke stijging. De zeer alkalische omgeving zorgt voor een toename in de

¹ In de afkorting CSH en CAH staat C voor CaO, S voor SiO₂, A voor Al₂O₃ en H voor H₂O (Moore (1987)).

oplosbaarheid van silicium en aluminium. Kalk, water, silicium en aluminium reageren samen in de grond tot de cementerende producten: gehydrateerde calciumsilicaten (CSH) en gehydrateerde calcium-aluminaten (CAH). Dit wordt een puzzolane reactie genoemd die volgens Sherwood (1993) behoort tot de stabilisatie. Aangezien een grote variëteit aan hydraten door deze reacties kan gevormd worden, stelde Moore (1987) de puzzolane reactie vereenvoudigd voor als volgt:



met: C = CaO; S = SiO₂; A = Al₂O₃

Zo lang voldoende calcium, afkomstig van de kalk, aanwezig is in het systeem en de pH hoog genoeg blijft om de oplosbaarheid van silicium en aluminium te behouden, houdt de puzzolane reactie in de grond aan (Little, 1987). De puzzolane producten (CSH en CAH) dragen bij tot de flocculatie door middel van het verbinden van naburige partikels en wanneer stolling optreedt stijgt de sterkte en stijfheid van de grond. Puzzolane reacties zijn tijdsafhankelijk. De toename van sterkte en stijfheid van een grond gebeurt dan ook gradueel over een langere periode van maanden tot jaren.

De stijging in sterkte wordt beïnvloed door de hoeveelheid gevormde cementerende producten (CSH, CAH) en bijgevolg door de toegevoegde hoeveelheid kalk. Bell (1996) stelt dat de optimale hoeveelheid kalk nodig om een grond te stabiliseren tussen de 1 en 6 % ligt. Andere auteurs (Ingles, 1987; Eren et al., 2009) geven aan dat dit tussen 2 en 8 % kalk (in gewicht) ligt. In dit onderzoek werden de gronden vermengd met 5% ongebluste kalk.

De voordelige effecten van grondstabilisatie met kalk zijn vooral een gevolg van de reacties tussen de fijne fracties van de grond en de kalk. Fijnkorrelige gronden zoals kleien en siltige kleien reageren dat ook het best op een behandeling met kalk. Een minimaal gehalte aan klei van 10 % volgens Mallela et al. (2004) en 20% volgens Bergado et al. (1996), en een Plasticiteits Index (PI) van niet minder dan 10 % zijn aanbevolen. Voor niet-plastische gronden met een lage PI, gronden die niet voldoende reageren met kalk, is een extra bron aan silicium- en aluminium nodig. Een ‘puzzolan’ wordt aan de kalk toegevoegd en kan bestaan uit vliegas en staalslak (NLA, 2004). ASTM International (American Society for Testing and Materials) definieert een ‘puzzolan’ als een silicium- en aluminiumrijk materiaal dat op zichzelf weinig tot geen cementerende

(bindende) waarde heeft, maar dat verdeelt als fijn poeder en in aanwezigheid van vochtigheid, chemisch zal reageren bij gemiddelde temperaturen met calciumhydroxide en producten zal vormen met cementerende eigenschappen. Het silicium en aluminium, aanwezig in de 'puzzolan', reageren met de kalk en vormen een sterke cementmatrix waardoor de grond gestabiliseerd wordt. Mengsels met een correcte verhouding van kalk en 'puzzolan' kunnen bijna elk soort grond aanpassen en stabiliseren, maar werkt vooral voor gronden met een lage tot middelmatige plasticiteit.

2.2.2. Grondstabilisatie met cement

Naast kalk is cement, en dan vooral Portlandcement, een veel gebruikt product ter stabilisatie van een grond. Cement is opgebouwd uit oxides van calcium, silicium, aluminium en ijzer (MacPhee et al., 1998; Bogue, 2003; Eren et al., 2009).

Het productieproces van cement vangt aan met het vermalen en vermengen van kalksteen (rijk aan CaCO_3) met klei (rijk aan silicium, aluminium en ijzeroxides). Beide basismaterialen worden ontgonnen en vermalen naar een fractie klein genoeg om de materialen goed te kunnen vermengen. Als de verhouding aan mineralen (calcium-, silicium-, aluminium-, en ijzeroxides) niet overeenkomt met de gewenste samenstelling, worden mineralen onder de vorm van bauxiet, ijzererts of gerecycleerde materialen zoals vliegashuis en staalslak aan het mengsel toegevoegd. Vervolgens wordt het mengsel in een roterende oven gebracht en verhit tot op een temperatuur van 1400°C tot 1500°C . Het materiaal dat in de oven is gevormd, wordt benoemd als klinker en bestaat uit afgeronde nodules met een diameter tussen 1 en 25mm. Er bestaan 2 verschillende methodes om klinker te produceren: (1) de droge methode en (2) de natte methode. Bij de laatstgenoemde methode wordt het mengsel als een slurry (nat mengsel) in een roterende oven gebracht, waarbij de slurry moet opgewarmd worden naar 1450°C . De droge methode brengt het mengsel droog in de oven, nadat het eerst tot een temperatuur van 900°C werd verwarmd. De natte methode wordt niet vaak meer toegepast aangezien bij deze techniek veel meer energie wordt verbruikt. Nadat de klinker is afgekoeld, wordt het verpulverd tot een fijn poeder en wordt gips (CaSO_4) er aan toegevoegd. De bijmenging van gips vertraagt de zettingsnelheid van het cement waar water wordt aan toegevoegd (Frigione, 2002).

Cement is een heterogeen materiaal dat is opgebouwd uit calcium-silicaten (C_3S en C_2S), calcium-aluminaat (C_3A) en calcium-aluminium-ferriet² (C_4AF). Deze vier componenten hydrateren

² F staat voor Fe_2O_3 (Mohamed & Antia, 1998). De betekenis voor C, S, A en H werden gegeven in voetnoot 1.

wanneer ze in aanraking komen met het poriënwater van een grond en vormen calcium-silicaten-hydraten (CSH), calcium-aluminium-hydraten (CAH) en calciumhydroxide ($\text{Ca}(\text{OH})_2$). De producten CSH en CAH bevatten een cementerende eigenschap en vormen het bindmiddel tussen de gronddeeltjes waardoor de sterkte van een grond toeneemt. Door het vrijkomen van $\text{Ca}(\text{OH})_2$ tijdens de hydratatie van cement en de aanwezigheid van silicium en aluminium in een kleiige grond vindt een puzzolane reactie plaats. Deze reactie vormt CSH en draagt dus bij aan het stabiliserende effect van een grondbehandeling met cement. Ten gevolge van de cementerende materialen en de vorming van calciumhydroxide, kan cement gebruikt worden voor de stabilisatie van zowel grof- als fijnkorrelige bodems. De voordelen van grondstabilisatie met cement zijn reeds door verschillende auteurs vastgelegd (Abboud, 1973; Mitchell, 1976; Uddin et al., 1997; Lo and Wardani, 2002; Lorenzo and Bergado, 2004). De permeabiliteit van een met cement gestabiliseerd materiaal daalt aanzienlijk (Little, 2000; Sariosseiri & Muhunthan, 2009), alsook de zwellingscapaciteit (Nelson & Miller, 1992; Coduto, 1999).

Hoogovenslak cement is een mengeling van Portland cement en hoogovenslak en vertoont een gelijklopend stabiliserend mechanisme met het Portland cement. Hoogovenslak is een bijproduct van het produceren van ijzer en staal en bestaat voornamelijk uit silicaten, aluminiumsilicaten en calcium-aluminiumsilicaten. Hoogovenslak reageert niet met water maar kan onder alkalische omstandigheden puzzolane reacties veroorzaken. De aanwezige SiO_2 en Al_2O_3 in de slak komen vrij door hoge hoeveelheden Ca^{2+} en SO_4^{2-} afkomstig van de cement, waarvan de hydratatieproducten worden gevormd die de langdurige sterkte van een grond verbeterd (Van Impe et al., 2007).

2.2.3. Grondstabilisatie met vliegas

Vliegas is een restproduct dat vrijkomt bij de verbranding van steenkool en zich in de gevormde uitlaatgassen bevindt. Het wordt opgevangen in de schoorstenen van een thermische elektriciteitscentrale waar steenkool verbrand wordt. Vliegas is een heel fijn poeder, fijner dan Portland cement en kalk, en bestaat voornamelijk uit oxides van silicium, aluminium, calcium en ijzer. Op basis van zijn samenstelling wordt vliegas onderverdeeld in twee klassen: Klasse C en klasse F. Klasse C vliegas bevat een hoog gehalte aan kalk, bezit hierdoor bindende eigenschappen en kan dus als stabiliserend product alleen gebruikt worden (Guney et al., 2005). Klasse F daarentegen bezit een lage tot gemiddeld gehalte aan kalk en wordt samen gebruikt met een bindmiddel zoals cement of kalk.

Onmiddellijke reacties door toevoeging van vliegas aan de grond zijn, door de kalk (CaO) reeds aanwezig in het vliegas, flocculatie en agglomeratie van kleipartikels ten gevolge van ionuitwisselingen aan het colloïdale oppervlak (Nicholson & Kashyap, 1993). Na verloop van tijd vindt ten gevolge van de chemische afbraak en hydratatie van silicium en aluminium, de puzzolane reactie plaats waarbij cementerende materialen wordt geproduceerd. Deze reactie blijft doorgaan zolang voldoende ‘puzzolans’ (= bron van silicium en aluminium met een hoog specifiek oppervlak) aanwezig zijn. Grondstabilisatie met vliegas wordt toegepast in bodems waar niet voldoende silicium en aluminium aanwezig is voor stabilisatie met kalk. Vliegas voorziet de bodem van de nodige extra hoeveelheid silicium en aluminium om de puzzolane reactie te kunnen laten doorgaan en een voldoende stabilisatie van een grond te kunnen bereiken (Nicholson & Kashyap, 1993).

2.3. Samenstelling van beton

In dit onderzoek wordt het stabiliserend effect van grondbehandeling met betonmeel, afkomstig uit bouw- en sloopafval, geanalyseerd. Beton is algemeen opgebouwd uit cement, aggregaten en water. De cementpasta, gevormd door de vermenging van cement (doorgaans Portland cement) en water, bedekt de oppervlakken van de grof- en fijnkorrelige aggregaten (bestaande uit zand, grind en/of verbrijzelde stenen). Soms worden ook andere cementerende materialen zoals vliegas, staal- en hoogovenslak, aan beton toegevoegd. Door hydratatie verhardt de cementpasta en bindt het de aggregaten samen tot een hard materiaal, gekend als beton (EBN, 1993).

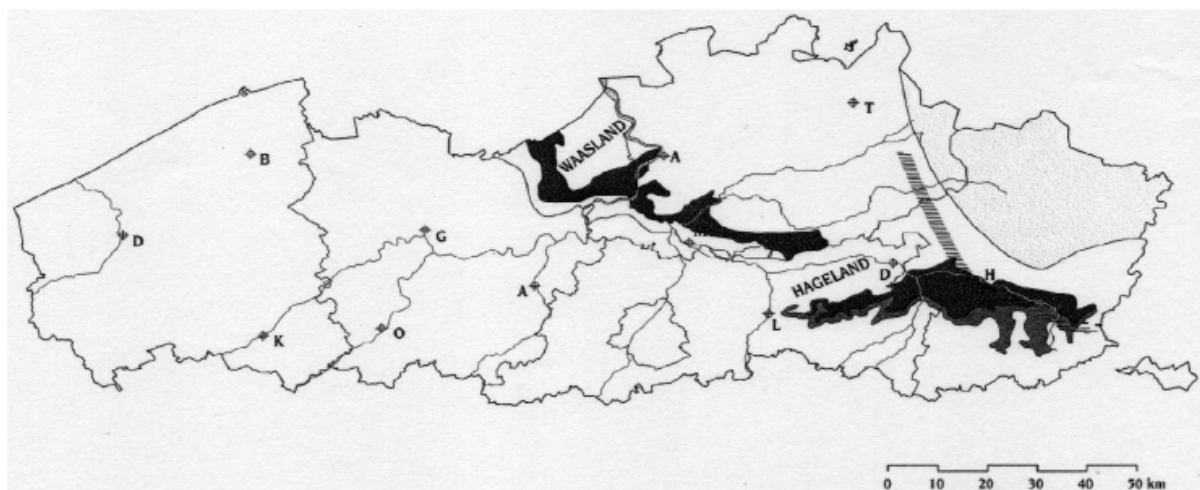
Bij grondstabilisatie is de mate waarin veranderingen in de grond plaatsvinden afhankelijk van de samenstelling van de materialen die worden toegevoegd. De samenstelling van beton is afhankelijk van de verhoudingen van grind, zand, cement en water in het mengsel. Deze verhoudingen van de basismaterialen kunnen tussen verschillende soorten beton vrij veel variëren. Hier moet rekening mee gehouden worden bij gebruik van betonmeel want als het van verschillende soorten beton afkomstig is, zou de samenstelling van het betonmeel kunnen wijzigen en bijgevolg ook de eventuele reacties tussen grond en betonmeel.

3. MATERIALEN EN METHODES

3.1. Materialen

3.1.1. Boomse klei

De Boomse klei of de Formatie van Boom komt voor in het noorden van België, enerzijds ten noorden van de rivieren Durme, Rupel en Dijle en anderzijds ten noorden van een lijn Leuven-Tongeren. Langs de zuidrand van deze gebieden dagzoomt de klei of komt hij voor onder een Quartair dek. Verder naar het noorden wordt de klei steeds dieper begraven onder voornamelijk Neogene sedimenten (Fig. 5) (Gullentops & Wouters, 1996).



Figuur 5: Dagzoomgebied van de Boomse klei (Gullentops & Wouters, 1996)

De Boomse klei is een grijsachtige siltige klei of kleiige silt die typisch sterk pyriethoudend is en in de meeste siltige horizonten glauconiet bevat. Deze formatie werd afgezet op een open mariene shelf op een diepte van 50 meter, onder een subtropisch klimaat en heeft een Midden-Oligocene ouderdom (Rupeliaan). Typerend voor de Boomse klei is een gebande structuur, veroorzaakt door ritmische veranderingen in silt- en kleigehalte, plantaardig organisch materiaal en het kalkgehalte (Vandenberghe, 1978).

Volgens Gullentops & Wouters (1996) schommelt het kleigehalte van de Boomse klei tussen 25% en 60%, en bestaat het uit 70 tot 80% zwellende kleimineralen, 10 tot 20% illiet en gemiddeld 10% kaoliniet. Het siltige kleipakket bevat maximaal 3% zandfractie ($>63 \mu\text{m}$). Het zandige siltgedeelte wordt gekenmerkt door een kleigehalte kleiner dan 30% en een zandgehalte groter

dan 30%. Het hoge gehalte aan zwellende kleien zorgt voor een grote plasticiteit en een groot specifiek oppervlak.

De klei die wordt gebruikt bij dit onderzoek komt uit een bulkmonster van een groeve waar Boomse klei ontgonnen wordt, wat betekent dat dit een mengsel is van de hele sequentie in deze groeve. De genomen stalen mogen dus als homogeen worden beschouwd wat de verdeling van de korrelgrootte, organisch materiaal- en carbonaatgehalte betreft.

3.1.2. Ieperse klei

De Ieperse klei behoort tot de kleien afgezet tijdens het Ieperiaan. Men treft deze kleien vooral aan in het westen en het centrum van België. De Ieperse klei is een homogene, fijsiltige klei die wordt afgezet in een rustig open-shelf milieu (De Batist & Verniers, 2006).

Algemeen worden de Ieperiaan-kleien gekenmerkt door een hoog gehalte aan zwellende kleimineralen (ongeveer 45% smectiet), een laag gehalte aan illiet (glimmerachtig kleimineraal) en het haast volledig ontbreken van kaolinit en van carbonaten. Het gehalte aan organisch koolstof bedraagt minder dan 0,5% wat duidt op een zuurstofarm afzettingsmilieu. Ook hier zorgt het hoge gehalte aan zwellende kleimineralen voor een grote plasticiteit en een groot specifiek oppervlak (Gullentops & Wouters, 1996).

De kleipakketten van het Ieperiaan kunnen een dicht netwerk van breuken bevatten ten gevolge van kleitektoniek (De Batist & Verniers, 2005). Deze breuken lopen niet door naar boven of onderliggende lagen en blijven dus beperkt tot de kleilaag zelf.

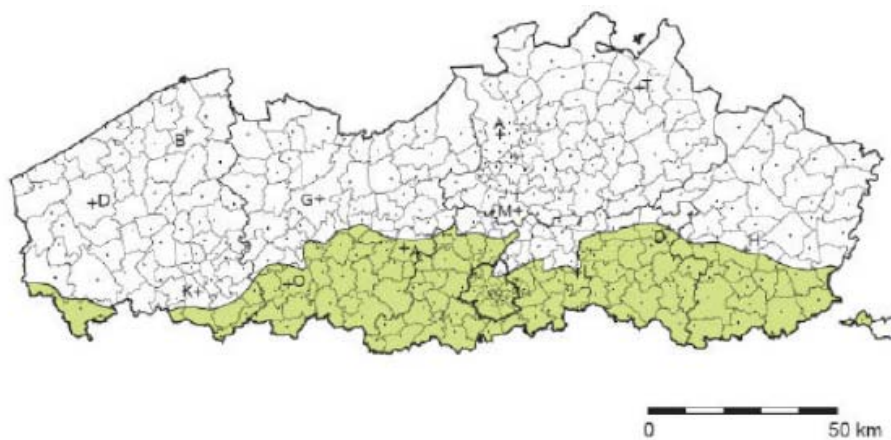
Ook hier werd gebruik gemaakt van een bulkmonster uit een groeve waar Ieperse kleien worden ontgonnen.

3.1.3. Leem

In België is leem voornamelijk te vinden in de Leemstreek (Fig. 6). Dit materiaal wordt gevormd uit loess, wat een quartair, eolisch en meestal kalkhoudend sediment is. Loess bestaat voor ca. 85% uit de fractie 2-50 μm , waarin de subfractie 20-50 μm sterk overheerst. Het vormt de oppervlaktelaag (max. 20 m dik) van de Leemstreek (Van Ranst, 1981) en bestaat voornamelijk uit kwarts en kleimineralen.

De samenstelling van Europese loess komt overeen met de gemiddelde samenstelling van alle gesteenten van Scandinavië waar de gletsjers vandaan kwamen. Tijdens de IJstijden werden gesteenten door de gletsjers onder hoge druk tot meel gemalen. Het gesteentemeel werd vervolgens door de smeltwaters voor de gletsjers uitgespreid en na opdroging met de wind mee naar het zuiden verwaaid (Gullentops & Wouters).

Tijdens de Interglacialen verweerde de afgezette loess tot een leem waarvan het kleigehalte kan oplopen tot een 30% en ontkalking optreedt in de bovenste 2 meter. De kleimineralen aanwezig in leem zijn vooral illiet, met kleine hoeveelheden kaolinet en smectiet (Gullentops & Wouters, 1996).



Figuur 6: Verbreiding van leem in Vlaanderen

Het staal G1 is afkomstig van een bodemhorizont van een profielput in de Steenputvallei in het Zoniënbos bij Ukkel. Het is genomen in profiel nr. 4 uit het doctoraal proefschrift van Van Ranst (Van Ranst, 1981), op een diepte van 50 tot 80 cm (B22t-horizont) en bestaat uit een siltige leem.

3.1.4. Aanvullende materialen

Drie aanvullende materialen werden geselecteerd uit gronden/slib aanwezig in het grond- en slibreinigingscentrum Envisan, te Hulsdonk.

- Staal H : Fijnkorrelige baggerspecie met een relatief hoog gehalte aan organisch materiaal
- Staal I : Plastische leemgrond
- Staal J : Zandige leemgrond

Van de geselecteerde stalen werd de korrelgroottesamenstelling (Tabel 1) en de totale scheikundige samenstelling (Tabel 2) bepaald te Envisan.

Tabel 1: Korrelgroottesamenstelling van de stalen H, I en J afkomstig van het grondreinigingscentrum Envisan

Staal	Klei	Silt				Zand
	< 2 µm	2 - 10 µm	10 - 20 µm	20 - 63 µm	2 - 63 µm	63 - 2000µm
H	23,3	15,7	7,7	20,5	43,9	31,9
I	13,9	5,9	6,1	19,4	31,4	48,7
J	22,4	5,3	4,3	21,0	30,6	46,0

De totaalanalyse werd uitgevoerd met X-stralenfluorescentie (XRF). Van staal H kon geen glasparel gemaakt worden voor de XRF-analyse, wellicht door een te hoog gehalte aan organisch materiaal.

Tabel 2: Totale scheikundige samenstelling van stalen H,I en J afkomstig van grondreinigingscentrum Envisan

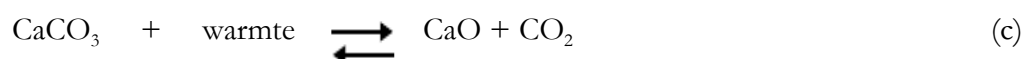
Staal	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	MnO	gloeiverlies
H	n	n	n	n	n	n	n	n	n	10,1
I	80,37	5,16	2,47	0,43	3,35	0,58	0,66	1,57	0,04	5,37
J	82,94	4,91	4,24	0,45	1,39	0,42	0,52	1,32	0,14	3,68

n : niet bepaald

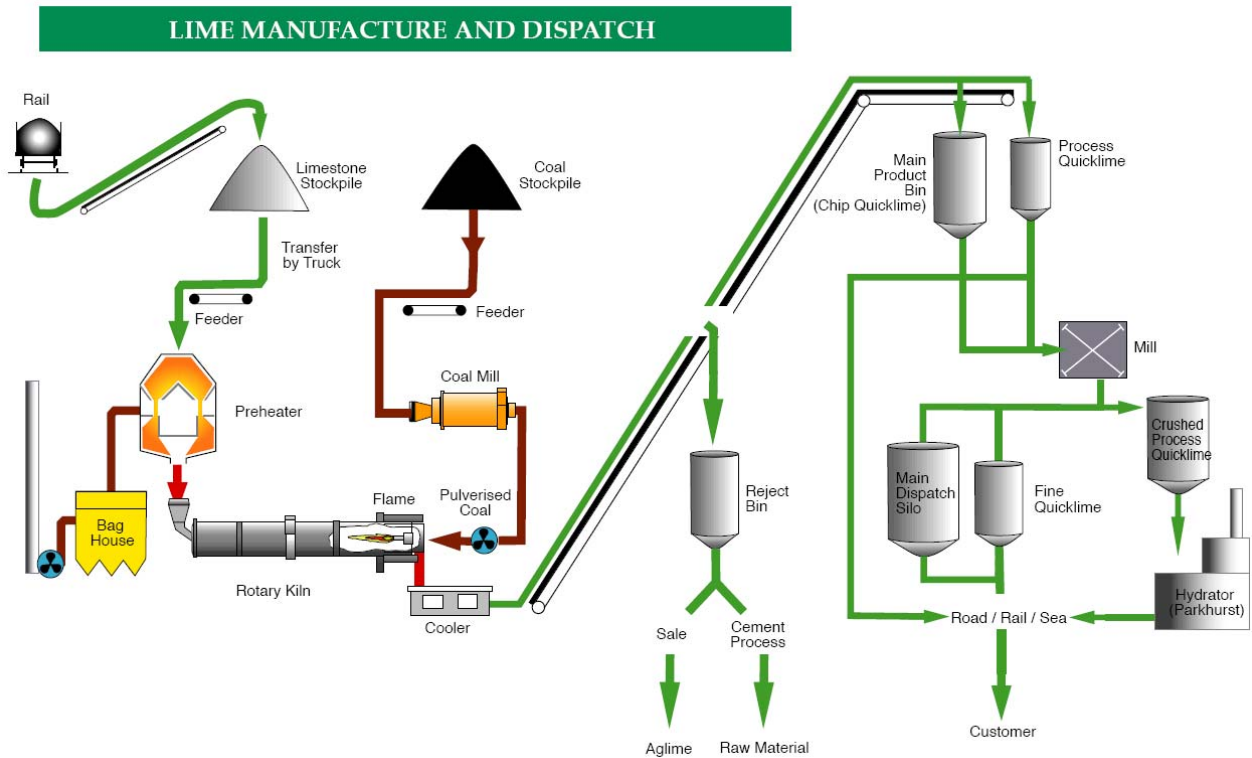
3.1.5. Ongebluste kalk

De ongebluste kalk die gebruikt werd in deze studie werd aangeleverd door het bedrijf MGP (Mineralen, Granulaten en Poeders).

Ongebluste kalk wordt gecreëerd door het branden van ontgonnen kalksteen in een horizontale of verticale oven (kiln) waar het wordt verhit tot boven een temperatuur van 900°C. Het calciumcarbonaat CaCO₃ ontbindt zich dan in calciumoxide CaO (= ongebluste kalk) en koolstofdioxide CO₂.



Na het branden wordt de ongebluste kalk afgekoeld en vermalen tot een kleinere fractie (Fig. 7).



Figuur 7: Kalkproductie fabriek (AustStab Technical Note, 2008)

De kalksteen die gebruikt wordt bij dit proces is geen puur calciumcarbonaat en het brandproces zelf heeft ook zijn onzuiverheden waardoor de geproduceerde ongebluste kalk nooit voor 100% uit CaO zal bestaan.

3.1.6. Betonmeel

Het betonmeel is afkomstig van het bedrijf MGP dat bouw- en sloofafval (BSA) recycleert. Bij dit proces wordt het verzamelde afval gesplitst op kleur en geeft dus een rode (baksteenpuin) of grijze (betonpuin) fractie. Uit het betonpuin kan men na vermaling een materiaal verkrijgen met een korrelgrootte kleiner dan 30 μm , dit is het betonmeel gebruikt in deze studie.

3.1.7. Overzicht stalen

Hieronder volgt een overzicht (Tabel 3) van de stalen en de mengsels die gebruikt werden bij dit onderzoek. Bij de stalen staat de naam die verder gebruikt wordt in dit manuscript, een korte beschrijving van het materiaal, welke mengsels gemaakt werden en het labonummer waaronder het staal staat ingeschreven in het Laboratorium voor Bodemkunde van Prof. Dr. E. Van Ranst. Iedere soort grond wordt aangegeven door een andere letter. Het cijfer geeft het soort mengsel aan: cijfer 1 geeft aan dat het staal niet gemengd is met een stabiliserend materiaal; cijfer 2 duidt op een mengsel met ongebluste kalk (5%); en cijfer 3 op een mengsel met betonmeel (20%).

Tabel 3: Lijst van materialen en mengsels

Staal	Beschrijving	Labonummer
A1	Boomse Klei	9/434
A2	Boomse Klei + 5% CaO	
A3	Boomse Klei + 20% betonmeel	
B1	Ieperse Klei	9/435
B2	Ieperse Klei + 5% CaO	
B3	Ieperse Klei + 20% betonmeel	
C1	Leem	9/436
C2	Leem + 5% CaO	
C3	Leem + 20% betonmeel	
D1	Boomse Klei, behandeld met natriumacetaat	9/434na
D2	Boomse Klei, behandeld met natriumacetaat + 5% CaO	
D3	Boomse Klei, behandeld met natriumacetaat + 20% betonmeel	
E1	Ieperse Klei, behandeld met natriumacetaat	9/435na
E2	Ieperse Klei, behandeld met natriumacetaat + 5% CaO	
E3	Ieperse Klei, behandeld met natriumacetaat + 20% betonmeel	
F1	Leem, behandeld met natriumacetaat	9/436na
F2	Leem, behandeld met natriumacetaat + 5% CaO	
F3	Leem, behandeld met natriumacetaat + 20% betonmeel	

Vervolg Tabel 3: Lijst van materialen en mengsels

G1	Loess	9/778
G2	Loess + 5% CaO	
G3	Loess + 20% betonmeel	
H1	Baggerspecie met hoge concentratie organisch materiaal	9/1105
H2	Baggerspecie + 5% CaO	
H3	Baggerspecie + 20% betonmeel	
I1	Plastische leemgrond (lichte klei)	9/1106
I2	Plastische leemgrond + 5% CaO	
I3	Plastische leemgrond + 20% betonmeel	
J1	Zandige leemgrond	9/1107
J2	Zandige leemgrond + 5% CaO	
J3	Zandige leemgrond + 20% betonmeel	

3.2. Methodes

3.2.1. Monstervoorbereiding

Voor de analyses worden mengsels gemaakt van de verschillende gronden met toevoeging van ongebluste kalk of betonmeel. De ongebluste kalk (CaO) wordt met 5% toegevoegd, het betonmeel met 20%.

De ongebluste kalk heeft een kostprijs van 100 €/ton en wordt in de industrie tot concentraties van maximaal 5% toegevoegd aan een grond. Met een veel lager kostprijs van 20 €/ton wordt voor betonmeel verwacht om tot een toevoeging van maximaal 20% economische rendabel te zijn. Binnen de opzet van dit onderzoek wordt gekozen voor mengsels van grondmonsters met toevoeging van uitsluitend 5% ongebluste kalk en toevoeging van uitsluitend 20% betonmeel, maar in de praktijk zijn combinaties van beiden producten eveneens denkbaar, zolang deze combinaties economisch rendabel zijn.

Voor beide soorten mengsels wordt dus de maximaal toelaatbare bijmenging genomen zodanig dat een zo groot mogelijk effect op de gronden kan waargenomen worden, binnen de grenzen van de economische rendabiliteit.

3.2.2. Chemische analyses

3.2.2.1. Zuurtegraad (pH)

De pH geeft de activiteit van het hydronium ion weer en toont de zuurtegraad van de grond. Voor het meten van de pH wordt een mengsel van 6 g monster en gedemineraliseerd water in een 1:2,5 (grond:water) verhouding gemaakt. Na 2 h wordt een evenwicht bereikt en wordt de $\text{pH-H}_2\text{O}$ van het mengsel met behulp van een Ag/AgCl -glaselektrode gemeten. Alvorens de metingen uit te voeren, wordt de pH-meter met bufferoplossingen gekalibreerd.

De pH van een monster kan bepalend zijn voor de keuze van analysemethode om werkbare resultaten te bekomen.

3.2.2.2. Kationuitwisselingscapaciteit (CEC)

Deze meting geeft aan in welke mate de stalen in staat zijn om de kationen Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ uit te wisselen.

De eerste stap van de analyse is de verzadiging van de stalen met het ammonium ion (NH_4^+) en de extractie van de uitwisselbare kationen. Gedurende 16 h zal met een mechanische extractor (Centurion) een ammoniumacetaat oplossing van 1N door 2,5 g monster getrokken worden. De uitwisselbare kationen worden gemeten met atomaire absorptiespectrometrie (AAS).

Vervolgens worden de stalen gewassen met alcohol om de overmaat ammonium te verwijderen. De CEC wordt bepaald door destillatie van de stalen na toevoeging van 6 g NaCl, 10 ml H_2O en 20 ml NaOH. De vrijgekomen NH_4^+ wordt opgevangen in een 50 ml boorzuuroplossing en teruggetitreerd met 0,05 N HCl. De CEC wordt dan berekend met volgende formule:

$$\text{CEC (meq/100gr)} = \frac{(V_{\text{HCl, monster}} - V_{\text{HCl, blanco}}) * N \text{ van het zuur} * 100}{m_{\text{monster}}} \quad (\text{d})$$

3.2.2.3. Water-oplosbare zouten

De hoeveelheid water-oplosbare zouten wordt bepaald door het meten van de anionen en kationen in waterextracten van een mengsel met een 1:5 (grond:water) verhouding.

Er wordt 20 g monster in 100 ml ultrapuur water gemengd. Het monster wordt 2 h lang mechanisch geschud en vervolgens laat men het 2 h rusten. Nadien wordt het staal gecentrifugeerd en wordt het bovenstaande waterextract afgegoten en gefilterd.

Vervolgens wordt de geleidbaarheid van deze waterextracten gemeten met behulp van een conductiviteitsmeter.

De hoeveelheid carbonaat en bicarbonaat wordt bepaald door een potentiometrische titratie van het waterextract en HCl tot een pH van 8,4 en 4,4 respectievelijk.

Chloriden worden colometrisch bepaald. De chloride in het waterextract wordt getitreerd met zilverionen afkomstig van een zilverelektrode bij een constante stroom. Het eindpunt van de titratie is bereikt wanneer de Ag-ionen niet langer neerslaan met chloride. De overmaat aan Ag-ionen zorgt voor een plotse verandering in de elektrische potentiaal tussen 2 sensorelektrodes en

geeft zo het eindpunt van de titratie aan. Het resultaat wordt weergegeven op een teller in parts per million (ppm).

De concentraties aan anionen (SO_4 en NO_3) worden gemeten met de ionchromatograaf (IC), de concentraties aan kationen (Na, Ca, K en Mg) met behulp van atomaire absorptiespectrometrie (AAS).

3.2.2.4. Water-dispergeerbare klei

Dit is het kleigehalte bekomen door dispersie met water, zonder aan het monster een ander dispergerend product toe te voegen (Van Reeuwijk, 2002).

Er wordt 10g van een monster afgewogen en aangelengd tot 400 ml met gedemineraliseerd water in een 1l glazen fles. Dit wordt geschud gedurende een nacht in een 'end-over-end' schudtoestel met een snelheid van 30rpm. De mengsels worden dan verder aangelengd tot 1 liter en geplaatst in een waterbad met een constante temperatuur van 25°C . Na $5\frac{1}{2}$ uur wordt 20 ml uit de fles gepipetteerd in een getarreeerde beker die geplaatst wordt op een warme plaat. Wanneer alles opgedroogd is, weegt men opnieuw de beker en kan de hoeveelheid water-dispergeerbare klei van het monster bepaald worden.

$$\% \text{ water-dispergeerbare klei} = 42,305 \cdot R \cdot 100 / s \quad (e)$$

met R = drooggewicht van 20 ml suspensie (g)
 s = hoeveelheid afgewogen monster (g)

3.2.2.5. Watergehalte

Bij verschillende proeven is het vereist het watergehalte van het monster te bepalen.

Een bepaalde hoeveelheid monster wordt in een getarreeerd bekertje (m_0) gewogen (m_1). Na 24u drogen in een droogoven met een constante temperatuur van 105°C , wordt het bekertje opnieuw gewogen (m_2). Het watergehalte wordt als volgt berekend:

$$\text{wt}\% = (m_1 - m_2) / (m_2 - m_0) \cdot 100 \quad (f)$$

3.2.2.6. Totale chemische samenstelling

Een totaalanalyse houdt in dat bepaald wordt welke elementen aanwezig zijn in het monster en in welke hoeveelheid. Deze analyse vereist de vernietiging van zowel het organisch materiaal als de minerale bestanddelen.

Het monster (0,4 g) wordt in een platina-kroesje gebracht en verhit tot 850°C voor 30 minuten. Na afkoeling wordt het monster vermengd met 2 g lithium metaboraat (LiBO_2) en terug verhit tot 950°C voor 15 min. Het lithium metaboraat breekt de silicaatstructuur van het monster af op hoge temperaturen en vormt vaste structuren (glas) bij afkoeling. Na afkoeling gedurende 1 nacht wordt het materiaal opgelost in 70-80 ml 4% salpeterzuur (HNO_3). Vervolgens wordt de oplossing gefiltreerd door een voorgewassen (met 10% HNO_3 of HCl oplossing) papieren filter van 0,45 mm. De elementen worden gemeten door middel van ionchromatografie (IC) en atoomabsorptiespectrometrie (AAS).

3.2.2.7. Totaal specifiek oppervlak (TSO)

Het totaal specifiek oppervlak (TSO) van de klei staat in relatie met de CEC. Dit wordt bepaald via de methyleenblauwmethode (Coudijzer, 2009).

Tussen de 0,50 en 0,70 g van een droog gemalen staal wordt afgewogen. Er wordt 50 ml gedemineraliseerd water en 5 ml van een verzadigde $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ -oplossing toegevoegd. Het geheel wordt al roerend aan de kook gebracht en terug afgekoeld tot kamertemperatuur. Hierna wordt 10 ml H_2SO_4 0,5 mol/L en 2 ml methyleenblauw 0,5% toegevoegd. De suspensie wordt gedurende 30 min geroerd. Na het roeren wordt met een glasstaafje een druppel uit de suspensie overgebracht op een witbandfiltreerpapiertje (= 'stippelen'). Indien er een blauwe stip met een lichtblauw halo verschijnt, is het eindpunt bereikt, indien niet wordt nog eens 0,5 ml methyleenblauwoplossing toegevoegd. Na 2 min roeren kan men dan opnieuw 'stippelen'. Het TSO wordt dan gegeven door de formule:

$$\text{TSO (m}^2/\text{g)} = \frac{20,93 * V_{\text{methyleenblauw}} \text{ (mL)}}{\text{gewicht van het staal (g)}} \quad (\text{g})$$

3.2.3. Mineralogische analyses

3.2.3.1. X-stralendiffractie (XRD)

Met X-stralendiffractie kan de mineralogische samenstelling van een monster bepaald worden. Ook kan men zien of kleien al dan niet zwellen na glycolering en in welke mate dit gebeurt. Hiermee kan dus gekeken worden of er een verschil is tussen onbehandelde en behandelde monsters, en tussen de soorten behandelingen (betonmeel en ongebluste kalk) onderling.

De X-stralendiffractogrammen worden bekomen met een Philips X'PERT SYSTEM met een PW 3710 diffractometer, uitgerust met een Cu-buis anode, een secundaire monochromatiserende grafietkristal, een proportionele xenon gevulde detector en een stalenwisselaar met 35 posities. De invallende straal wordt automatisch gecollimeerd. Er wordt bestraald over een lengte van 12 mm. De zijde van de secundaire straal bestaat uit een 0,1 mm 'receiving'-spleet, een Sollerspleet en een 1° 'antiscanner'-spleet. De buis wordt bediend bij 40kV en 30 mA. De XRD-data wordt verzameld bij een θ , 2- θ geometrie beginnende met 3.00°, in stappen van 0,020° 2- θ en met een interval van 1s per stap.

Van de onbehandelde monsters worden opnames gemaakt van zowel een georiënteerd staal op een glasplaatje als niet-georiënteerde poederstaal. Ook van behandelde monsters wordt een georiënteerd plaatje gemaakt. Om na te gaan in hoeverre de aanwezige 2:1 mineralen zwellende eigenschappen hebben, worden de georiënteerde stalen onderworpen aan een glycolbehandeling. Ook van het betonmeel wordt een X-stralendiffractogram opgesteld van een poederstaal. Dit is niet gebeurt voor ongebluste kalk om eventuele schade, ten gevolge van de hoge reactiviteit van ongebluste kalk, aan het meettoestel te voorkomen.

3.2.4. Fysische analyses

3.2.4.1. Korrelgroottesamenstelling

De textuuranalyse omvat de scheiding van de minerale bodem in de korrelgroottefracties: zand, silt en klei, alsook de bepaling van de proporties van deze fracties. De analyse wordt uitgevoerd op fijne aarde ($< 2\text{mm}$), na afscheiding van de grove elementen. Om een goede dispersie van de kleifractie te bekomen, dienen alle cementerende materialen zoals organisch materiaal, CaCO_3 , oxiden en aanwezige opgeloste zouten verwijderd te worden.

De fijne fracties (leem en klei) worden gescheiden van het zand door natte zeving op een zeef van $63\mu\text{m}$. De kwantitatieve bepaling van de silt- en kleifractie wordt bepaald op 2 verschillende methodes: (1) successieve sedimentatie en (2) Robinson-Köhn pipetmethode.

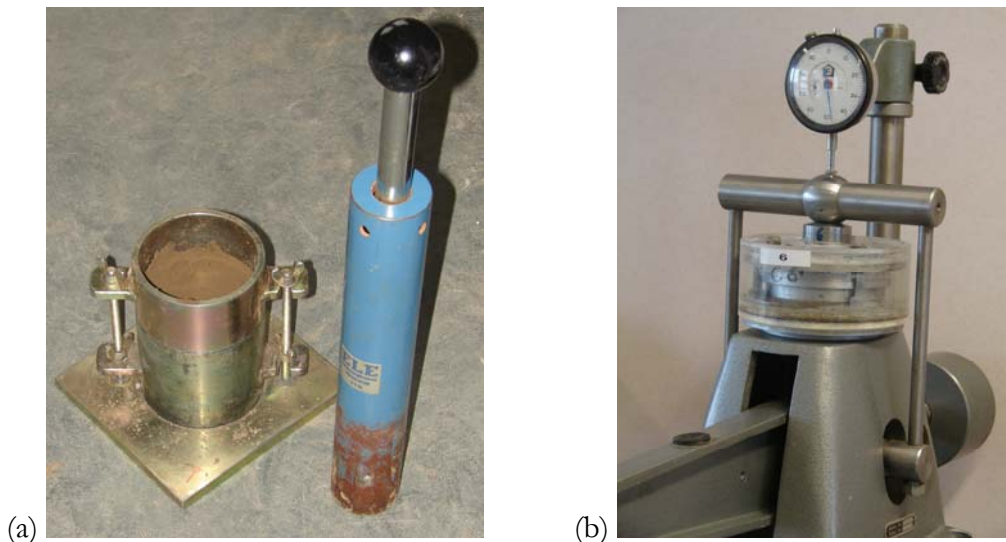
Het kleigehalte wordt bij de laatstgenoemde methode bepaald met behulp van een Robinson-Köhn pipet (Pansu & Gautheyrou, 2006). De colloïdale fractie wordt gedispergeerd met een mengsel bestaande uit 33,0g natriumhexa-metafosfaat en 7,0g Na_2CO_3 , opgelost in 1l water. De tijd en diepte van de pipetopname worden afgeleid uit de Wet van Stokes.

3.2.4.2. Zweltest

De zwelling van een grond wordt in dit onderzoek gekwantificeerd met een eendimensionale zweltest uitgevoerd met behulp van een oedometer. De test wordt uitgevoerd op een onbehandeld staal, een staal met toevoeging van ongebluste kalk en een staal met toevoeging van betonmeel. Van ieder staal wordt met de gemeten waarden een zwellingscurve opgesteld.

Een eerste stap van de proef is het compacteren van het monster. Dit gebeurt volgens de standaard proctorcompactie beschreven in de American Standard Testing Methods ASTM D698. Twee kg grond wordt afgewogen en vervolgens vermengd met een hoeveelheid water tot een vooraf bepaald watergehalte wordt bereikt. In dit onderzoek wordt het watergehalte gekozen na bepaling van de vloeï- en de uitrolgrens (paragraaf 3.2.4.3). Er wordt een watergehalte geselecteerd dat gelegen is tussen deze grenzen en dicht bij de uitrolgrens. De grond wordt met het water vermengd door middel van een mechanische roerder.

Na de vermenging met water wordt de vochtige grond in een cilindrische, metalen houder (diameter = 10,15 cm; hoogte = 11,64cm) gebracht. Er wordt drie keer ± 600 g materiaal in de cilinder gebracht en na elke keer wordt de grond aangestampt met een hamer van 5,5 lb ($\pm 2,5$ kg) door middel van 25 slagen (Fig. 8a).

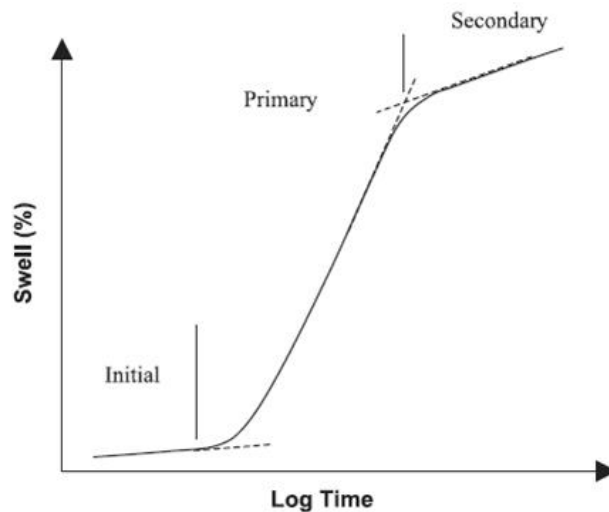


*Figuur 8: a) Proctorcompactie met metalen cilinder en hamer
en b) oedometer met oedometercel*

Vervolgens wordt in de gecompacteerd grond een ring met een diameter van 6,3 cm en een hoogte van 1,9cm gedrukt. Men zorgt er voor dat de grond aan beide zijden van de ring mooi afgevlakt is, waarna de ring bevestigd wordt in de oedometercel. Boven en onder de ring brengt men twee poreuze stenen aan. De cel wordt geplaatst op de oedometer (Fig. 8b) waarbij een druk ('seating pressure') van minimum 1kPa wordt aangebracht op de oedometercel.

Het watergehalte van de gecompacteerd grond wordt bepaald met de methode beschreven in paragraaf 3.2.2.5.

Door toevoeging van gedemineraliseerd water worden de ring, de gecompacteerd grond en de poreuze stenen volledig ondergedompeld. Het water verplaatst zich door de poreuze gesteenten en dringt in de grond. Hierdoor kan al dan niet zwellen van de grond optreden. Aangezien de grond in een ring vast zit, zal de zwellen maar in één richting (verticaal) doorgaan. De verandering in hoogte wordt weergegeven op een meetertje (Fig. 8b). Op regelmatige tijdstippen (0.1, 0.2, 0.3, 0.5, 1.0, 2.0, 4.0, 8.0, 15.0, 30.0 min en 1, 2, 4, 8, 24, 48, 72 uur) wordt de hoogte afgelezen. Met deze metingen wordt de zwellingscurve van een monster opgesteld.



Figuur 9: Schematische voorstelling van scheiding tussen initiële, primaire en secundaire zwellings

De gemeten zwellings uitgedrukt ten opzichte van de tijd (logaritmische schaal) geeft een s-vormige curve. Op deze curve kan de initiële, primaire en secundaire zwellings van een grond worden aangeduid (Fig. 9). Er worden metingen genomen totdat er geen grote verandering meer in de zwellings wordt waargenomen. Dit komt ongeveer overeen met het eindpunt van de primaire zwellings. De overgang van primaire naar secundaire zwellings vertaalt zich op de grafiek naar de afvlakking van de zwellingscurve.

3.2.4.3. Atterbergse grenzen

De grenzen van consistentie karakteriseren de fijnkorrelige fractie van een grond. De vloeigrens ('liquid limit'), de uitrolgrens ('plastic limit') en de krimpgrens ('shrinkage limit') splitsen de 4 toestanden waarin een grond zich kan bevinden afhankelijk van het watergehalte: vloeibaar, plastisch, semi-vast en vast.

Het monster wordt gezeefd op een 500 μm zeef en goed gemengd met een bepaalde hoeveelheid water. De vloeigrens wordt bepaald met het Casagrande-toestel. Het monster wordt in een schaal gebracht waar dan een groef van 2mm breed in getrokken wordt. Het schaalje valt van een vaste hoogte en met een vaste frequentie totdat de groef over een afstand van 13 mm gesloten is. Als de groef gesloten is wordt van het monster een staaltje genomen waarvan het watergehalte kan bepaald worden. Voor een eerste meting ligt het aantal slagen best tussen 30 en 40. Vervolgens wordt het watergehalte verhoogd door toevoeging van water en herhaalt men de proef. Optimaal ligt het aantal slagen nodig voor het sluiten van de groef, deze keer tussen 20 en 30. Ook hier

wordt terug een staaltje genomen om het watergehalte te bepalen. Vervolgens wordt opnieuw water toegevoegd aan het monster en wil men zo een meting bekomen met een resultaat tussen 10 en 20 slagen en een meting waar minder dan 10 slagen nodig zijn voor het sluiten van de groef.

Van de 4 punten (punt 1 gelegen tussen 30 en 40 slagen, punt 2 tussen 30 en 20 slagen, punt 3 tussen 20 en 10 slagen en punt 4 onder 10 slagen), waarbij telkens het watergehalte werd bepaald, kan een grafiek opgemaakt worden met een lineair verband tussen het aantal slagen en het watergehalte. De vloeigrens wordt afgelezen bij 25 slagen.

Om nauwkeuriger te werken kan men ieder van deze 4 punten tot 3 maal toe herhalen waarbij het aantal slagen maximaal met 1 slag van elkaar verwijderd liggen.

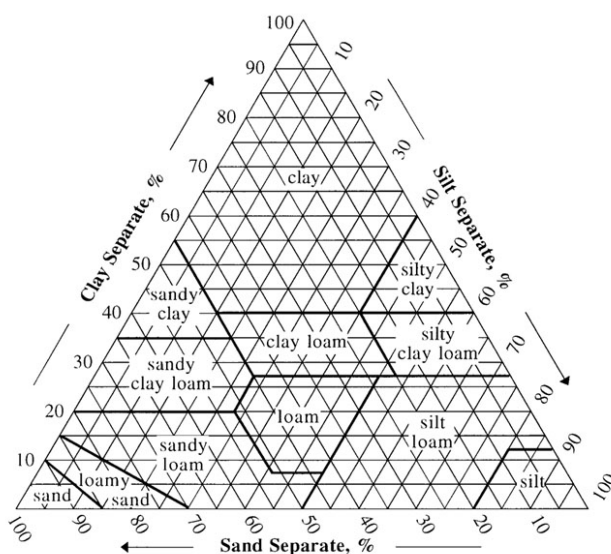
De uitrolgrens bepaalt men op hetzelfde materiaal dat men gebruikt voor het bepalen van de vloeigrens. Men neemt ongeveer 15g monster en splits dit in 3 delen van $\pm 5g$. Met deze 5g probeert men draadjes te rollen met een diameter van 3mm. Wanneer hierin barstjes te zien zijn, worden de stukjes verzameld en bepaalt men hiervan het watergehalte. Dit wordt herhaald voor de 2 andere deelmonsters van 5g. Het gemiddelde van de 3 watergehaltes geeft de uitrolgrens aan.

Het verschil tussen de vloeigrens (LL) en uitrolgrens (PL) is de plasticiteitsindex (PI). Deze parameter geeft het interval van watergehaltes aan waarbij een grond zich plastisch gedraagt.

4. RESULTATEN

4.1. Korrelgroottesamenstelling

De korrelgroottesamenstelling van de stalen werd volgens twee methodes bepaald: de pipetmethode van Robinson-Köhn (Tabel 4) en de successieve sedimentatie (Tabel 5). De stalen werden geclassificeerd aan de hand van een textuurdriehoek (Fig. 10) opgesteld door de USDA (United States Department of Agriculture).



Figuur 10: Textuurdriehoek voor classificatie volgens USDA

Voor de stalen B, I en J werden verschillende textuurklassen bekomen bij de 2 gebruikte analysemethodes. Volgens de pipetmethode werd staal B geclassificeerd als een siltige kleileem, staal J als een leem en ligt staal I op de grens tussen een zandige leem en leem. De classificatie met de resultaten van de successieve methode geeft aan dat staal B een siltige klei is, staal I een leem en staal J een zandige leem.

Tabel 4: Korrelgroottesamenstelling bepaald met pipetmethode van Robinson-Köhn

Staal	Totaal (%)			Silt (%)			Textuurklasse (USDA classificatie)
	klei	silt	zand	2-10 μm	10-20 μm	20-63 μm	
	< 2 μm	2-63 μm	63-2000 μm				
A	51	45	4	15	8	23	Siltige klei
B	33	66	1	41	16	9	Siltige kleileem
C	20	78	2	10	17	51	Silt leem
G	22	71	7	10	14	47	Silt leem
H	24	44	32	16	8	20	Leem
I	15	33	52	6	6	21	Zandige leem / Leem
J	23	31	46	5	5	21	Leem

Tabel 5: Korrelgroottesamenstelling bepaalt met successieve sedimentatie

Staal	Klei (%) < 2 µm	Leem (%) 2 - 63 µm	Zand (%) 63 - 2000 µm	Textuurklasse (USDA classificatie)
A	45	50	5	Siltige klei
B	45	54	1	Siltige klei
C	19	78	3	Silt leem
D	47	47	6	Siltige klei
E	46	53	1	Siltige klei
F	22	73	5	Silt leem
G	25	72	3	Silt leem
H	12	49	39	Leem
I	15	36	49	Leem
J	9	32	59	Zandige leem

Het verschil in classificatie van enkele stalen kan een gevolg zijn van de verschillende meetmethodes en/of de homogenisatie van de grond. Als de grond niet volledig gehomogeniseerd is na staalname, kan dit verschil hierdoor eventueel verklaard worden.

4.2. Zuurtegraad (pH)

Tabel 6 geeft de pH-waarden van de onbehandelde stalen, de mengsels met ongebluste kalk en mengsels met betonmeel, na toevoeging van gedestilleerd water. De onbehandelde stalen hebben een pH tussen 6,8 en 8,5; behalve staal G die een lagere pH-waarde heeft. Na toevoeging van de ongebluste kalk krijgen alle mengsels een veel hogere pH van ong. 12,8. Ook voor de mengsels met betonmeel werd een hogere pH waargenomen. Hier liggen de waarden rond 11 tot 12, dus iets lager dan de pH-waarden van de mengsels met ongebluste kalk.

Tabel 6: Zuurtegraad (pH) van de stalen

Staal	Onbehandeld (1)	+ 5% CaO (2)	+ 20% betonmeel (3)
A	6,86	12,75	11,37
B	8,52	12,80	11,38
C	7,45	12,81	11,89
D	6,93	12,84	11,85
E	6,62	12,86	11,75
F	6,93	12,89	12,15
G	4,33	12,80	11,25
H	7,28	12,79	11,56
I	7,73	12,82	11,93
J	7,98	12,83	12,10

(1) = onbehandeld staal; (2) = Staal gemend met 5% CaO; (3) = Staal gemengd met 20% betonmeel

4.3. Kationuitwisselingscapaciteit (CEC)

Tabel 7 geeft de kationuitwisselingscapaciteit (CEC) en de voornaamste uitwisselbare basische kationen (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^{+} en K^{+}) van de stalen A tot J weer (in cmol_c/kg). De basenverzadiging (BS) en het uitwisselbaar natrium (Exchangeable Sodium Percentage - ESP) werden bepaald aan de hand van de CEC en kationen.

Tabel 7: Kationuitwisselingscapaciteit (CEC) en uitwisselbare kationen van onbehandelde stalen

Staal	CEC	Ca^{2+}	Mg^{2+} cmol_c/kg	Na^{+}	K^{+}	BS %	ESP %
A	20,01	42,90	5,91	0,25	1,73	> 100	1
B	30,48	21,50	15,49	7,59	3,21	> 100	25
C	12,27	11,91	1,21	0,11	0,39	> 100	1
D	21,40	11,77	2,52	8,31	0,63	> 100	39
E	31,31	7,63	7,17	16,59	1,20	> 100	53
F	11,63	2,08	0,33	6,65	0,28	80	57
G	13,55	0,16	0,11	0,05	0,16	4	< 1
H	20,58	40,88	3,58	1,84	0,67	> 100	9
I	11,85	22,53	1,17	0,2	0,49	> 100	2
J	7,18	34,32	1,16	0,51	0,36	> 100	7

De basenverzadiging is de hoeveelheid positief geladen ionen, waterstof en aluminium uitgesloten, geadsorbeerd op het colloïdale complex en wordt uitgedrukt t.o.v. de totale uitwisselingscapaciteit (in %):

$$\text{BS} = (\text{Mg}^{2+} + \text{Na}^{+} + \text{K}^{+} + \text{Ca}^{2+}) / \text{CEC} * 100 \quad (\text{h})$$

Bij alle stalen, behalve F en G, is het negatieve colloïdale complex volledig verzadigd ($\text{BS} > 100$) met basische kationen. Staal G heeft een heel lage BS (4%). Minder basische kationen zijn hier aanwezig op het colloïdale oppervlak. De overige plaatsen op het colloïdale oppervlak wordt ingenomen door H^{+} -ionen. Een positieve correlatie ($r = 0.865$) bestaat tussen BS en de pH van de stalen. Gronden met een lage BS bevatten dus ook een lage pH, wat waargenomen wordt bij staal G die een BS van 4% en een pH-waarde van 4,33 bezit.

Een tweede parameter die bepaald wordt, is het percentage uitwisselbaar Na^{+} (ESP). Deze parameter geeft de verhouding tussen uitwisselbare Na^{+} -kation en de totale uitwisselingscapaciteit weer:

$$\text{ESP} = (\text{uitwisselbaar } \text{Na}^{+} / \text{CEC}) * 100 \quad (\text{i})$$

Hoge ESP waarden werden gevonden bij stalen B, D, E en F. De hoge waarde aan Na^+ bij deze laatste drie stalen is het rechtstreekse gevolg van het wassen van deze stalen met natriumacetaat (NaOAc).

Zowel ongebluste kalk als het betonmeel worden in dit onderzoek getest op hun stabiliserende eigenschappen. Om het effect van deze producten zo goed mogelijk waar te nemen, is een grond nodig met een groot vermogen tot zwellen. Hoe meer kleipartikels kunnen dispergeren, hoe groter de swelling van een grond. Toevoeging van natrium (Na^+) draagt bij tot de ontwikkeling van een dikke diffuse dubbellaag rond kleipartikels. De afstotende krachten, die ontstaan door interagerende dubbellagen van dicht bij elkaar liggende partikels, zijn sterk genoeg om de Van der Waals krachten te overtreffen. De dispergeerbaarheid van klei neemt toe door toevoeging van natrium, vooral in gronden met een aanzienlijke hoeveelheid 2:1 kleimineralen (Rengasamy & Olson, 1991).

De stalen A, B en C worden gewassen met natriumacetaat (NaOAc) met de intentie de colloïdale fractie te verzadigen met Na^{2+} wat een verhoging van het zwelpotentieel van de grond met zich meebrengt. Deze stalen worden benoemd als stalen D, E en F.

4.4. Waterdispergeerbare klei (WDK)

Tabel 8 geeft het gehalte aan waterdispergeerbare klei (WDK) van de onbehandelde stalen en de mengsels weer.

Tabel 8: Gehalte aan waterdispergeerbare klei (%) en indicatie voor stabiliteit

Staal	Waterdispergeerbare klei			Indicatie voor stabiliteit		
	Onbehandeld (1)	+ 5% CaO (2)	+ 20% B (3)	Onbehandeld (1)	+ 5% CaO (2)	+ 20% B (3)
A	19,9	6,6	2,7	0,56	0,85	0,94
B	27,1	6,4	3,8	0,40	0,86	0,92
C	4,8	7,7	2,1	0,74	0,59	0,89
D	27,7	10,1	2,6	0,41	0,79	0,95
E	40,6	10,1	5,5	0,11	0,78	0,88
F	21,8	7,8	2,2	0,00	0,64	0,90
G	2,3	6,7	2,2	0,91	0,74	0,91
H	4,6	7,7	2,5	0,60	0,33	0,78
I	3,7	8,1	2,2	0,74	0,44	0,85
J	4,1	5,9	1,9	0,55	0,36	0,79

(1) = onbehandeld staal; (2) = Staal gemengd met 5% CaO; (3) = Staal gemengd met 20% betonmeel

Stalen A, B, D, E en F bevatten ongeveer 20% en meer waterdispergeerbare klei. Staal E steekt hier ver bovenuit met 40% WDK. De andere stalen (C, G, H, I en J) hebben een WDK-gehalte dat lager ligt dan 5 %. De hoge gehalten aan WDK komen voor bij de grondsoorten met een kleigehalte rond 45% en/of stalen die behandeld werden met natriumacetaat.

De hogere WDK-gehalten bij de stalen D, E en F zijn een direct gevolg van het wassen van de stalen met natriumacetaat. Door een hogere hoeveelheid monovalente kationen (Na^+) aanwezig op het oppervlak van de kleimineralen wordt water gemakkelijker opgenomen en zal de klei sneller en gemakkelijker dispergeren.

De mengsels met ongebluste kalk geven een WDK-gehalte tussen 5 en 10%. Alleen voor de stalen waar het oorspronkelijk kleigehalte hoger was dan 20% is een grote vermindering zichtbaar. Bij stalen waar het gehalte onder de 5% lag, bracht toevoeging van 5% CaO een lichte stijging in waterdispergeerbare klei teweeg.

Na toevoeging van 20% betonmeel daalt voor alle stalen de hoeveelheid waterdispergeerbare klei tot een gemiddelde waarde van 3%.

De verhouding van het gehalte aan WDK over het totale kleigehalte (TK) van een monster geeft een indicatie voor de stabiliteit van de grondsoort. Hoe meer klei kan dispergeren in water, hoe instabieler een grond zal zijn. Met volgende formule wordt een waarde tussen 0 en 1 bekomen (hoe dichterbij 1, hoe stabiel):

$$\text{Indicatie van stabiliteit} = 1 - \frac{\%WDK}{\%TK} \quad (j)$$

met $\%WDK$: gehalte aan waterdispergeerbare klei (%)
 $\%TK$: totale kleigehalte (%)

Volgens het gehalte aan waterdispergeerbare klei hebben de mengsels met betonmeel een grotere stabiliteit dan de mengsels met ongebluste kalk (Tabel 8).

4.5. Totaal specifiek oppervlak (TSO)

Tabel 9 geeft het totaal specifiek oppervlak (TSO) van de stalen en hun mengsels weer.

Tabel 9: Totaal specifiek oppervlak (TSO) van onbehandelde stalen en mengsels

Staal	Onbehandeld (1)	+ 5% CaO (2) (m ² /g)	+ 20% B (3)
A	354,5	269,6	257,3
B	573,9	555,0	448,5
C	171,6	135,0	114,5
D	326,0	270,1	253,2
E	562,3	n.	490,5
F	132,9	126,8	125,0
G	149,5	147,2	151,9
H	151,9	66,4	83,1
I	153,9	85,8	111,0
J	95,1	64,4	84,4

n. : niet bepaald

Door toevoeging van ongebluste kalk en betonmeel vermindert het totaal specifiek oppervlak bij alle stalen behalve bij stalen F en G. Daar blijft het TSO ongeveer gelijk.

Het totaal specifiek oppervlak verwijst naar de hoeveelheid oppervlak op kleimineralen waar reacties kunnen plaatsvinden. Een grote hoeveelheid kleine partikels resulteert in een groter specifiek oppervlak dan een kleine hoeveelheid grote partikels.

Een daling in TSO geeft aan dat het specifiek oppervlak vermindert waardoor kan aangenomen worden dat de partikels groter zijn dan voorheen. De partikels zijn meer gebonden en gaan minder gemakkelijk dispergeren waardoor er minder zwelling optreedt.

Het TSO van de stalen A, B, C en D daalt meer bij toevoeging van betonmeel dan bij toevoeging van ongebluste kalk. Voor de stalen H, I en J geldt het omgekeerde.

4.6. Water-oplosbare zouten

De ionenconcentraties, pH en geleidbaarheid werden bepaald op een 1:5 verhouding (grond:water) van de mengsels en zijn weergegeven in Tabel 10.

Tabel 10: Zuurtegraad(pH), geleidbaarheid en ionenconcentraties van de stalen en hun mengsels

Staal	pH - H ₂ O	EC 25°C mS/cm	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	Na ⁺ ⁽¹⁾ %
A	7,75	1,226	<	0,81	7,14	1,81	0,70	0,24	0,05	5,47	<	2
B	7,96	1,208	<	0,54	1,71	0,70	0,55	4,70	0,05	4,97	<	61
C	7,48	0,103	<	0,19	0,61	0,12	0,42	0,11	0,06	0,15	<	8
D	6,78	0,833	<	1,83	0,25	0,44	0,07	4,47	0,09	1,33	<	86
E	7,41	0,340	<	1,02	0,13	0,80	0,05	1,74	0,08	0,21	<	64
F	7,29	0,087	<	0,86	0,71	2,86	1,06	1,42	0,23	0,04	<	23
G	-	0,034	<	0,01	0,04	0,02	0,02	0,05	0,04	0,08	<	36
H	7,20	0,892	<	0,20	4,32	2,08	0,12	1,63	0,75	2,10	0,70	20
I	7,70	0,320	<	0,28	3,01	0,25	0,02	0,75	0,09	1,15	<	19
J	7,74	0,396	<	0,38	3,12	0,33	0,08	0,50	0,16	1,24	<	12
A2	12,74	8,240	44,86	0,42	47,13	<	0,51	0,22	0,05	3,46	<	0
B2	12,62	8,300	36,89	0,00	24,01	<	1,10	0,61	0,13	3,37	<	2
C2	12,76	7,980	45,60	0,04	41,97	<	0,06	0,06	0,05	0,06	<	0
D2	12,73	8,500	46,70	0,88	38,31	<	0,20	5,97	0,06	0,45	<	13
E2	12,69	8,250	43,26	1,25	18,70	<	0,50	10,00	0,07	0,30	<	34
F2	12,72	8,700	48,22	0,40	41,39	<	0,05	6,66	0,06	0,04	<	14
G2	12,73	7,810	43,82	0,03	37,98	<	0,01	0,02	0,05	0,04	<	0
H2	12,73	8,180	45,84	0,25	32,38	<	0,08	0,77	0,62	1,39	0,64	2
I2	12,74	8,070	49,91	0,40	47,25	<	0,03	0,10	0,07	0,58	<	0
J2	12,74	8,320	47,88	0,02	48,21	<	0,10	0,36	0,11	0,45	<	1
A3	11,05	1,171	1,52	0,25	7,79	0,03	0,54	0,31	0,12	4,07	<	4
B3	11,16	1,108	1,97	0,28	4,00	0,02	0,60	3,45	0,11	2,94	<	43
C3	11,54	0,736	2,55	0,24	3,21	<	0,06	0,21	0,11	0,54	<	6
D3	11,46	1,440	2,63	1,80	3,12	0,01	0,13	5,66	0,12	1,86	<	64
E3	11,38	1,111	3,68	1,26	1,90	<	0,14	4,28	0,07	0,99	<	68
F3	11,72	1,435	5,03	1,28	2,07	<	0,03	4,53	0,11	0,92	<	68
G3	11,65	0,420	0,74	0,35	3,46	<	0,02	0,14	0,13	1,04	<	4
H3	10,36	0,942	0,66	0,30	5,93	0,02	0,15	1,39	0,65	2,39	0,46	19
I3	11,35	0,792	1,86	0,33	5,35	0,01	0,05	0,31	0,10	1,19	<	5
J3	11,56	1,092	3,01	0,80	4,08	0,01	0,16	0,79	0,18	1,31	<	16

⁽¹⁾ Na (%) = Na⁺ / (Ca²⁺ + Mg²⁺ + Na⁺ + K⁺) * 100

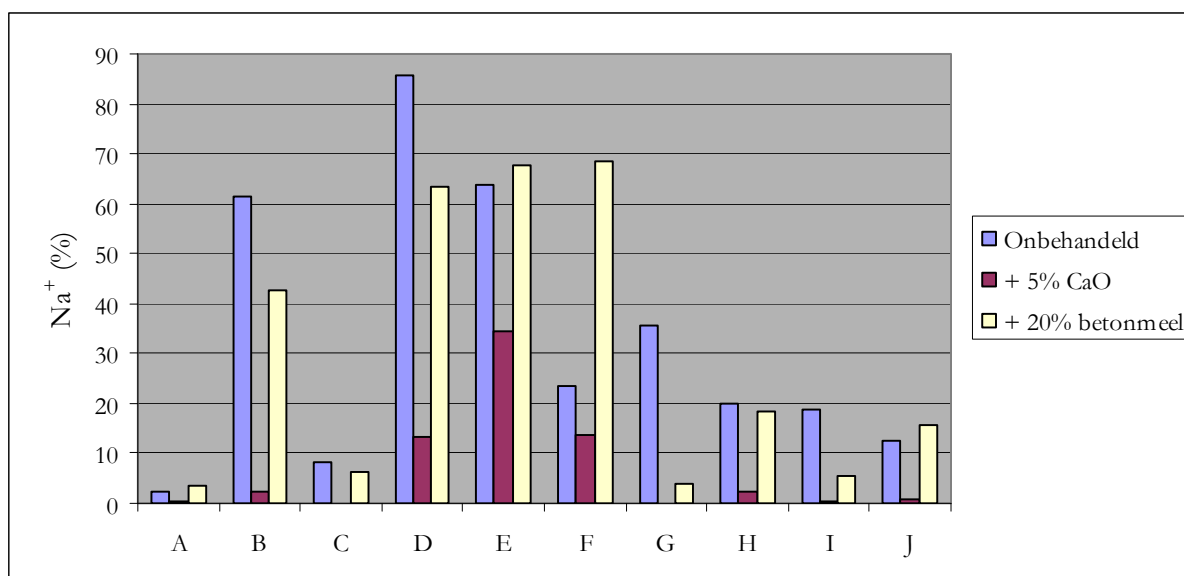
De geleidbaarheid (EC) van de mengsels met ongebluste kalk ligt rond de 8,2 mS/cm en is aanzienlijk hoger dan deze van de onbehandelde stalen. Daar ligt de EC tussen 0,03 en 1,22 mS/cm. Door toevoeging van het betonmeel blijft de geleidbaarheid ongeveer gelijk, met een heel lichte daling voor stalen A en B en een lichte stijging tot maximaal 1,440 mS/cm voor de andere stalen.

De hoge waarden aan carbonaten en Ca²⁺ in de mengsels A2 tot J2 is het gevolg van de toevoeging van ongebluste kalk (CaO). Een lichte stijging van de Ca²⁺-concentratie vindt plaats door toevoeging van het betonmeel (staal A3 tot J3).

Zoals eerder aangehaald, heeft de concentratie Na^+ een invloed op de dispergeerbaarheid van een grond en vooral een grond dat een grote hoeveelheid 2:1 kleimineralen bevat (Rengasamy & Olson, 1991), aangezien dat deze mineralen zwellende eigenschappen bevatten. Een hogere concentratie aan Na^+ veroorzaakt meer dispersie van kleimineralen en zorgt bijgevolg voor een grotere zwelling van de grond. Een parameter die kan berekend worden (met onderstaande formule) is het percentage aan basische kationen (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ en Na^+) dat ingenomen wordt door natrium $\text{Na}^+(\%)$. Deze percentages worden weergegeven in de laatste kolom van Tabel 10.

$$\text{Na}^+ (\%) = \text{Na}^+ / (\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{Na}^+ + \text{K}^+) * 100 \quad (\text{k})$$

Toevoeging van ongebluste kalk brengt een duidelijke daling weer in $\text{Na}^+(\%)$ (Fig. 11). Voor onbehandelde stalen varieert het percentage aan Na^+ tussen 2 en 86%, met de hoogste waarden voor de stalen die behandeld geweest zijn met NaOAc. Na toevoeging van ongebluste kalk wordt bij alle stalen, met uitzondering van diegene die behandeld zijn met NaOAc (staal D, E en F), maximum 2% van de basische kationen ingenomen door Na^{2+} . Stalen D, E en F geven na behandeling met ongebluste kalk percentage tot 34% voor Na^+ .



Figuur 11: Percentages aan basische kationen ingenomen door Na^+ bij de onbehandelde stalen en mengsels

Na toevoeging van betonmeel is geen eenduidige daling zichtbaar. Stalen D, E en F vertonen nog steeds een hoog percentage van ongeveer 68% Na^+ . Bij de andere stalen verschillen de percentages van ongeveer 5%, tot 20 en 45% Na^+ .

Algemeen wordt aangenomen dat hoe minder percentage van de basische kationen ingenomen wordt door Na^+ , hoe kleiner de invloed van Na^+ op de kleimineralen waardoor minder zwelling van een grond zal optreden. Uit deze resultaten blijkt dat door toevoeging van betonmeel de zwelling, beïnvloedt door de aanwezigheid van Na^+ -ionen, niet veel verandering zal ondervinden Dit is wel het geval bij toevoeging van ongebluste kalk.

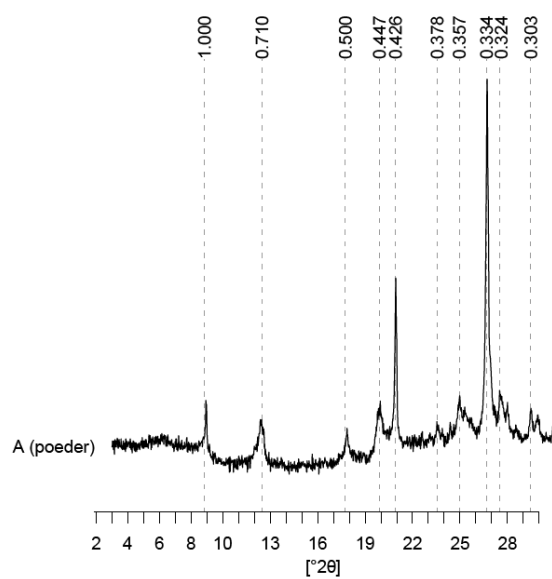
4.7. X-stralendiffractie van onbehandelde stalen en mengsels

4.7.1. Boomse klei

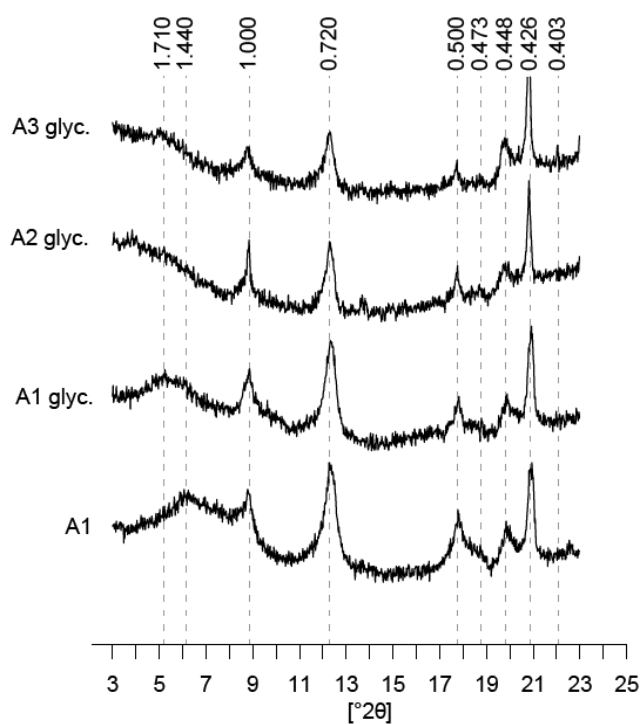
Het X-stralendiffractogram van de Boomse klei (A1) (Fig. 12) toont de aanwezigheid van kwarts (0.426 en 0.334 nm), mica (1.00, 0.5 en 0.334 nm) en kaolinet (0.71 en 0.357 nm). In minder mate bevat het ook veldspaten (0.324, 0.320 nm) en calciet (0.303 nm). De piek op 0.447 nm is de hkl-reflectie van kleimineralen. De reflectie op 1.440 nm in het X-stralendiffractogram van het georiënteerde totale grond monster (Fig. 13) wijst op de aanwezigheid van 2:1 kleimineralen. De verschuiving van de piek naar 1.710 nm na een glycolbehandeling (glyc.) duidt aan dat deze 2:1 kleimineralen zwellen, wat wijst op de aanwezigheid van smectiet

Bij het mengsel met toevoeging van de ongebluste kalk (A2 glyc., Fig. 13) is na de glycolbehandeling de piek rond 1.710 nm moeilijk waarneembaar. Hier treedt minder uitgesproken zwelling in het monster op. De piek is bij het mengsels met betonmeel (A3 glyc., Fig. 13) ook sterk verminderd, wat een indicatie is dat minder zwelling in het grondmonster plaatsvindt.

Eenzelfde verloop wordt waargenomen bij de Boomse klei die werd gewassen met NaOAc (Staal D). De figuren hiervan bevinden zich in Bijlage II. Op figuur 4a in Bijlage II (Bijl. II 2a) is een duidelijke reflectie op 0.403 nm te zien. Deze piek is niet aanwezig in staal A. Na glycolbehandeling verschuift ook hier de piek van 1.410 naar 1.710 nm en is deze piek niet meer aanwezig bij de mengsels (Bijl. II 2b).



Figuur 12: X-stralendiffractogram van een poedermmonster van de Boomse klei (Staal A)



Figuur 13: X-stralendiffractogram van een georiënteerd monster van staal A1 en zijn mengsels met ongebluste kalk (A2) en betonmeel (A3); glyc.: glycolbehandeling

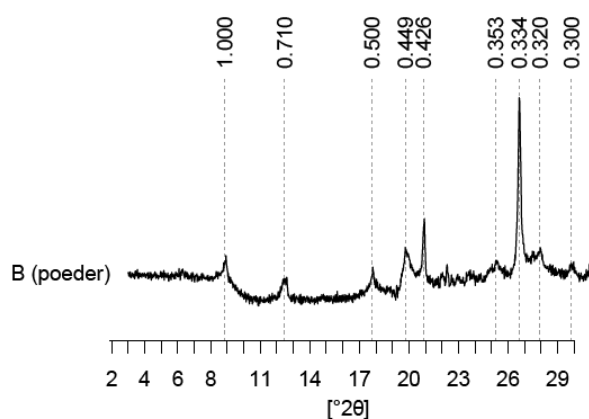
4.7.2. Ieperse klei

X-stralendiffractie van staal B, de Ieperse klei, toont de aanwezigheid van kwarts (0.426, 0.334 nm), mica (1.000, 0.500, 0.334 nm), kaolinit (0.710, 0.353 nm), veldspaten (0.324, 0.320 nm) en calciet (0.300 nm). Ook hier (Fig. 14) is de hkl-reflectie zichtbaar op 0.449 nm.

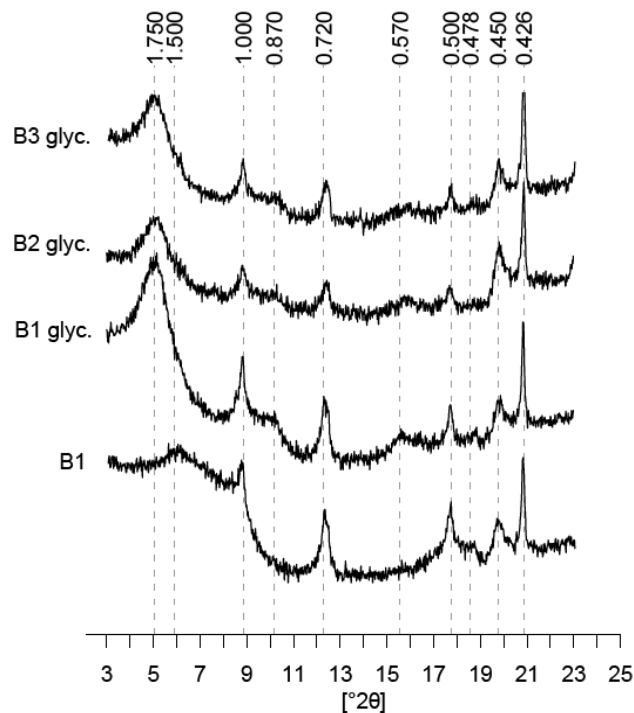
De Ieperse klei bevat dezelfde mineralen als de Boomse klei alleen is de intensiteit van de pieken verschillend. Na glycolering (B1 glyc.; Fig. 15) van de Ieperse klei is in vergelijking met de Boomse klei een veel intensere piek (1.750 nm) voor de zwellende 2:1 kleimineralen (smectiet) zichtbaar.

De piek op 1.750 nm (tweede orde: 0.870 nm; derde orde: 0.570 nm) wijst er op dat na glycolering van de mengsels (stalen B2 en B3; Fig. 15) nog steeds zwelling van de 2:1 kleimineralen (smectiet) optreedt. De intensiteit van de piek op 1.750 nm daalt zowel bij mengsels met ongebluste kalk als bij mengsels met betonmeel. De vermindering van de piekintensiteit is groter bij ongebluste kalk waardoor kan afgeleid worden dat behandeling met ongebluste kalk een grotere daling in zwellingscapaciteit van een grond teweeg brengt.

Hetzelfde effect van de mengsels op de zwellende kleimineralen (Bijlage II: 4a en 4b) is terug te vinden bij de Ieperse klei die gewassen werd met NaOAc (staal E). Ook hier is nog steeds voor beide mengsels een piek aanwezig op 1,75 nm, wat wijst op de aanwezigheid van smectieten die zwelling veroorzaken in een grond en is de daling in intensiteit van die piek groter bij toevoeging van ongebluste kalk dan bij toevoeging van betonmeel.



Figuur 14: X-stralendiffractogram van een poedermmonster van de Ieperse klei (Staal B)

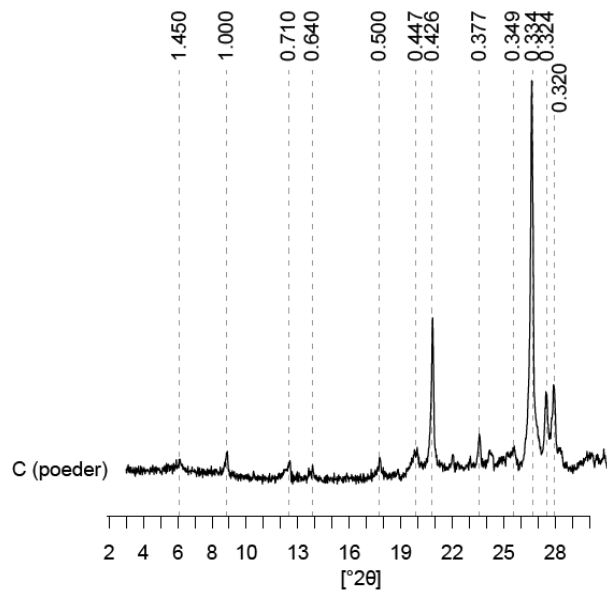


Figuur 15: X-stralendiffractogram van een georiënteerd monster van staal B1 en zijn mengsels met ongebluste kalk (B2) en betonmeel (B3); glyc.: glycolbehandeling

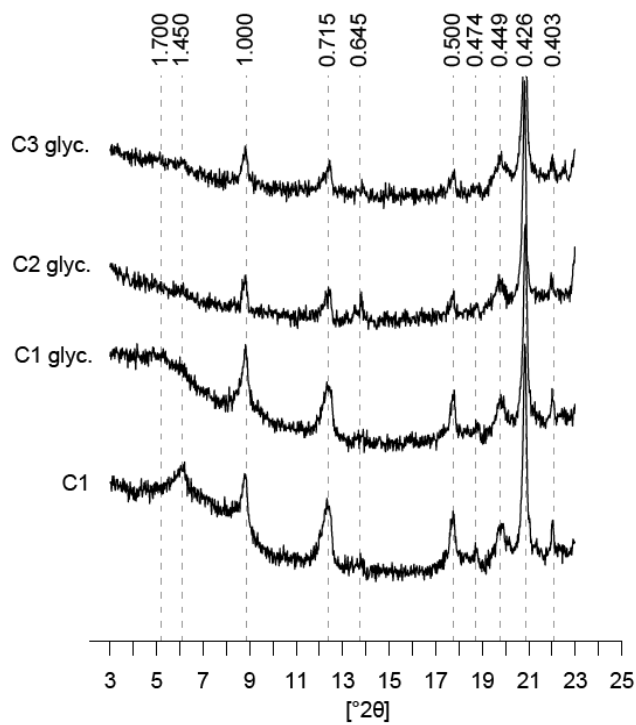
4.7.3. Leem

Het X-stralendiffractogram van het leemstaal (staal C) toont de aanwezigheid van kwarts (0.426, 0.335 nm) en veldspaten (0.640, 0.324, 0.320 nm). Daarnaast zijn ook in mindere mate mica (1.00, 0.50 nm) en kaolinit (0.710 nm) aanwezig (Fig. 16). De piek op 1.45 nm verschuift na glycolering naar 1.700 nm en wijst op de aanwezigheid van zwellende 2:1 kleimineralen (smectiet) (C1; Fig. 17). Een hkl-reflectie bevindt zich op 0.447 nm.

De reflectie rond 1.70 nm verdwijnt volledig bij beide mengsels (C2 en C3; Fig. 17). Ook de intensiteit van de pieken van mica en kaolinit vermindert.



Figuur 16: X-stralendiffractogram van een poedermmonster van het leemstaal (Staal C)



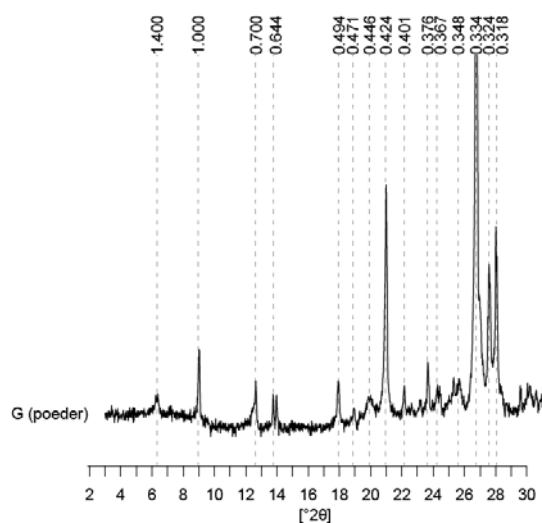
Figuur 17: X-stralendiffractogram van een georiënteerd monster van staal C1 en zijn mengsels met ongebluste kalk (C2) en betonmeel (C3); glyc.: glycolbehandeling

Staal F (leem gewassen met NaOAc) bevat veel minder duidelijke reflecties op 1.40 en 1.8 nm (Bijlage II: 6a en 6b) in vergelijking met het staal C. In dit staal is een kleinere hoeveelheid smectieten aanwezig in het monster, waardoor bijna geen zwellings optreedt. Na behandeling met ongebluste kalk en betonmeel (F2 en F3; Bijl. II 6b) zijn geen reflecties meer zichtbaar die zouden kunnen wijzen op de aanwezigheid van zwellende mineralen.

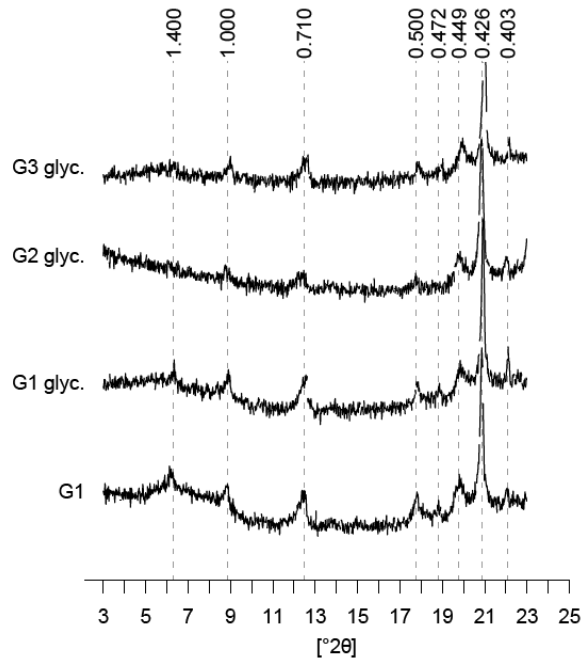
4.7.4. Loess

Staal G (Fig. 18) wordt gekenmerkt door kwarts (0.426, 0.334 nm), veldspaat (0.644, 0.324, 0.320), mica (1.00, 0.50 nm) en kaolinit (0.70, 0.348 nm). Dit materiaal geeft een reflectie op 1.4 nm die niet verschuift na glycolering (Fig. 19). In het X-stralendiffractogram van dit staal wordt geen bewijs geleverd voor de aanwezigheid van smectieten.

Door toevoeging van ongebluste kalk (G2) of betonmeel (G3) verdwijnt de piek op 1.4 nm (met 2^{de} en 3^{de} orde resp. op 0.70 en 0.472 nm) en daalt de intensiteit van de pieken van kaolinit en mica.



Figuur 18: X-stralendiffractogram van een poedermonster van het loessstaal uit het Zoniënwood (Staal G)

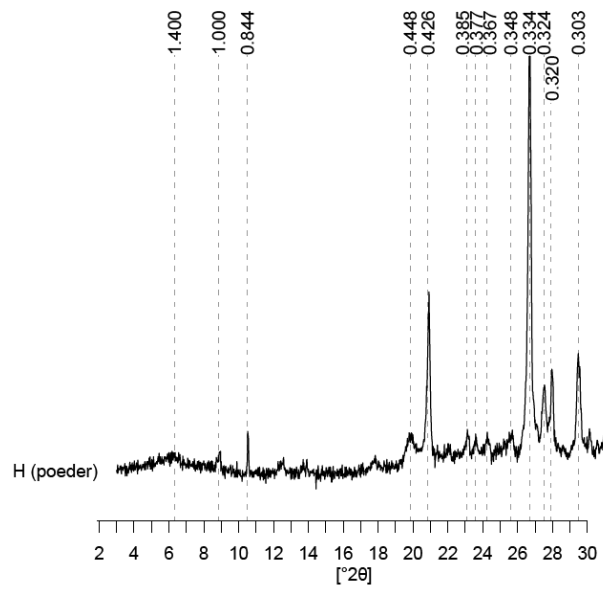


Figuur 19: X-stralendiffractogram van een georiënteerd monster van staal G1 en zijn mengsels met ongebluste kalk (G2) en betonmeel (G3); glyc.: glycolbehandeling

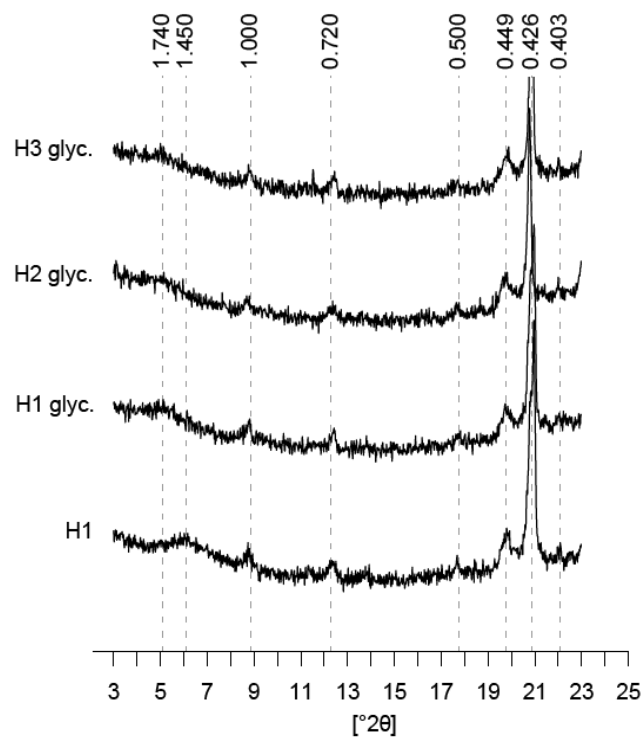
4.7.5. Aanvullende materialen

X-stralendiffractie van de stalen H, I en J toont de aanwezigheid van kwarts (0.426, 0.334 nm) en veldspaten (0.640, 0.324, 0.320 nm) en in heel lage concentraties mica en kaolinet (Fig. 20, 22 en 24). Zowel staal H als J bevat calcië, met reflecties op 0.303 en 0.388 nm.

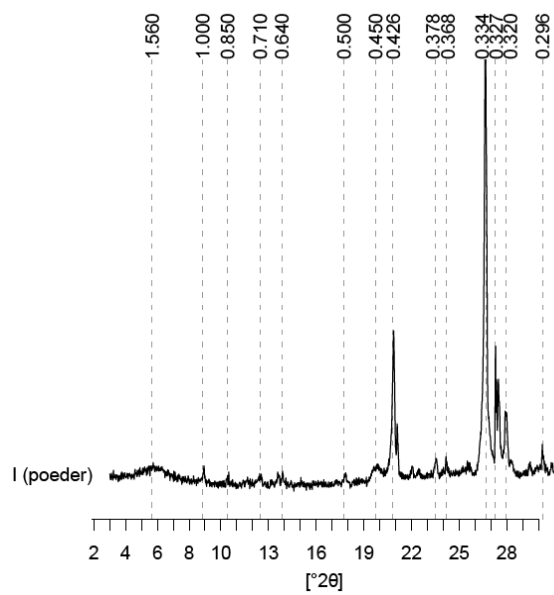
Stalen H en J vertonen heel kleine reflecties op 1.40 nm voor glycolering en 1.750 nm na glycolering (Fig. 21 en 25). Door lage intensiteit van deze pieken kan moeilijk afgeleid worden of de mengsels een effect hebben op de zwellen. Bij staal I (Fig. 23) zijn intensere pieken op 1.5 en 1.8 nm zichtbaar wat wijst op zwellende 2:1 kleimineralen. De piek op 1.8 nm verdwijnt in het mengsel met ongebluste kalk (I2) en vermindert bij toevoeging van het betonmeel (I3).



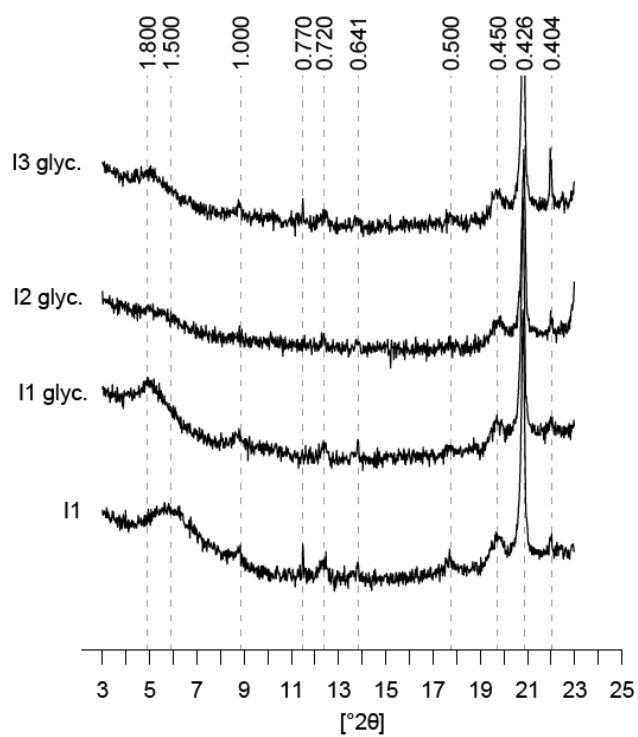
Figuur 20: X-stralendiffractogram van een poedermmonster van de baggerspecie (Staal H)



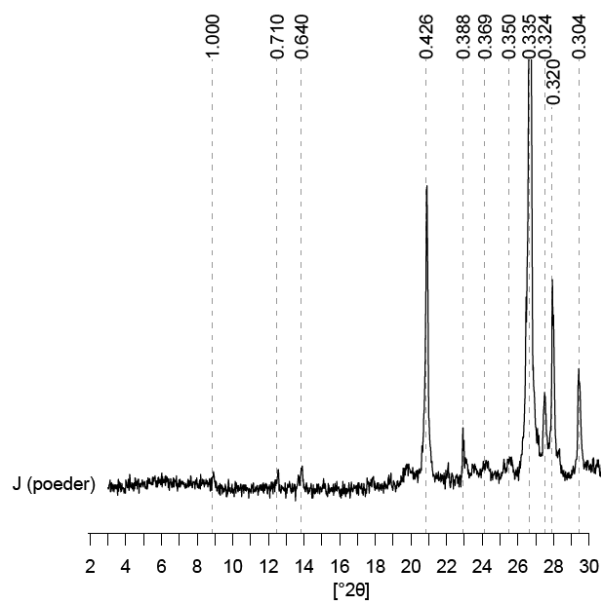
Figuur 21: X-stralendiffractogram van een georiënteerd monster van staal H1 en zijn mengsels met ongebluste kalk (H2) en betonmeel (H3); glyc.: glycolbehandeling



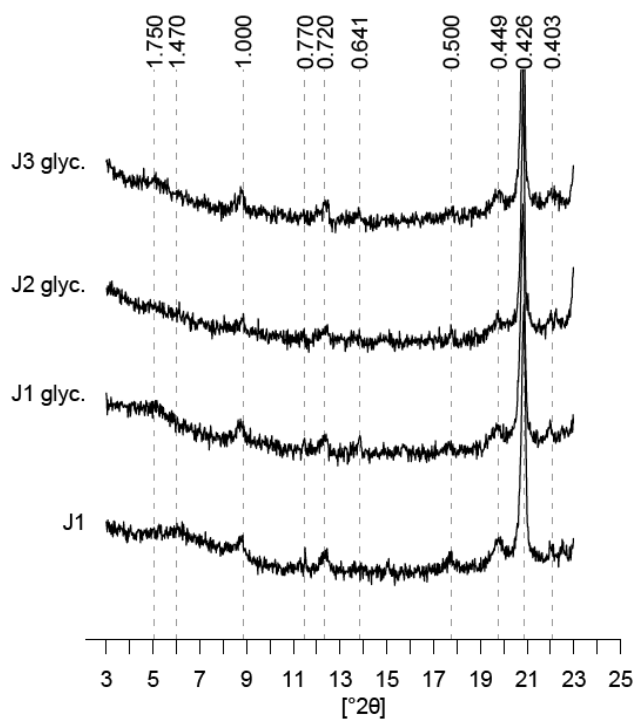
Figuur 22: X-stralendiffractogram van een poedermmonster van de staal I



Figuur 23: X-stralendiffractogram van een georiënteerd monster van staal I1 en zijn mengsels met ongebluste kalk (I2) en betonmeel (I3); glyc.: glycolbehandeling



Figuur 24: X-stralendiffractogram van een poedermmonster van de staal J



Figuur 25: X-stralendiffractogram van een georiënteerd monster van staal J1 en zijn mengsels met ongebluste kalk (J2) en betonmeel (J3); glyc.: glycolbehandeling

4.8. Zweltest

De zweltest is een meetmethode dat per staal veel tijd vergt. Omdat niet genoeg tijd voorhanden was, werden drie stalen voor deze test uitgeselecteerd: de Boomse klei, de Ieperse klei en een leemgrond, respectievelijk staal A, B en I. De twee kleigronden werden gekozen omdat deze stalen een groot kleigehalte bezitten waarvan verwacht wordt dat deze gronden een duidelijk zichtbare zwelling ondervinden. Verschillende stalen, gebruikt in dit onderzoek, zijn een leemgrond. Op één ervan, staal I, werd de zweltest uitgevoerd.

Bij de voorbehandeling van het staal voor de zweltest werd gedemineraliseerd water bij de mengsels (grondstaal met 5% ongebluste kalk of 20% betonmeel) toegevoegd zodanig dat het grondstaal zonder additieven (ongeblyste kalk of betonmeel) een watergehalte van 32% bevatte bij staal A en B en een watergehalte van 18% bij staal I. Deze gehalten werden vastgelegd na bepaling van de vloeigrens (LL) en de uitroigrens (PL). Er werd geopteerd voor een watergehalte dat iets hoger ligt dan de PL.

Voor zowel staal A, B als I werden zwellingscurves (Fig. 26) opgesteld voor het onbehandelde staal (blauwe curve), het mengsel met ongebluste kalk (roze curve) en het mengsel met betonmeel (groene curve). Deze curves werden bekomen door het verloop van de gemeten zwelling uit te zetten in de tijd. Voor staal B is de schaal van de verticale as groter omdat een grotere zwelling werd opgemeten in vergelijking met de andere stalen.

Naast het opstellen van de grafieken, kan de zwelling ook uitgedrukt worden in procenten (Tabel 11). Dit wordt benoemd als de vrije zwelling ('free swell') van een grond (ASTM D4546-96) en wordt als volgt berekend:

$$\text{Zwelling (\%)} = \frac{\Delta h}{h_0} \times 100 \quad (1)$$

met Δh = verschil in hoogte van het monster
 h_0 = initiële hoogte van het monster

Tabel 11 geeft ook de dichtheden en watergehaltes weer van de monsters gebruikt in de zweltest.

Bij de Boomse klei (Fig. 26a) wordt na verloop van 7 dagen een zwelling van 2,2% opgemeten. Door toevoeging van ongebluste kalk en van betonmeel daalt de hoeveelheid zwelling van het grondstaal. Het staal zwelt na toevoeging van ongebluste kalk maar 0,9 %. Na vermenging van de grond met betonmeel wordt nog een zwelling van 1,6% opgemeten. Beide producten verminderen de zwellingscapaciteit van de Boomse klei maar bij ongebluste kalk is de daling groter dan bij betonmeel.

De onbehandelde Ieperse klei (Fig. 26b) zwelt ongeveer 17,4 %. Toevoeging van CaO zorgt voor een drastische daling in deze zwelling, het mengsel (B2) zwelt maar een 0,3% meer. Het mengsel met betonmeel (B3) vertoont nog steeds een duidelijke zwelling (12,9%), maar de zwelling is wel verminderd ten opzichte van het onbehandelde staal (B1). De zwellingscapaciteit van de grond is bij toevoeging van betonmeel gedaald, maar opnieuw niet evenveel als gebeurd bij ongebluste kalk. De zwelling van het staal B3, waaraan betonmeel is toegevoegd, is de eerste 2000 min (of anderhalve dag) hoger dan de zwelling bij het onbehandelde staal B1. De hoeveelheid zwelling bij staal B3 zwakt vlugger af in de loop van de tijd (curve buigt af) en de uiteindelijke zwelling is toch lager dan bij staal B1. De mogelijke oorzaak hiervan is de toevoeging van 20% droog materiaal, waardoor het staal vlugger en meer water kan opnemen (verdere uitleg paragraaf 5.3).

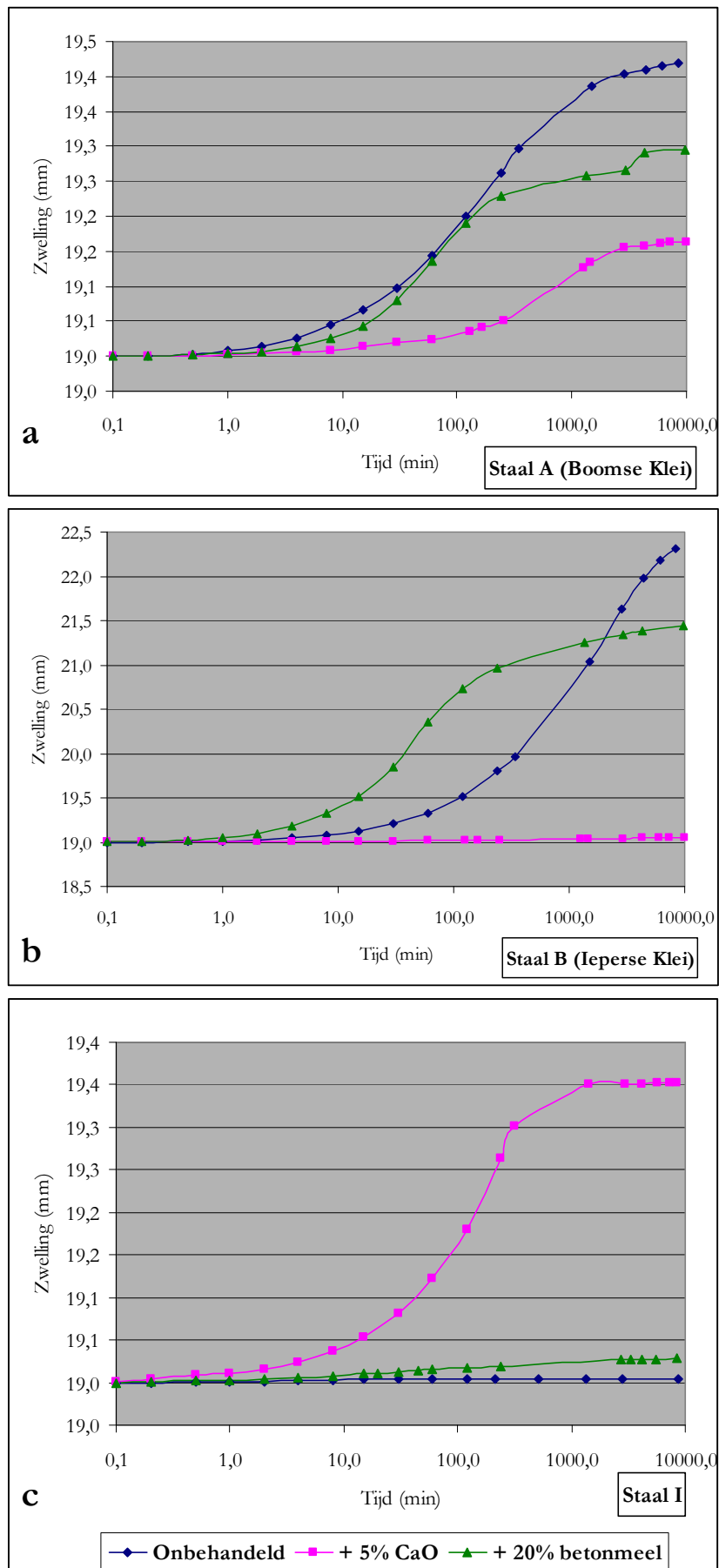
Staal I toont een volledig verschillend patroon in zwellingscurves (Fig. 26c). Hier wordt in het onbehandelde staal (I1) praktisch geen zwelling (<0,1 %) opgemeten. De mengsels met ongebluste kalk (I2) en met betonmeel (I3) van staal I zwellen meer dan I1. Vooral bij staal I2 werd een grotere de zwelling (1,9 %) waargenomen. Toevoeging van het betonmeel bracht weinig verandering in de zwelling (0,1 %).

Het verschillende verloop van de curves wordt waarschijnlijk veroorzaakt door andere elementen zoals een laag kleigehalte en het watergehalte (verdere uitleg paragraaf 5.3).

Tabel 11: Watergehalte, dichtheid en zwelling van stalen A, B en I

Staal	Watergehalte (%)	Dichtheid (g/cm ³)	Zwelling (%)
A1	32,6	1,85	2,2
A2	27,2	1,84	0,9
A3	25,6	1,90	1,6
B1	33,3	1,86	17,4
B2	29,5	1,68	0,3
B3	26,4	1,77	12,9
I1	19,1	2,00	< 0,1
I2	15,8	2,00	1,9
I3	16,2	2,06	0,1

1 = onbehandeld; 2 = +5% CaO; 3 = +20% betonmeel



Figuur 26: Zwellingcurves stalen A, B en I

4.9. Aantasting mineralen

De hoge pH-waarden in de mengsels (mengsels CaO: 12,8 ; mengsels betonmeel: 11 tot 12) veroorzaken een verhoging van de oplosbaarheid van silicium en aluminium. Silicium zou bij hoge pH-waarden kunnen oplossen uit de structuur van het kleimineralen en is dan in staat om te reageren met Ca^{2+} , met vorming van calciumsilicaten tot gevolg (Eades, 1962).

Om na te gaan of de mineraalstructuur van kleimineralen wordt aangetast door de hoge pH-waarden werd gedurende 4 weken de mengsels blootgesteld aan water en dus aan een pH-waarde van hoger dan 11. In de laatste week werd 25 ml 0,01 mol/l natriumhydroxide (NaOH), dat een pH-waarde van 12 heeft, aan de mengsels toegevoegd. Het NaOH was een extra hulpmiddel om de pH hoog genoeg te houden zodanig dat silicium en aluminium eventueel kunnen oplossen.

Van beide soorten mengsels (toevoeging van ongebluste kalk en toevoeging van betonmeel) werd voor en na afloop van de vier weken een X-stralendiffractogram gemaakt van een georiënteerd staal. Door het vergelijken van de X-stralendiffractogrammen kan afgeleid worden of er al dan niet verwerking van de minerale structuur is opgetreden.

In Bijlage III zijn de X-stralendiffractogrammen van alle stalen terug te vinden (staal A tot J). Cijfer 1 staat voor het onbehandelde staal; 2 voor het mengsel met CaO na afloop van de test; 3 voor het mengsel met betonmeel na afloop van de test.

Stalen A, D, F, G, H en J vertonen geen verandering in hun X-stralendiffractogrammen. De pieken 1.45 en 1.50 nm bij resp. staal C en I dalen lichtjes in de opnames van de mengsels C2, C3, I2 en I3. De mengsels van B(2 en 3) en E(2 en 3) (Ieperse Klei) geven een stijging in de pieken 1.50 en 1.25 nm ten opzichte van de stalen voor de test. Bij staal E gaat dit gepaard met een verschuiving van 1.25 naar 1.45 nm.

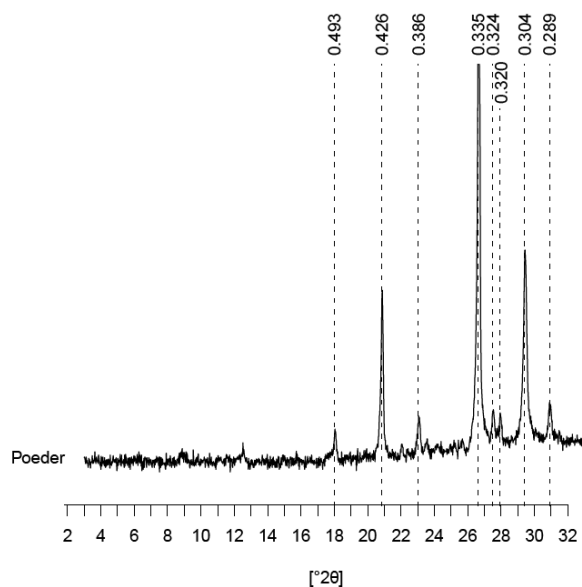
Door de weinige veranderingen in de X-stralendiffractogrammen kan afgeleid worden dat geen grote aantasting van de mineralenroosters heeft plaatsgevonden. Toch dient hierbij vermeld te worden dat de duur van de test mogelijk niet voldoende lang was om significante veranderingen waar te nemen.

4.10. Samenstelling betonmeel

Een chemische totaalanalyse van het betonmeel werd uitgevoerd en de resultaten zijn weergegeven in Tabel 12. Figuur 27 toont het X-stralendiffractogram van een niet-georiënteerd poedermonster van het betonmeel dat voornamelijk bestaat uit kwarts (pieken op 0.426 en 0.335 nm) en calcië (pieken op 0.386 en 0.304 nm). Het bevat ook portlandiet ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) (0.493 nm), veldspaat (0.324 en 0.320 nm) en dolomiet (0.289 nm).

Tabel 12: Totaalanalyse van het betonmeel

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	MnO	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	H ₂ O-	H ₂ O+	Totaal
Beton meel	61,91	2,9	1,84	0	0,6	18,49	0,72	0,35	0,61	0,08	1,99	11,13	100,09



Figuur 27: X-stralendiffractogram van een poedermonster van het betonmeel

5. DISCUSSIE

Dit onderzoek betreft de analyse van grondstabilisatie met ongebluste kalk en een eventueel alternatief materiaal, betonmeel. Door de uitvoering van verschillende analyses werd data verzameld over mengsels van grond met ongebluste kalk en met betonmeel. Deze data wordt, met behulp van de bestaande literatuur, geïnterpreteerd en aan een kritisch oog onderworpen.

In het verleden is reeds veel onderzoek gebeurd naar de reacties die plaatsvinden bij grondstabilisatie met kalk. Hieruit volgt dat deze reacties praktisch volledig gekend en begrepen zijn. Als kalk ter stabilisatie aan een grond wordt toegevoegd, vinden ionuitwisseling, flocculatie en puzzolane reacties plaats (Sherwood, 1993; Bell, 1996; Bergado et al., 1996; Eren & Filiz, 2009). Specifiek voor de toevoeging van ongebluste kalk, is de dehydratie van de grond die aan deze reacties vooraf gaat. Deze dehydratie wordt veroorzaakt door de exotherme reactie tussen CaO en het water aanwezig in de grond waarbij gebluste kalk Ca(OH)_2 gevormd wordt.



De vrijgekomen warmte zorgt volgens verschillende auteurs (Handy & Williams, 1967; Rogers & Glendinning, 1996) voor extra verdamping van het poriënwater. Ongebluste kalk wordt dan ook specifiek gebruikt wanneer een daling in het watergehalte van een grond gewenst is.

De reacties (ionuitwisseling, flocculatie en puzzolane reactie) die plaatsvinden ten gevolge van toevoeging van kalk aan een grond veranderen chemische, fysische en mineralogische eigenschappen van die grond. Deze veranderingen worden hieronder besproken.

5.1. Veranderingen in chemische eigenschappen

De reacties, ionuitwisseling en flocculatie, die volgens Sherwood (1993) behoren tot het onderdeel modificatie van grondstabilisatie, kunnen met behulp van verschillende resultaten van de uitgevoerde analyses aangetoond worden.

Wanneer de gebluste kalk (Ca(OH)_2), gevormd door de exotherme reactie (m), in de aanwezigheid van water komt, dissocieert deze in Ca^{2+} en OH^- met een stijging van de pH van de grond tot gevolg.



Bij alle mengsels met ongebluste kalk (staal A tot J) wordt een hoge pH gemeten met een gemiddelde van 12,8 (Tabel 6). Hierdoor stijgt de oplosbaarheid van silicium en aluminium die dan verder kunnen reageren met calcium tot cementerende elementen zoals gehydrateerde calciumsilicaten (CSH) en gehydrateerde calcium-aluminaten (CAH). Bij grondstabilisatie met kalk is de vorming van deze producten een belangrijk onderdeel van het stabiliserende effect. Davidson (1965) stelde dat een pH van minimum 10,5 vereist is voor het kunnen doorgaan van puzzolane reacties. In de mengsels met betonmeel wordt een gemiddelde pH-waarde van 11,7 gemeten. Dit geeft aan dat ook hier de oplosbaarheid van silicium en aluminium stijgt en puzzolane reacties kunnen plaatsvinden. De vorming van CSH of CAH echter, kan alleen doorgaan als er ook voldoende calcium aanwezig is.

Na toevoeging van kalk aan een kleigrond vindt kationuitwisseling plaats tussen Ca^{2+} , afkomstig van de kalk, en de kationen gebonden op het colloïdale oppervlak totdat het oppervlak volledig verzadigd is met Ca^{2+} -ionen. Deze ionen worden op het colloïdale oppervlak gefixeerd en zijn niet meer beschikbaar voor puzzolane reacties. Het punt van volledige verzadiging werd door Hilt en Davidson (1960) benoemd als het kalkfixatiepunt. Toevoeging van kalk voorbij dit punt brengt geen veranderingen meer teweeg in de plasticiteitsgrens en zodoende is de kalk beschikbaar voor puzzolane reacties die de sterkte van een grond verhogen (Bell, 1996).

Tevens door reactie (o) stijgt de hoeveelheid Ca^{2+} -ionen in een grond. Een opmerkelijke stijging van de Ca^{2+} -ionen werd gemeten in de mengsels met CaO (staal A2 tot J2) bij de analyse van de water-oplosbare zouten (Tabel 10). Door de grote stijging aan Ca^{2+} kan er van uitgegaan worden dat in deze mengsels voldoende calcium aanwezig is voor plaatsvinden van puzzolane reacties.

De toevoeging van het betonmeel brengt slechts een hele lichte stijging van Ca^{2+} -ionen teweeg, hier is het mogelijk dat te weinig Ca^{2+} in de mengsels aanwezig is om cementerende elementen als CSH en CAH te kunnen vormen. De puzzolane reactie (vorming van CSH en CAH) is een belangrijk onderdeel van het stabiliserende effect van toevoeging van materialen (zoals kalk en cement) aan een grond bij grondstabilisatie. Dit wordt verder besproken in paragraaf 5.4.

Door de kationuitwisseling van de monovalente kationen op het colloïdale oppervlak door Ca^{2+} verkleint de diffuse dubbellaag. Calcium zorgt voor een grotere aantrekking tussen kleipartikels waardoor de partikels zich dichter bij elkaar kunnen bevinden. Een grotere aantrekking heeft de vorming van aggregaten en flocculatie tot gevolg. Een indicatie van deze reacties is te vinden in de vermindering van waterdispergeerbare klei (WDK) in de mengsels met additieven (Tabel 8) en in een daling van het totaal specifiek oppervlak (TSO) (Tabel 9). De mate waarin een grond in staat is om kationen uit te wisselen wordt uitgedrukt in de kationuitwisselingscapaciteit (CEC) van een grond. De drie eigenschappen CEC, WDK en TSO worden hieronder besproken.

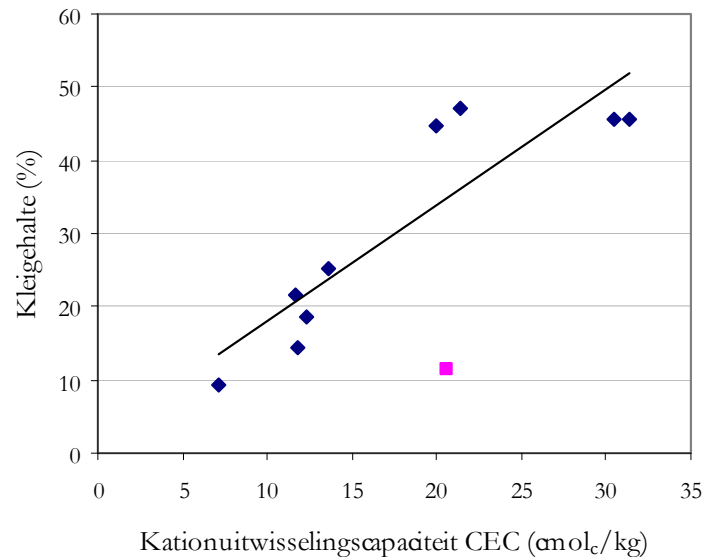
Kationuitwisselingscapaciteit

De kationuitwisselingscapaciteit (CEC) van een grond correspondeert met het aantal negatieve ladingen aanwezig op het colloïdale oppervlak. Deze negatieve ladingen worden gecompenseerd met kationen zoals Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^{+} en K^{+} die zich in de diffuse dubbellaag bevinden en bijgevolg gemakkelijk door elkaar uitgewisseld kunnen worden. Dit zijn de uitwisselbare kationen en de som van de kationen aanwezig in de diffuse dubbellaag duidt de kationuitwisselingscapaciteit (CEC) van een grond aan. De CEC is afhankelijk van (1) de hoeveelheid klei, (2) het type klei dat aanwezig is in een grond en (3) het gehalte organisch materiaal (Pansu & Gautheyrou, 2006).

Stalen A, B, D, E en H hebben een hoge CEC van 20 cmol_c/kg en meer (Tabel 7). Buiten staal H, bevatten deze allemaal een kleigehalte van ongeveer 46% (Tabel 5). Voor stalen C, F, G, en I ligt de CEC rond 12 cmol_c/kg . Het kleigehalte van deze stalen is gemiddeld 20%. Staal J heeft een lage CEC van ongeveer 7 cmol_c/kg en een kleigehalte van 9%. Uit de metingen kan afgeleid worden dat een hoge positieve correlatie ($r = 0,78$) bestaat tussen de CEC en het kleigehalte van een grond. Staal H valt echter wat buiten deze correlatie tussen CEC en kleigehalte (Fig. 28), het heeft een CEC van 20 cmol_c/kg en een kleigehalte van 12%. Een tweede belangrijke factor in de bepaling van de CEC is het gehalte aan organisch materiaal (Bijlage I, OC (%)). In vergelijking met de andere stalen bevat staal H meer organisch materiaal, ongeveer 3%, waardoor de CEC hoger ligt dan verwacht, uitgaande van het kleigehalte van het staal.

Een hoge CEC wijst op de aanwezigheid van kleimineralen met een zwellende eigenschap (smectieten) terwijl niet-zwellende kleimineralen (vb.: kaolinit) een lage CEC teweeg brengen (Bell, 1996). Na interpretatie van de X-stralendiffractogrammen blijkt duidelijk dat de grootste

zwellend en dus de hoogste hoeveelheid smectieten (reflecties op 1.7 nm) wordt waargenomen bij de stalen A, B, C en D. Dit zijn de stalen die een hoge CEC bevatten. Staal H bezit een veel lagere intensiteit in de reflectie voor smectiet (Fig. 21). De hoge CEC van staal H is, zoals eerder vermeld, het gevolg van een hoger gehalte aan organisch materiaal, niet door een hoog kleigehalte.



Figuur 28: Correlatie tussen kationuitwisselingscapaciteit CEC en het kleigehalte (stalen A tot J)

Een grond die een hoge CEC bevat, wisselt gemakkelijker kationen uit en zal dus een groter effect ondervinden van de toevoeging van kalk. Door opname van Ca^{2+} in de diffuse dubbellaag wordt de aantrekking tussen kleipartikels groter en zullen partikels aggregaten vormen en flocculeren. De stabiliteit van de grond vergroot hierdoor.

Waterdispergeerbare klei

De waterdispergeerbare klei (WDK) duidt de hoeveelheid klei aan, aanwezig in een grond, die dispergeert in water. Een aannemelijk gevolg hiervan is dat de hoeveelheid WDK stijgt met de totale hoeveelheid klei (TK) in een grond. Dit wordt aangetoond door een hoge correlatie van 0,84 tussen het kleigehalte (TK) van de onbehandelde stalen en de waterdispergeerbare klei (WDK).

Na toevoeging van ongebluste kalk geven stalen A, B, D, E en F een duidelijke daling in WDK. Dit zijn de stalen die een hoog kleigehalte bevatten en/of gewassen met NaOAc waardoor het natriumgehalte van het staal hoger ligt en partikels hier vlugger kunnen dispergeren. De mengsels met betonmeel (A3 tot J3) vertonen bij alle stalen een grotere daling in WDK dan de mengsels met ongebluste kalk (A2 tot J2). Voor de onbehandelde stalen is de hoeveelheid waterdispergeerbare klei gelegen tussen 2 en 40%. De hoeveelheid WDK na toevoeging van betonmeel ligt tussen 2 en 6%, na toevoeging van CaO ligt de WDK tussen 6 en 10%.

Bij grondstabilisatie met ongebluste kalk is flocculatie het gevolg van kationuitwisseling met Ca^{2+} -ionen die aan de grond worden toegevoegd. Echter, bij de mengsels met betonmeel liggen de concentraties aan Ca^{2+} -ionen (Tabel 10) in de waterextracten beduidend lager ligt dan bij de mengsels met ongebluste kalk maar wordt wel een grote daling in waterdispergeerbare klei waargenomen. Mogelijk is de grotere daling bij mengsels met betonmeel het gevolg van de toevoeging van een vier keer grotere hoeveelheid additief, 20% betonmeel ten aanzien van 5% ongebluste kalk.

De daling in WDK toont aan dat minder klei dispergeert, er ontstaat door de toevoeging van de additieven een grotere aantrekking tussen de kleipartikels, waardoor kleipartikels minder ver uiteen bewegen en minder water kan opgenomen worden in de interlamellaire lagen. De capaciteit van een grond om te zwellen vermindert dan ook. De verhouding van de WDK ten opzichte van de TK (formule j) is een indicatie van stabiliteit (Tabel 8). Hieruit komt naar voor dat de toevoeging van betonmeel, uitgaande van de WDK, een beter stabiliserend effect geeft dan toevoeging van ongebluste kalk.

Zoals eerder aangehaald, heeft de concentratie Na^+ een invloed op de dispergeerbaarheid van een grond (Rengasamy & Olson, 1991). Een hogere concentratie aan Na^+ veroorzaakt meer dispersie van kleimineralen en zorgt bijgevolg voor een grotere zwelling van de grond. Een parameter die kan berekend worden (formule k) is het percentage aan basische kationen (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ en Na^+) dat ingenomen wordt door natrium $\text{Na}^+(\%)$. Algemeen wordt aangenomen dat hoe minder percentage van de basische kationen ingenomen wordt door Na^+ , hoe kleiner de invloed van Na^+ op de kleimineralen waardoor minder zwelling van een grond zal optreden. Uit deze resultaten blijkt dat door toevoeging van betonmeel de zwelling, beïnvloedt door de aanwezigheid van Na^+ -ionen, niet veel verandering zal ondervinden Dit is wel het geval bij toevoeging van ongebluste kalk waar een duidelijk vermindering optreedt.

Totaal Specifiek Oppervlak

Het totaal specifiek oppervlak (TSO) is afhankelijk van de grootte en de vorm van een kleipartikel. Hoe kleiner een deeltje, hoe groter de verhouding is van oppervlak tot volume van het deeltje en hoe groter het TSO. Het meten van het TSO geeft bijgevolg een indicatie van de korrelgrootte van het materiaal. Een grotere TSO verhoogt de opname van ionen en moleculen aan het colloïdale oppervlak (White, 2003). Wanneer kleipartikels kationuitwisseling ondergaan tussen de Ca^{2+} , afkomstig van de toegevoegde kalk, en het colloïde oppervlak, vormen kleipartikels, zoals reeds vermeld, aggregaten en gaan flocculeren. Door de vorming van aggregaten worden partikels groter en daalt de oppervlakte/volume-verhouding en bijgevolg het TSO van een deeltje.

Een daling in TSO is zichtbaar (Tabel 9) zowel na de toevoeging van ongebluste kalk als na toevoeging van betonmeel bij de verschillende grondstalen. De vermindering in TSO is groter bij de mengsels met betonmeel voor stalen A, B, C en D. Het TSO daalt meer na de toevoeging van ongebluste kalk bij stalen H, I en J.

Zowel de kationuitwisselingscapaciteit (CEC) als de waterdispergeerbare klei (WDC) en het totaal specifiek oppervlak (TSO) zijn parameters die afhankelijk zijn van het kleigehalte in een grond. Naast de correlatie tussen het kleigehalte en de CEC is ook een grote positieve correlatie te vinden tussen CEC en WDC ($r = 0,77$) en tussen CEC en TSO ($r = 0,93$). De correlatie CEC-TSO komt neer op het feit dat hoe groter het colloïdale oppervlak is, hoe meer plaats aanwezig is waar kationuitwisseling kan plaatsvinden.

Uit de analyses van zowel waterdispergeerbare klei als totaal specifiek oppervlak van onbehandelde stalen en mengsels met 5% ongebluste kalk en 20% betonmeel wordt aangenomen dat door toevoeging van de producten aggregaten gevormd worden en flocculatie optreedt in de stalen. Beide reacties spelen een belangrijke rol in de aanpassing van de technische eigenschappen (modificatie) die nodig zijn ter stabilisatie van een grond.

5.2. Veranderingen in mineralogische eigenschappen

Zwelling van een grond treedt op wanneer 2:1 kleimineralen, en meer bepaald smectieten in een grond aanwezig zijn. Smectieten hebben de eigenschap om een hoeveelheid water op te nemen in hun interlamellaire ruimte waardoor de kristallijne zwelling overschreden wordt. Deze zwelling, veroorzaakt door een osmotische druk kan zover doorgaan totdat de kleipartikels volledig van elkaar gescheiden zijn en de grond disperseert in de aanwezigheid van water (Norrish, 1954).

Een vereiste voor constructiewerken is dat de grond waarop gebouwd wordt een zo laag mogelijke capaciteit tot zwellen bevat. Dit wordt nagestreefd door middel van grondstabilisatie met producten zoals kalk en cement. De eventuele verandering in zwelling door toevoeging van ongebluste kalk en betonmeel wordt waargenomen met X-stralendiffractie van de stalen. Zowel van de onbehandelde stalen, voor en na een glycolbehandeling, als van de mengsels met ongebluste kalk en met betonmeel, na glycolbehandeling, wordt een X-stralendiffractogram opgesteld. Intercalatie van 2:1 kleimineralen met ethyleenglycol is een algemeen erkende techniek ter identificatie van smectieten in een kleimonster. Wanneer na een glycolbehandeling de basale reflectie in het X-stralendiffractogram verschuift van 1.4 nm naar een karakteriserende 1.7 nm, bevat het grondmonster smectieten (Mosser-Ruck et al., 2005).

Na glycolbehandeling is bij de onbehandelde stalen van de Boomse klei, de Ieperse klei en een leemgrond (A1, B1, C1, D1, E1, F1 en I1) een verschuiving zichtbaar van 1.4 naar 1.7 nm (resp. Fig. 13, 15 en 17; Bijlage II 2b, 4b en 6b; Fig. 23), wat wijst op de aanwezigheid van smectieten in de grond. Bij stalen G1, H1 en J1 (baggerspecie en leemgronden) hebben de reflecties een veel lagere intensiteit waardoor minder duidelijk kan afgeleid worden of na glycolering de stalen zwelling zullen ondervinden. Uit de X-stralendiffractogrammen van de mengsels met ongebluste kalk en met betonmeel na glycolering kan waargenomen worden wat het effect van de toegevoegde materialen is op de zwelling. Zowel toevoeging van ongebluste kalk als toevoeging van betonmeel brengt een daling in de intensiteit van de piek rond 1.7 nm (na glycolering typerend voor smectieten) teweeg bij alle stalen.

Algemeen kan worden afgeleid dat de daling in de intensiteit van de reflectie op 1.7 nm groter is in de mengsels met ongebluste kalk ten opzichte van de mengsels met betonmeel. In stalen G, H en J zijn de reflecties minder intens ten gevolge van een lager kleigehalte. Het effect van de toegevoegde producten is hier dan ook moeilijker zichtbaar dan bij de andere stalen. Anderzijds

zijn de reflecties van de smectieten en de vermindering in intensiteit van de pieken duidelijker zichtbaar bij de stalen met een hoog kleigehalte (A, B, C en D).

Een daling in intensiteit van de reflecties kenmerkend voor mica en kaolinit (respectievelijk 1.00 en 0.72 nm) is zichtbaar bij stalen A tot G (Bijlage II), na toevoeging van de producten ongebluste kalk en betonmeel aan de gronden. Volgens Eades & Grim (1960) suggereert de daling in intensiteit van de kaolinit-reflecties ook een gevolg is van een reactie tussen kalk en kaolinit. Bell (1996) toonde aan met behulp van scanning elektron microscopie (SEM) dat de randen van de kaolinit partikels werden aangevallen door de kalk en deze een rafelig uiterlijk gaf. Dit stemt overeen met de suggesties van Eades & Grim (1960).

De vermindering in zwellings treedt op door reacties met elementen aangebracht door ongebluste kalk en betonmeel. Een gekende reactie is de kationuitwisseling tussen Ca^{2+} van de kalk en het colloïdale oppervlak. Ca^{2+} wordt aan het oppervlak gebonden en veroorzaakt een verandering in de dichtheid van ladingen aan het oppervlak van het kleipartikel. Hierdoor verkleint de dikte van de diffuse laag en vermindert de zwellings van een grond. De vermindering in hoeveelheid smectieten zichtbaar in de X-stralendiffractogrammen is groter bij toevoeging van ongebluste kalk dan bij toevoeging van betonmeel. Als minder smectieten aanwezig zijn in een grond, wordt minder water door de grond opgenomen. De grond is minder goed in staat om te zwellen wat een verhoging in stabiliteit betekent.

5.3. Veranderingen in fysische eigenschappen

Zoals eerder vermeld wordt in dit onderzoek geanalyseerd welke effecten toevoeging van ongebluste kalk en betonmeel hebben op de zwelling van een grond in het kader van grondstabilisatie. De zweltest is een fysische test die werd uitgevoerd om de zwelling te kunnen kwantificeren. Hierbij werd de eendimensionale zwelling van een grond opgemeten gedurende de tijd met een opgelegde druk van 1kPa en werden zwellingscurves opgesteld (Fig. 26).

De zwellingscurves van stalen A en B geven aan dat de grootste zwelling plaatsvindt in de monsters zonder behandeling. De capaciteit om te zwellen wordt meer gereduceerd door toevoeging van ongebluste kalk dan door betonmeel. Zwelling wordt bij vermenging met kalk gereduceerd doordat verschillende reacties zoals kationuitwisseling en flocculatie (Bell, 1996; Bergado et al., 1996; Eren & Filiz, 2009) plaatshebben. Vermindering van de diffuse dubbellaag en een grotere aantrekking tussen kleipartikels dragen bij tot een lagere zwellingcapaciteit.

De kleinere daling in zwellingcapaciteit ten gevolge van toevoeging van betonmeel (Fig. 26a en 26b, groene curves) duidt aan dat reacties als kationuitwisseling en flocculatie in mengsels met betonmeel minder plaatsgrijpen. In de mineralogische analyse met X-stralendiffractie werd ook een kleiner effect van betonmeel op de zwellingcapaciteit van een grond waargenomen. Dit werd afgeleid uit de kleinere vermindering in intensiteit van de reflecties voor smectiet (1.7 nm) ten opzichte van de vermindering bij mengsels met ongebluste kalk.

Bij staal B heeft de curve van het mengsel met betonmeel (Fig. 26b, groene curve) een ander verloop in vergelijking met staal A. De zwelling ligt initieel hoger dan bij het onbehandelde staal. Na verloop van tijd zwelt het onbehandelde staal B meer dan het mengsel met betonmeel. Een mogelijk oorzaak van deze initiële hogere zwelling is de toevoeging van 20% droog materiaal en de daling in watergehalte die hiermee gepaard gaat. Iedere grond bezit een toestand van maximale zwelling, wat wil zeggen dat de grond voorbij dat punt niet meer in staat is te zwellen. Hoe hoger het initieel watergehalte, hoe minder water een grond kan opnemen om te zwellen tot zijn maximum aangezien reeds een hoeveelheid water aanwezig is tussen de kleipartikels.

De ‘verdroging’ van de grond die plaats vindt door de vermenging van de grond met 20% betonmeel zorgt ervoor dat dit mengsel meer en sneller water kan opnemen. Dit wordt aangeduid door de groene zwellingscurve van staal B (mengsel met betonmeel) die eerst boven de blauwe

curve (onbehandelde staal) komt te liggen. Uiteindelijk zwelt het onbehandelde staal meer dan het mengsel met betonmeel waardoor stabiliserende eigenschappen aan het betonmeel toegewezen kunnen worden.

Een andere patroon wordt waargenomen bij staal I. Het onbehandelde staal ondervond hier de laagste zwelling ($< 0,1\%$). Na behandeling met ongebluste kalk werd een zwelling van $1,9\%$ gemeten, bij behandeling met betonmeel $0,1\%$. Het kleigehalte van staal I ligt rond de 15% , bij staal A en B ligt het rond de 45% . In staal I is dus minder klei aanwezig dat kan zwellen waardoor het effect van de stabiliserende producten ook minder zichtbaar is. Andere factoren, zoals verdroging door toevoeging van de producten en het watergehalte hebben een groter effect hebben dan de verandering in zwelling door ongebluste kalk of betonmeel. Het mengsel met ongebluste kalk (I2) bevat een watergehalte van $15,8\%$, wat minder is dan het watergehalte van het onbehandelde staal I1, $19,1\%$. Het mengsel met betonmeel ligt hier tussen in en heeft een watergehalte van $16,2\%$ (Tabel 11). Zoals eerder vermeld kan een grondmonster met een initieel lager watergehalte een grotere hoeveelheid water opnemen en lijkt dit monster meer te zwellen. Dit is een mogelijke verklaring voor het verloop van de zwellingscurves van staal I, waar het staal met het laagste watergehalte de grootste zwelling vertoont.

Watergehaltes

Tabel 11 bevat de watergehaltes van de stalen A, B en I. Voor de onbehandelde stalen A1 en B1 wordt een hoger watergehalte bepaald dan vooropgesteld was. Dit kan het gevolg zijn van kleine weegfouten tijdens het maken van de mengsels. Een tweede mogelijkheid is dat er reeds water aanwezig was in de gebruikte grond. Voor het drogen van de grond, bij bepaling van het watergehalte, wordt de grond verwarmd tot 105°C in een droogoven. Deze temperaturen kunnen er voor zorgen dat het water aanwezig op het kleicomplex ontsnapt, waardoor de watergehaltes van de onbehandelde stalen hoger zijn dan het beoogde watergehalte. Om verdere interpretatie te kunnen uitvoeren, is het correcter van de watergehaltes te corrigeren naar de vooropgestelde watergehaltes (32% bij staal A en B; 18% bij staal I).

Bij de mengsels met zowel CaO als betonmeel is een daling in het watergehalte zichtbaar. Van stalen A en B is de vermindering in watergehalte bij het mengsel met betonmeel groter dan bij het mengsel met CaO, bij staal I is deze vermindering kleiner. Een eerste oorzaak is de toevoeging van droog materiaal. Als aan 2 kg grond met een watergehalte van 32% , 5% in gewicht droog materiaal wordt toegevoegd, daalt het watergehalte tot $30,4\%$ doordat het totale volume aan

droge grond gestegen is. Bij de toevoeging van 20% extra materiaal daalt het watergehalte tot een 25,6%. Deze theoretisch berekende waarden voor een grond met een watergehalte van 32% worden weergegeven in Tabel 13, dit werd ook berekend voor een watergehalte van 18% aanwezig bij staal I.

Vervolgens wordt het verschil bepaald tussen het watergehalte, gecorrigeerd naar 32% en het theoretisch berekende watergehalte. De verdroging van de grond door toevoeging van een hoeveelheid materiaal wordt uit de rekening gebracht. De verandering in het watergehalte die nu nog plaatsvindt is ten gevolge van reacties tussen het additief en het aanwezige water in een grond.

Tabel 13: Berekeningen met watergehaltes

Staal	Gemeten watergehaltes (%)	Correctie watergehalte (%)	Theoretisch watergehalte (%)	Vershil in watergehalte (%)
A1	32,6	32,0	32,0	0,0
A2	27,2	26,6	30,4	3,8
A3	25,6	25,0	25,6	0,6
B1	33,3	32,0	32,0	0,0
B2	29,5	28,2	30,4	2,2
B3	26,4	25,0	25,6	0,6
I1	19,1	18,0	18,0	0,0
I2	15,8	14,6	17,1	2,5
I3	16,2	15,1	14,4	-0,7

Voor staal A3 is de daling in watergehalte volledig toe te wijzen aan de toevoeging van 20% extra materiaal. Bij het mengsel met CaO (A2) is de daling groter dan de enkel de daling veroorzaakt door de toevoeging van 5% materiaal. Dit zou een daling geven van 1,6% terwijl een daling van ongeveer 6% wordt waargenomen. De oorzaak van de grotere daling is de exotherme reactie die plaatsvindt wanneer ongebluste kalk in aanraking komt met water en calciumhydroxide ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) vormt. Zowel bij staal B3 als I3 is de daling in watergehalte praktisch volledig toe te schrijven aan de toevoeging van 20% droog materiaal. De reactie waarbij $\text{Ca}(\text{OH})_2$ gevormd wordt, zorgt in stalen B2 en I2 voor een vermindering van ong. 2,5% in watergehalte.

Hiermee wordt aangeduid dat een dehydraterende reactie zoals vermeld door Bergado (1996) plaatsvindt bij een grondbehandeling met ongebluste kalk. Ook wordt aangetoond dat deze reactie niet doorgaat in een grond waaraan betonmeel wordt toegevoegd.

Er werd dus aangetoond dat toevoeging van ongebluste kalk het watergehalte ongeveer 2,5% extra (dus bovenop de daling ten gevolge van toevoeging van droog materiaal (5% CaO)) doet

dalen door de exotherme reactie die plaatsvindt. Bij toevoeging van betonmeel wordt ook een lichte daling ($\pm 0,6\%$) in watergehalte waargenomen, naast de daling ten gevolge van toevoeging van 20% droog materiaal. De bekomen cijfers zijn hier slechts een indicatie maar er kan wel uit afgeleid worden dat bij vermenging van gronden met ongebluste kalk een extra vermindering in watergehalte plaatsvindt, wat een grotere stabiliteit van de grond met zich meebrengt. Bij grondbehandeling van betonmeel is de vermindering in watergehalte bijna uitsluitend het gevolg van de toevoeging van 20% droog materiaal.

5.4. Puzzolane reacties

De puzzolane reactie is naast flocculatie en vorming van aggregaten een belangrijke reactie die plaatsvindt bij chemische grondstabilisatie (Bell, 1996; Bergado et al., 1996; Eren & Filiz, 2009). Bij deze reactie worden gehydrateerde calciumsilicaten (CSH) en gehydrateerde calciumaluminaten (CAH) gevormd door de reactie tussen calcium, aluminium en silicium. Deze elementen CSH en CAH vormen een laagje rond en tussen de grondpartikels en zal na verloop van tijd uitharden waardoor de sterkte en stabiliteit van een grond zal toenemen (Rajasekaran, 1996).

In dit onderzoek werden echter geen rechtstreekse aanwijzingen gevonden voor de vorming van deze cementerende materialen CSH en CAH, niet bij toevoeging van ongebluste kalk en ook niet bij toevoeging van betonmeel aan een grond.

Het silicium en/of aluminium nodig voor de puzzolane reactie is bij grondbehandeling met kalk afkomstig van de kleimineralen in de grond. Door de hoge pH, ten gevolge van de dissociatie van $\text{Ca}(\text{OH})_2$, stijgt de oplosbaarheid van silicium en aluminium. Bij de test (paragraaf 4.9) waarbij werd nagegaan of enige significante veranderingen in de structuur van de kleimineralen heeft plaatsgevonden ten gevolge de hogere oplosbaarheid van silicium en aluminium, was het resultaat negatief. De X-stralendiffractogrammen vertoonden geen grote veranderingen na afloop van de test. Echter moet wel opgemerkt worden dat de duur van de test (4 weken) mogelijk niet lang genoeg was. Met behulp van X-stralendiffractie kunnen de gevormde producten CSH en CAH geïdentificeerd worden (Rajasekaran, 1996). In dit onderzoek was het bereik van de 2 theta –hoek niet groot genoeg om de karakteriserende pieken van CSH en CAH te kunnen waarnemen.

Een verder onderzoek zou kunnen bestaan uit het proberen aantonen dat de gevormde cementerende producten gevormd zijn door middel van X-stralendiffractie of Scanning Elektron Microscopie (SEM) bij grondbehandeling met ongebluste kalk en nagaan of dit eventueel ook gevormd wordt na toevoeging van betonmeel aan een grond. Met X-stralendiffractie zouden dan de karakteriserende reflecties voor CSH en CAH kunnen bepaald worden. Met behulp van scanning elektron microscopie kan de vorming van een bindmiddel als CSH en CAH tussen de grondpartikels waargenomen worden (Rajasekaran, 1996). Als zou blijken dat betonmeel puzzolane eigenschappen bevat, zou verder onderzocht kunnen worden of een combinatie van betonmeel en ongebluste kalk ook als een volwaardige grondstabilisator kan toegepast worden. Dit is naar het voorbeeld van hoogovenslak, vliegas of cement die reeds in combinatie met kalk worden gebruikt wanneer in de bodem te weinig silicium en/of aluminium aanwezig voor het laten doorgaan van de puzzolane reactie. In de bepaling van combinaties betonmeel-ongebliste kalk zou zeker rekening moeten gehouden worden met de economische rendabiliteit van het mengsel als grondstabilisator.

6. CONCLUSIE

In dit onderzoek werd nagegaan of betonmeel, afkomstig uit bouw- en sloopafval, als alternatief product van ongebluste kalk bij grondstabilisatie kan worden toegepast. Verschillende grondsoorten werden behandeld met 5% ongebluste kalk en met 20% betonmeel waarna chemische, mineralogische en fysische veranderingen aan de hand van verschillende testen werden geanalyseerd.

De resultaten van dit onderzoek zijn als volgt:

- (1) Zowel bij behandeling van een grond met ongebluste kalk als bij behandeling met betonmeel vond een daling plaats in de hoeveelheid waterdispergeerbare klei en in het totale specifiek oppervlak. Dit geeft aan dat de aantrekking tussen kleipartikels groter wordt, aggregaten worden gevormd en flocculering van de kleipartikels optreedt. Hierdoor daalt de plasticiteit en de zwellingscapaciteit van een grond. De daling in de hoeveelheid waterdispergeerbare klei en het totaal specifiek oppervlak is groter bij grondbehandeling met betonmeel waardoor ook meer flocculering van de partikels optreedt. De flocculeringsreactie is één van de belangrijke aspecten van grondstabilisatie dus hoe meer deze reactie plaatsvindt, hoe groter de stijging in stabiliteit.
- (2) Bij mineralogische en fysische analyses (met onder andere de zweltest) werd vastgesteld dat toevoeging van betonmeel een verminderde maar nog steeds aanzienlijke zwelling van de grond plaatsvindt. In vergelijking met stabilisatie van een grond door toevoeging van ongebluste kalk is deze vermindering niet voldoende om met betonmeel alleen een gelijkwaardige stabilisatie te bekomen.
- (3) Typerend voor ongebluste kalk is de exotherme reactie die plaatsvindt wanneer het in aanraking komt met het poriënwater van een grond. Deze reactie zorgt samen met de kationuitwisseling tussen kalk en de aanwezige kleimineralen voor een daling in watergehalte van een grond en bijgevolg een stijging in stabiliteit. Deze reactie werd niet teruggevonden bij grondbehandeling met betonmeel. Daar is de daling in watergehalte bijna uitsluitend het gevolg van toevoeging van 20% droog materiaal aan een grond.

- (4) Een ander belangrijke aspect bij grondstabilisatie is het plaatsvinden van de puzzolane reactie waarbij cementerende producten gevormd worden door het reageren en hydrateren van calcium, silicium en aluminium. Bewijzen voor het doorgaan van deze reactie zijn niet teruggevonden, al werd wel bij zowel de toevoeging van betonmeel als die van ongebluste kalk een alkalisch milieu in de grond veroorzaakt, wat een vereiste is voor het kunnen doorgaan van de puzzolane reactie.

Algemeen uit de blijkt testen dat de toepassing van betonmeel als grondstabilisator zelfs in een concentratie van 20%, wat de maximale hoeveelheid is voor economische rendabiliteit, geen volwaardig alternatief is voor grondstabilisatie met ongebluste kalk.

Een mogelijkheid voor verder onderzoek is het gebruik van een combinatie van ongebluste kalk en betonmeel als grondstabilisator, naar het voorbeeld van hoogovenslak, vliegas of cement die reeds in combinatie met ongebluste kalk worden gebruikt wanneer in de bodem te weinig silicium en/of aluminium aanwezig voor het laten doorgaan van de puzzolane reactie. Er zou moeten verder onderzocht worden of betonmeel voldoende puzzolane eigenschappen bevat en zo ja, in welke verhoudingen een mengsel van betonmeel en ongebluste kalk een volwaardige stabiliserend product vormt dat voor grondstabilisatie kan aangewend worden. Het verder onderzoek naar een product bestaande uit een evenwichtige combinatie van ongebluste kalk en betonmeel kan mogelijks leiden tot een economisch rendabel product, met goede stabiliserende eigenschappen.

7. REFERENCES

- Abboud, M.M., 1973. *Mechanical properties of cement-treated soils in relation to their use in embankment construction*. Ph. D dissertation, University of California, Berkeley, CA.
- Anderson, L. R., Miura, N., Balasubramaniam, A. S., Bergado, D. T., 1996. *Soft ground improvement: in lowland and other environments*. American Society of Civil Engineers, 427p.
- ASTM D698 - 07e1 *Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort* (12 400 ft-lbf/ft³ (600 kN-m/m³))
- Bell, F.G., 1993. *Engineering treatment of soils*. Taylor & Francis, 302p.
- Bell, F., G., 1996. Lime stabilization of clay minerals and soils. *Engineering Geology* 42, 223-237.
- Bergado, D. T., Anderson, L. R., Miura, N. and Balasubramaniam, A. S., 1996. *Soft Ground Improvement in Lowland and other Environments*. ASCE Press, ASCE, New York, USA.
- Bogue, R. H., 1947. *Chemistry of Portland Cement*. Rhinehold, New York.
- Coduto, D.P., 1999. *Geotechnical engineering, principles and practices*. California State Polytechnic University, Pomona.
- Davidson, L.K., Demirel, T., Handy, R.I., 1965. Soil Pulverization and Lime Migration in Soil Lime Stabilization. *Highway Research Record*, No. 92, Highway Research Board, Washington, D.C., pp. 103-126.
- De Batist, M., Verniers, J., 2005. *Geologie van België*. Universiteit Gent.
- Delville, A., 2002. Influence of electrostatic forces on the stability and mechanical properties of clay suspensions. In: Di Maio, C., Hueckel, T., Loret, B., 2002. *Chemo-Mechanical Coupling in Clays: From Nano-Scale to Engineering applications*. Swets and Zeitlinger, Lisse, 339p.
- De Schepper, M., 2009. *Volledig recycleerbaar beton voor een meer milieuvriendelijke bouwsector*. Masterscriptie, Universiteit Gent, Faculteit Ingenieurswetenschappen, Vakgroep Architectuur en stedenbouw, 176p.
- Eades, J.L., Grim, R., 1960. Reactions of hydrated lime with pure clay minerals in soil stabilization. *Highway Res. Board Bull.*, 262, 51–63.
- Eades, J. L., 1962. *Reactions of Ca(OH)₂ with Clay Minerals in Soil Stabilization*. Unpublished Ph.D. dissertation, University of Illinois.
- EBN, 1993. Cement and Concrete: Environmental Considerations. *Environmental Building News*, Volume 2, No. 2, March/April.
- Eren, S., Filiz, M., 2009. Comparing the conventional soil stabilization methods to the consoled system used as an alternative admixture matter in Isparta Daridere material. *Construction and Builing Materials* 23, pages 2473-2480.

- Frigione, G., 2002. Gypsum in cement. In: *Advances in cement technology: chemistry, manufacture and testing*. Tech Books International, 2002, 2^{de} ed., New Delhi, India, 804 p.
- Grim, R.E. 1953. *Clay Mineralogy*. McGraw-Hill, New York City, NY.
- Gullentops, F., Wouters, L., 1996. *Delfstoffen in Vlaanderen*. Antilope, Lier.
- Guney, Y., Sari, D., Cetin, M., Tuncan, M., 2005. Impact of cyclic wetting-drying on swelling behavior of lime-stabilized soil. *Building and Environment* 42, 681-688, 2007, Elsevier Ltd.
- Handy, R.L., Williams, W.W., Chemical Stabilization of an active landslide. *Civil Engineering*, ASCE, 1967.
- Ingles, O.H., 1987. Soil stabilization, Chapter 38. In: F.G. Bell (Editor), *Ground Engineer's Reference Book*. Butterworths, London, 38/1-38/26.
- Little, D.L. 1987. Fundamentals of the Stabilization of Soil With Lime, *Bulletin 332*. NLA, Arlington, VA.
- Little, D.N., Males, E.H., Prusinski, J.R., Stewart, B., 2000. Cementitious Stabilization. *Transportation Research Board (TRB)*, Millenium Papers A2J01, Louisiana State University.
- Lo, S.R., Wardani, S.P.R., 2002. Strength and dilatancy of a stabilized by a cement and fly ash mixture. *Canadian Geotechnical Journal*, 39 (1), 77–89.
- Lorenzo, A.L., Bergado, D.T., 2004. Fundamental parameters of cement-admixed clay - new approach. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE 130 (10), 1042–1050.
- MacPhee, D.E., Lachowski, E.E., 1998. Cement Compositions and Their Phase Relations. In: *Lea's Chemistry of Cement and Concrete*, 4th ed., Hewlett, P. C., Ed.; Arnold: London.
- Mallela, J., Quintus, H.P.E., Smith, K.L., 2004. *Consideration of lime-stabilized layers in mechanistic-empirical pavement design*. ERES Consultants, A Division of Applied Research Associates, Inc, Champaign.
- Mitchell, J.K., 1976. *The Properties of Cement-Stabilized Soils, Proceeding of Residential Workshop on Materials and Methods for Low Cost Road, Rail, and Reclamation Works*. Leura, Australia. Unisearch Ltd.
- Moore, R.K., 1987. Lime stabilization: reactions, properties, design and construction. State of the Art Report, No. 5. *Transportation Research Board*, National Research Council, Washington, DC.
- Moropoulou, A., Bakolas, A., Aggelakopoulou, E., 2001. The effects of limestone characteristics and calcination temperature to the reactivity of the quicklime. *Cement and Concrete Research* 31, pages 633-639.
- Mosser-Ruck, R., Devineau, K., Charpentier, D. and Cathelineau, M., 2005. Effects of ethylene glycol saturation protocols on XRD patterns: a critical review and discussion. *Clays and Clay Minerals* 53, pp. 631–638

- Nelson, J.D., Miller, D.J., 1992. *Expansive soils - problems and practice in foundation and pavement engineering*. John Wiley and Sons Incorporation, New York.
- Nicholson, P.G. and Kashyap, V., 1993. Fly Ash Stabilization of Tropical Hawaiian Soils, *ASCE Geotechnical Publication*, No. 36, Sheng, D. and Sloan, S. W., Eds, New York, pp. 15–29.
- Norrish K., 1954. The swelling of montmorillonite. *Discussions Faraday Society* 18, pp. 120–134
- Norrish, K., 1973. *Forces between clay particles*, in Proc. Int. Clay Conf., Serratosa, J. M., Ed., Division de ciencias C.S.I.C., Madrid, Spain, 375p
- Oikonomou; N.,D., 2005. Recycled concrete aggregates. *Cement and Concrete Composites* Vol. 27, Issue 2, pp. 315–318.
- OVAM, 1995. *Uitvoeringsplan Bonn- en slooppafval*. Reeks beleidsdocumenten afvalstoffen D/1995/5024/01, mei 1995.
- Pansu, M., Gautheyrou, J., 2006. *Handbook of soil analysis Mineralogical, organic and inorganic methods*. Springer, 993p.
- Purushothama Raj, P., 1999. *Ground Improvement Techniques*. Laxmi Publications (P) LTD, New Delhi, 266p
- Rajasekaran, G., Murali, K., Srinivasaraghavan, R., 1996. Fabric and mineralogical studies on lime treated marine clays. *Ocean Engineering*, Vol. 24, No. 3, pp. 227-234, Elsevier Science Ltd, Great Britain.
- Rengasamy, P., Olson, K. A., 1991. Sodicity and soil structure. *Australian Journal of Soil Research*, 29: 935-952.
- Rogers, C.D.F., Glendinning, S., 1996. Modification of clay soils using lime. In: Rogers, C.D.F., Glendinning, S., Dixon, N. (Eds.), *Lime Stabilisation*. Thomas Telford, London, pp 99-114.
- Sariosseiri, F., Muhunthan, B., 2009. Effect of cement treatment on geotechnical properties of some Washington State soils. *Engineering Geology*, Volume 104, Issues 1-2, 24 February 2009, Pages 119-125.
- Sharma, H.D., Reddy, K.R., 2004. *Geoenvironmental Engineering: Site Remediation, Waste Containment and Engineering Waste Management Technologies*. John Wiley & Sons, Inc. 968p.
- Sherwood, P.T., 1993. Soil Stabilization with Cement and Lime: State-of-the-Art Review. *Transport Research Laboratory*, Her Majesty's Stationery Office, London.
- Sparks, D.L., 1998. *Soil physical chemistry* 2nd ed., CRC Press LLC
- Van Impe, W.F., Verastegui Flores, R.D., Mengé, P., Van den Broeck, M., 2007. *Ground improvement by deep mixing*. Taylor & Francis Group, LLC.
- Van Ranst, E., 2006. *Analysis and Dynamics of Clays*, Universiteit Gent, p. 241.

- Van Reeuwijk, L.P., 2002. *Procedure for soil analysis*. International Soil Reference And Information Centre (ISRIC), sixth ed.
- White, R. E., 2003. *Principles and practice of soil science: the soil as a natural resource*, 3rd ed, Blackwell Science.
- Wild, S., Kinuthia, J.M., Jones, G.I., Higgins, D.D., 1998. Effects of partial substitution of lime with ground granulated blast furnace slag (GGBS) on the strength properties of lime-stabilised sulphate-bearing clay soils. *Engineering Geology* 51, pages 37–53.
- Winterkorn, H.F. (1975), "Soil stabilization", in Winterkorn, H.F., Fang, H.Y. (Eds), *Foundation Engineering Handbook*, Van Nostrand Reinhold, New York, NY, In: J.D Nelson and D.J Miller, *Expansive soils—problems and practice in foundation and pavement engineering*, John Wiley and Sons Incorporation, New York (1992).
- Uddin, K., Balasubramaniam, A.S., Bergardo, D.T., 1997. Engineering behaviors of cement-treated Bangkok soft clay. *Geotechnical Engineering Journal* 28 (1), 89–119.

LIJST VAN FIGUREN

- Figuur 1 : Samenstelling bouw- en sloopafval (een benadering) (Oikonomou, 2005)
- Figuur 2 : T-O structuur van een kleimineraal (Van Ranst, 2006)
- Figuur 3 : T-O-T structuur van een kleimineraal (Van Ranst, 2006)
- Figuur 4 : Verdeling van elektrische ladingen aan een negatief geladen oppervlak volgens (a) het Gouy-Chapman model en (b) het Stern model
- Figuur 5 : Dagzoomgebied van de Boomse klei (Gullentops & Wouters, 1996)
- Figuur 6 : Verbreiding van leem in Vlaanderen
- Figuur 7 : Kalkproductie fabriek (AustStab Technical Note, 2008)
- Figuur 8 : a) Proctorcompactie met metalen cilinder en hamer en b) oedometer met oedometercel
- Figuur 9 : Schematische voorstelling van scheiding tussen initiële, primaire en secundaire zwellings
- Figuur 10 : Textuurdriehoek voor classificatie volgens USDA
- Figuur 11 : Percentages aan basische kationen ingenomen door Na^+ bij de onbehandelde stalen en mengsels
- Figuur 12 : X-stralendiffractogram van een poedermonster van de Boomse klei (Staal A)
- Figuur 13 : X-stralendiffractogram van een georiënteerd monster van staal A1 en zijn mengsels met ongebluste kalk (A2) en betonmeel (A3); glyc.: glycolbehandeling
- Figuur 14 : X-stralendiffractogram van een poedermonster van de Ieperse klei (Staal B)
- Figuur 15 : X-stralendiffractogram van een georiënteerd monster van staal B1 en zijn mengsels met ongebluste kalk (B2) en betonmeel (B3); glyc.:glycolbehandeling
- Figuur 16 : X-stralendiffractogram van een poedermonster van het leemstaal (Staal C)
- Figuur 17 : X-stralendiffractogram van een georiënteerd monster van staal C1 en zijn mengsels met ongebluste kalk (C2) en betonmeel (C3); glyc.:glycolbehandeling
- Figuur 18 : X-stralendiffractogram van een poedermonster van het loessstaal uit het Zoniënwood (Staal G)
- Figuur 19 : X-stralendiffractogram van een georiënteerd monster van staal G1 en zijn mengsels met ongebluste kalk (G2) en betonmeel (G3); glyc.: glycolbehandeling
- Figuur 20 : X-stralendiffractogram van een poedermonster van de baggerspecie (Staal H)
- Figuur 21 : X-stralendiffractogram van een georiënteerd monster van staal H1 en zijn mengsels met ongebluste kalk (H2) en betonmeel (H3); glyc.: glycolbehandeling

- Figuur 22 : X-stralendiffractogram van een poedermonster van de staal I
- Figuur 23 : X-stralendiffractogram van een georiënteerd monster van staal I1 en zijn mengsels met ongebluste kalk (I2) en betonmeel (I3); glyc.: glycolbehandeling
- Figuur 24 : X-stralendiffractogram van een poedermonster van de staal J
- Figuur 25 : X-stralendiffractogram van een georiënteerd monster van staal J1 en zijn mengsels met ongebluste kalk (J2) en betonmeel (J3); glyc.: glycolbehandeling
- Figuur 26 : Zwellingscurves stalen A, B en I
- Figuur 27 : X-stralendiffractogram van een poedermonster van het betonmeel
- Figuur 28 : Correlatie kationuitwisselingscapaciteit CEC en kleigehalte (Stalen A tot J)

LIJST VAN TABELLEN

- Tabel 1 : Korrelgroottesamenstelling van de stalen H, I en J afkomstig van het grondreinigingscentrum Envisan
- Tabel 2 : Totale scheikundige samenstelling van stalen H,I en J afkomstig van grondreinigingscentrum Envisan
- Tabel 3 : Lijst van materialen en mengsels
- Tabel 4 : Korrelgroottesamenstelling bepaalt met pipetmethode van Robinson-Köhn
- Tabel 5 : Korrelgroottesamenstelling bepaalt met successieve sedimentatie
- Tabel 6 : Zuurtegraad (pH) van de stalen
- Tabel 7 : Kationuitwisselingscapaciteit (CEC) en uitwisselbare kationen van onbehandelde stalen
- Tabel 8 : Gehalte aan waterdispergeerbare klei (%) en indicatie voor stabiliteit
- Tabel 9 : Totaal specifiek oppervlak (TSO) van onbehandelde stalen en mengsels
- Tabel 10 : Zuurtegraad (pH), geleidbaarheid en ionenconcentraties van de stalen en hun mengsels
- Tabel 11 : Watergehalte, dichtheid en zwelling van stalen A, B en I
- Tabel 12 : Totaalanalyse van het betonmeel
- Tabel 13 : Berekeningen met watergehaltes

BIJLAGEN

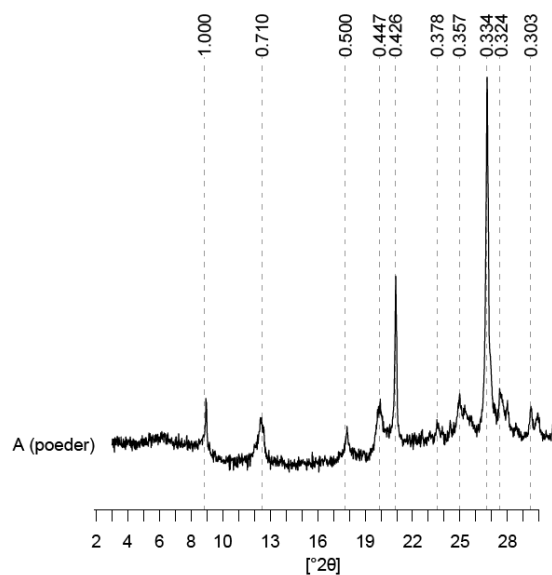
Bijlage I	: Overzicht analyses bij onbehandelde stalen	p. 85
Bijlage II	: Overzicht X-stralendiffractogrammen (bij paragraaf 4.7)	p. 86
Bijlage III	: X-stralendiffractogrammen behorende bij paragraaf 4.9	p. 96

Bijlage I: Overzicht analyses bij onbehandelde stalen

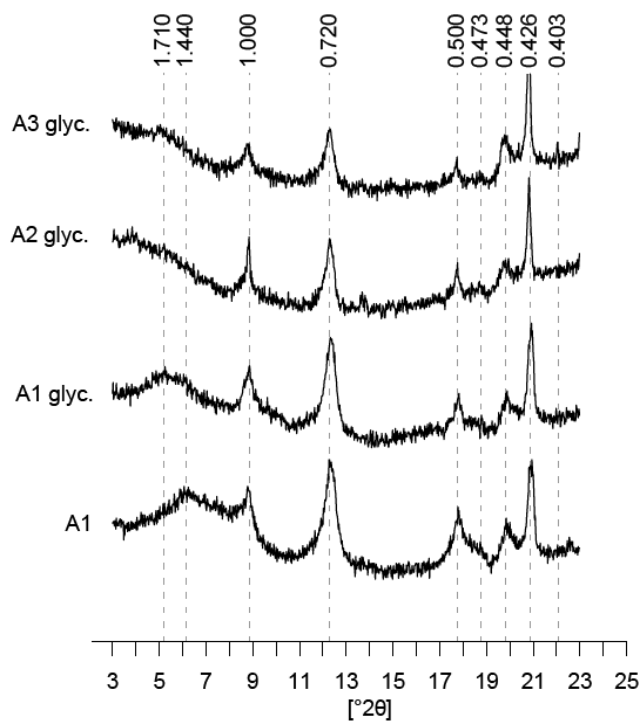
Staal	pH- H ₂ O	pH-KCl	WDK	N	OC	CEC	Mg	Na	K	Ca	Zand	Silt	Klei
	1:2.5	1:2.5	%	mg/kg	%			cmol _c kg ⁻¹			%	%	%
A	6,86	6,63	19,9	857	1,5	20,01	5,91	0,25	1,73	42,90	6	50	45
B	8,52	7,77	27,1	595	0,5	30,48	15,49	7,59	3,21	21,50	1	54	46
C	7,45	6,17	4,8	299	0,1	12,27	1,21	0,11	0,39	11,91	3	78	19
D	6,93	5,75	27,7	809	1,7	21,4	2,52	8,31	0,63	11,77	6	47	47
E	6,62	5,54	40,6	487	0,4	31,31	7,17	16,59	1,20	7,63	1	53	46
F	6,93	4,92	21,8	214	0,1	11,63	0,33	6,65	0,28	2,08	5	73	22
G	4,33	3,62	2,3	242	0,6	13,55	0,11	0,05	0,16	0,16	2	72	25
H	7,28	6,98	4,6	2496	2,8	20,58	3,58	1,84	0,67	40,88	39	49	12
I	7,73	7,31	3,7	571	0,6	11,85	1,17	0,2	0,49	22,53	49	36	14
J	7,98	7,69	4,1	444	0,6	7,18	1,16	0,51	0,36	34,32	59	32	9

Bijlage II: Overzicht X-stralendiffractogrammen (bij paragraaf 4.7)

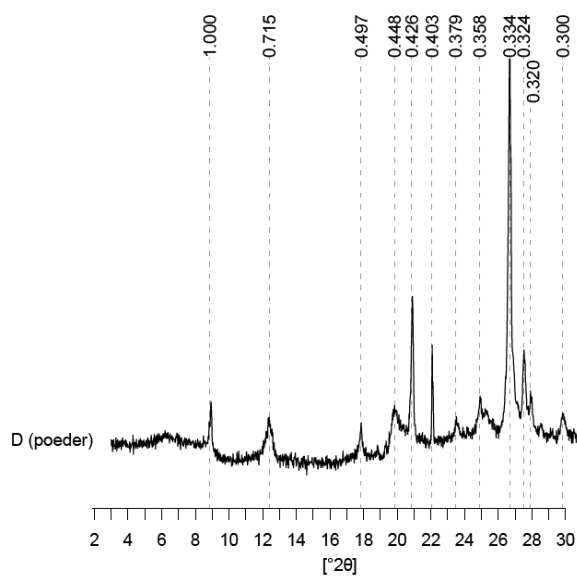
1a: X-stralendiffractogram van een poedermonster van de Boomse Klei (Staal A)



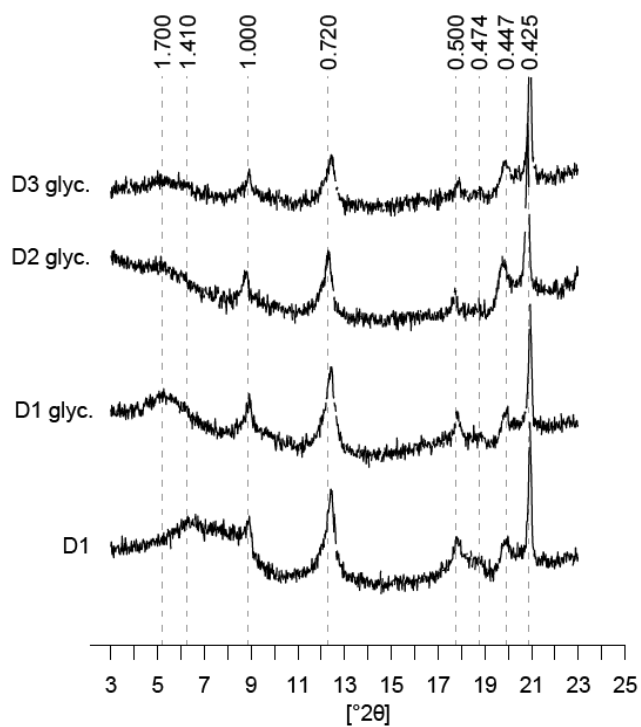
1b: X-stralendiffractogram van een georiënteerd monster van staal A1 en zijn mengsels met ongebluste kalk (A2) en betonmeel (A3); glyc.: glycolbehandeling



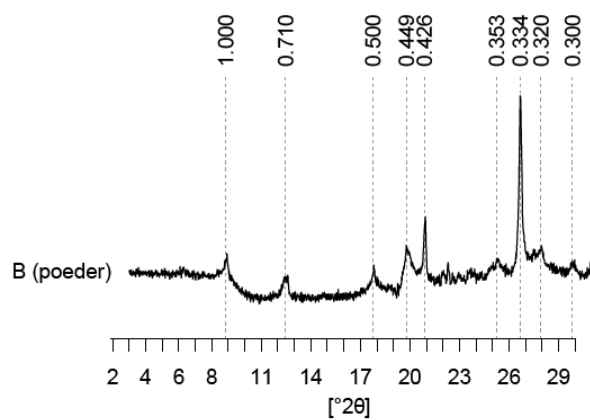
2a: X-stralendiffractogram van een poedermmonster van de Boomse Klei gewassen met NaOAc (Staal D)



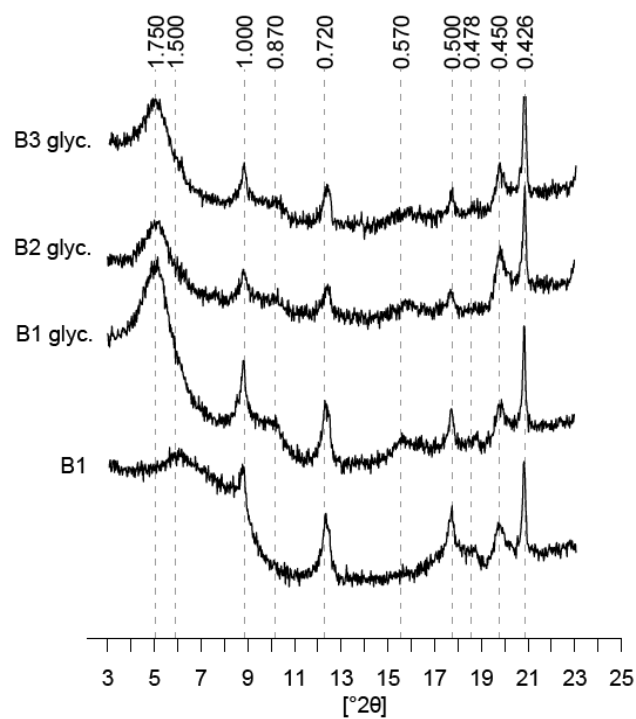
2b: X-stralendiffractogram van een georiënteerd monster van staal D1 en zijn mengsels met ongebluste kalk (D2) en betonmeel (D3); glyc.: glycolbehandeling



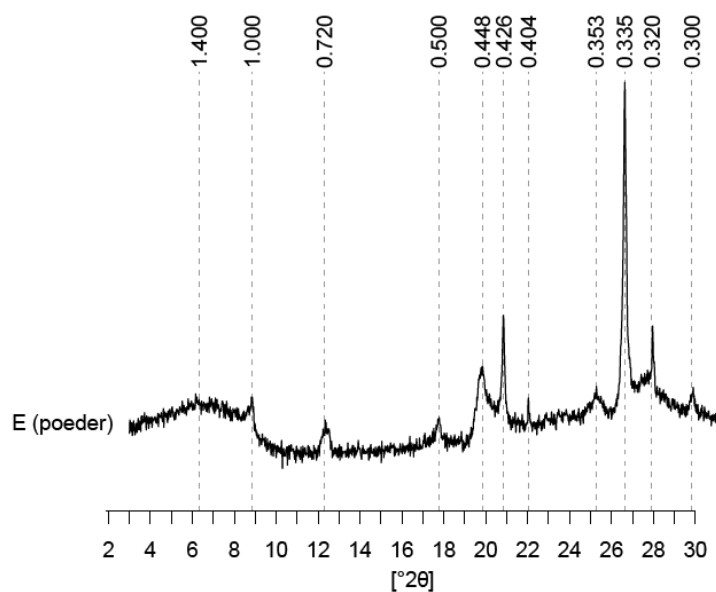
3a: X-stralendiffractogram van een poedermonster van de Ieperse Klei (Staal B)



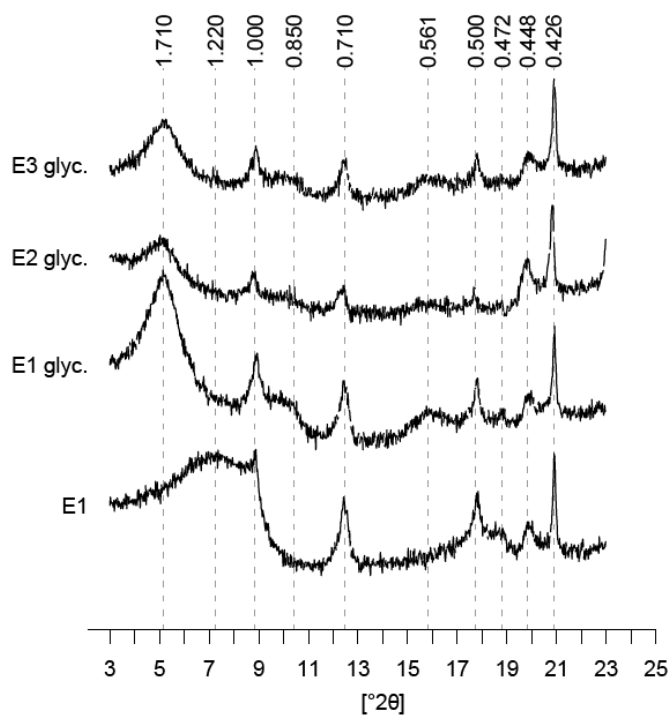
3b: X-stralendiffractogram van een georiënteerd monster van staal B1 en zijn mengsels met ongebluste kalk (B2) en betonmeel (B3); glyc.: glycolbehandeling



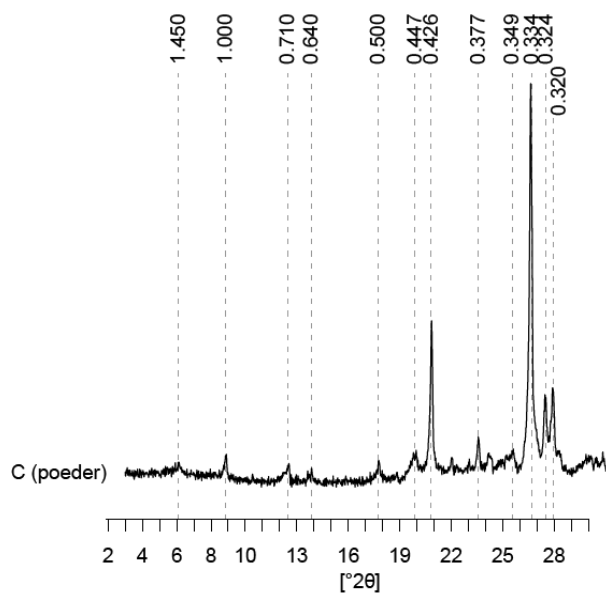
- 4a: X-stralendiffractogram van een poedermonster van de Ieperse Klei gewassen met NaOAc
(Staal E)



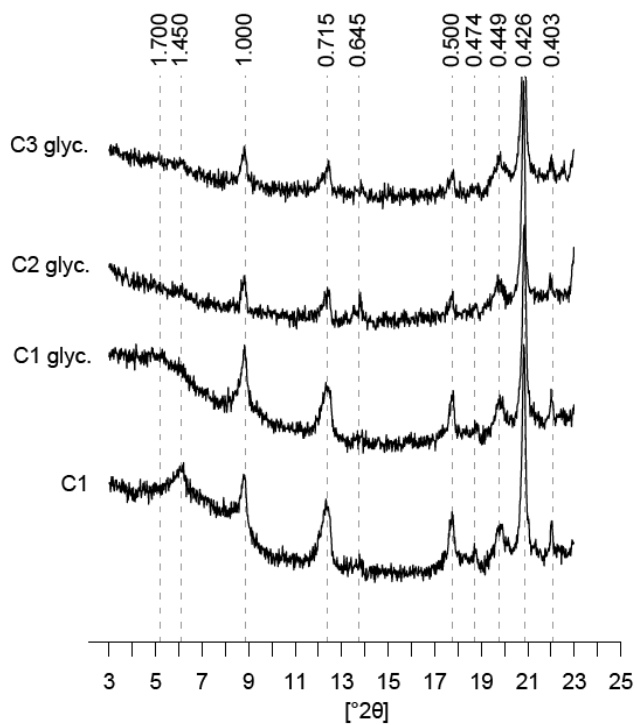
- 4b: X-stralendiffractogram van een georiënteerd monster van staal E1 en zijn mengsels met ongebluste kalk (E2) en betonmeel (E3); glyc.: glycolbehandeling



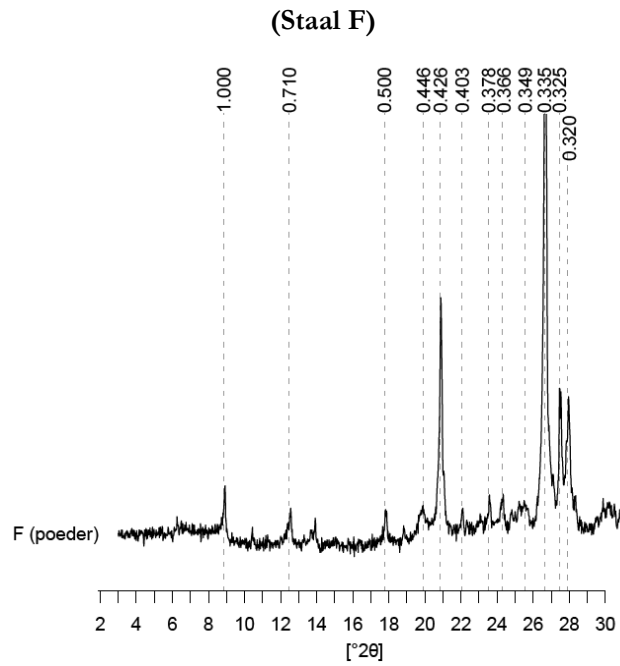
5a: X-stralendiffractogram van een poedermonster van het leemstaal (Staal C)



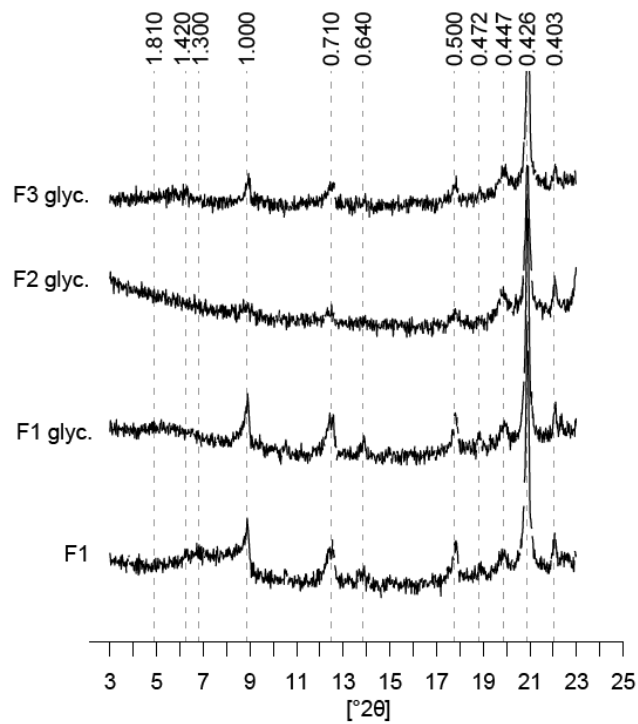
5b: X-stralendiffractogram van een georiënteerd monster van staal C1 en zijn mengsels met ongebluste kalk (C2) en betonmeel (C3); glyc.: glycolbehandeling



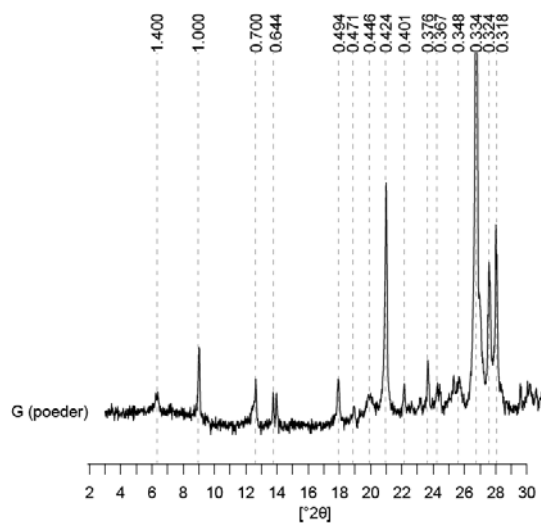
6a: X-stralendiffractogram van een poedermonster van het leemstaal gewassen met NaOAc



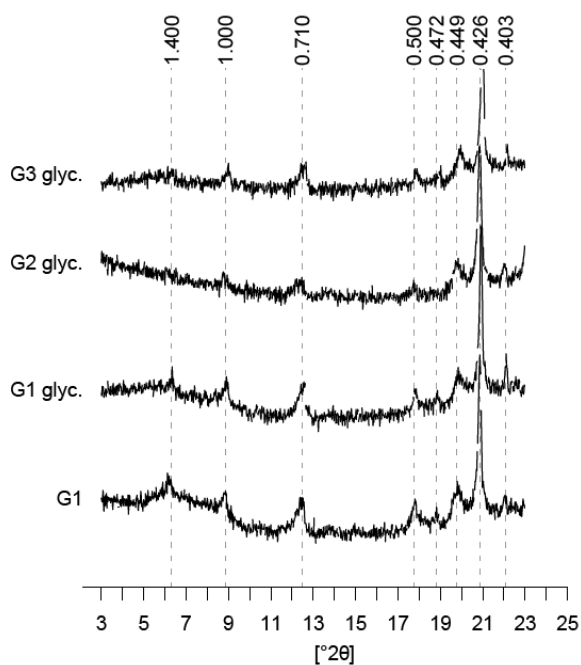
6b: X-stralendiffractogram van een georiënteerd monster van staal F1 en zijn mengsels met ongebluste kalk (F2) en betonmeel (F3); glyc.: glycolbehandeling



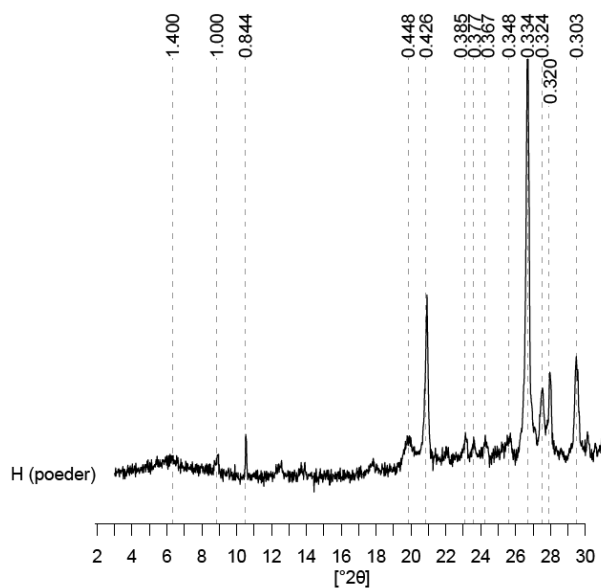
7a: X-stralendiffractogram van een poedermonster van het loessstaal uit het Zoniënwoud
(Staal G)



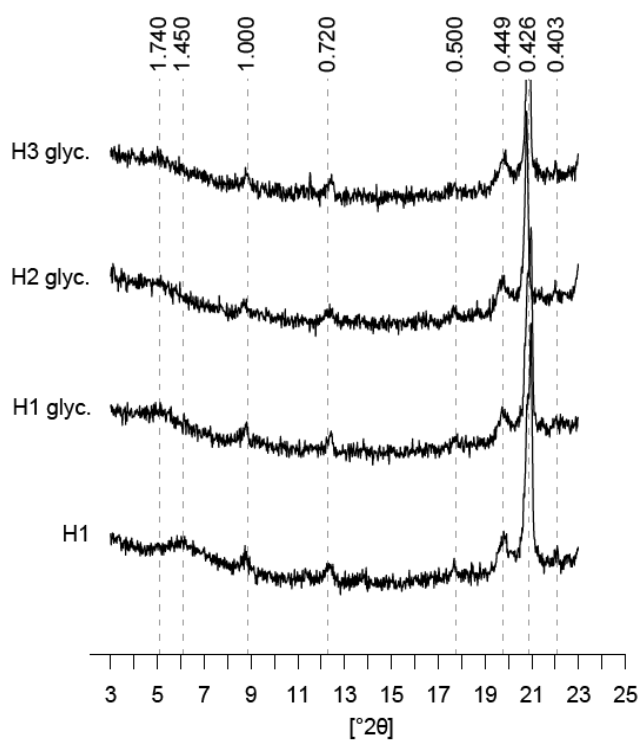
7b: X-stralendiffractogram van een georiënteerd monster van staal G1 en zijn mengsels met ongebluste kalk (G2) en betonmeel (G3); glyc.: glycolbehandeling



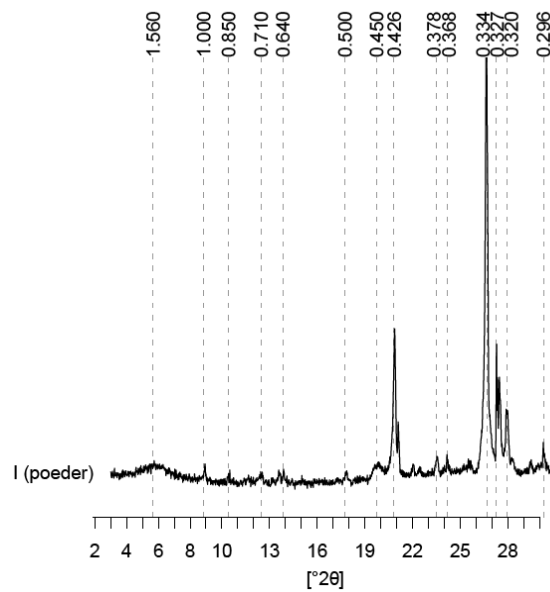
8a: X-stralendiffractogram van een poedermonster van de baggerspecie (Staal H)



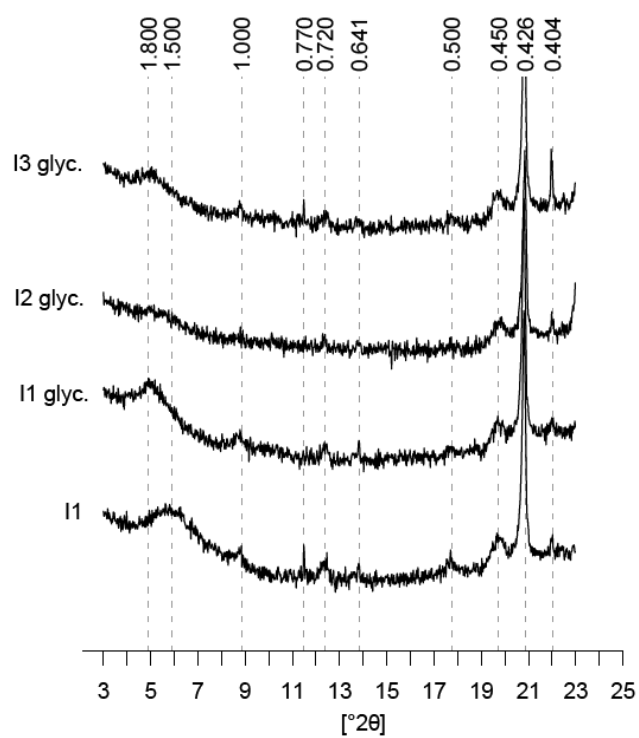
8b: X-stralendiffractogram van een georiënteerd monster van staal H1 en zijn mengsels met ongebluste kalk (H2) en betonmeel (H3); glyc.: glycolbehandeling



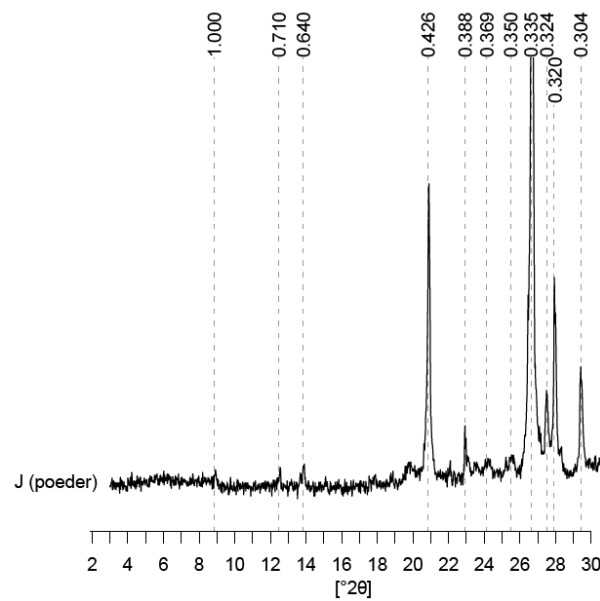
9a: X-stralendiffractogram van een poedermonster van de staal I



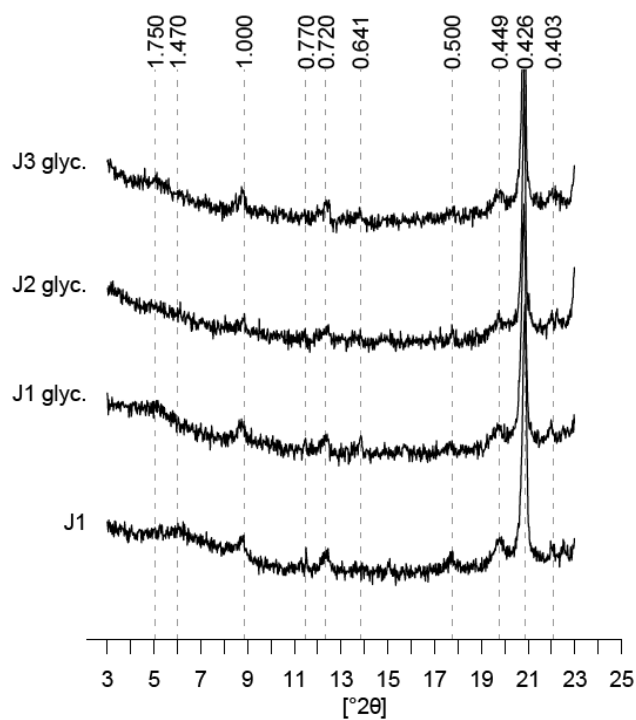
9b: X-stralendiffractogram van een georiënteerd monster van staal I1 en zijn mengsels met ongebluste kalk (I2) en betonmeel (I3); glyc.: glycolbehandeling



10a: X-stralendiffractogram van een poedermonster van de staal J



10b: X-stralendiffractogram van een georiënteerd monster van staal J1 en zijn mengsels met ongebluste kalk (J2) en betonmeel (J3); glyc.: glycolbehandeling

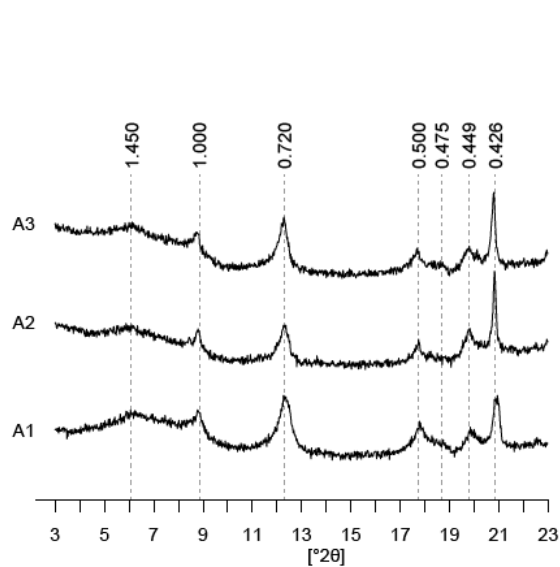


Bijlage III: X-stralendiffractogrammen behorende bij paragraaf 4.9

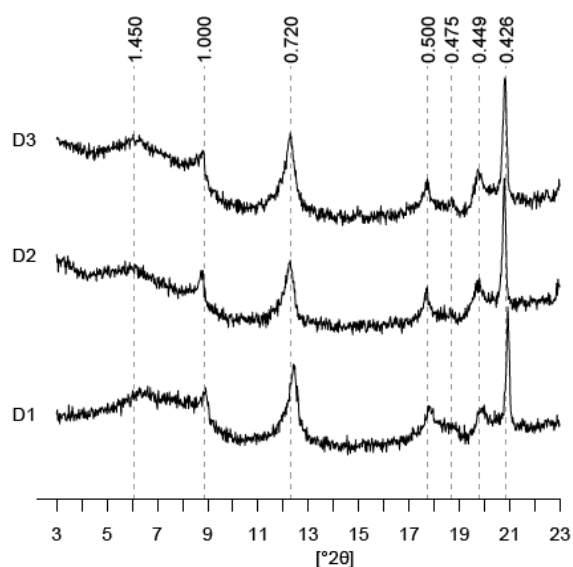
1: Onbehandelde staal

2: Mengels met 5% CaO, na afloop van de test

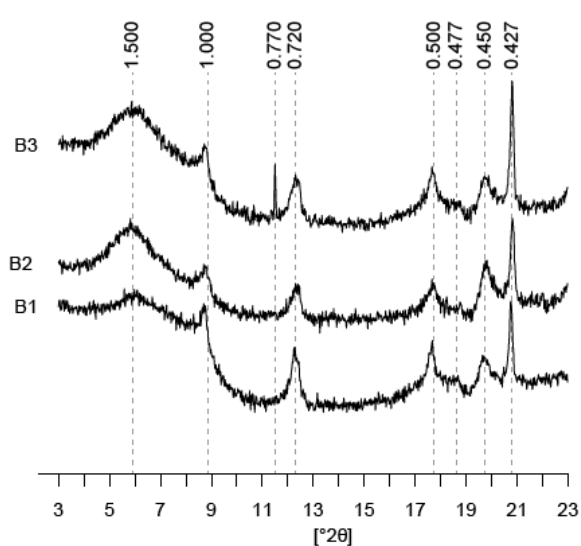
3: Mengsel met 20% betonmeel, na afloop van test



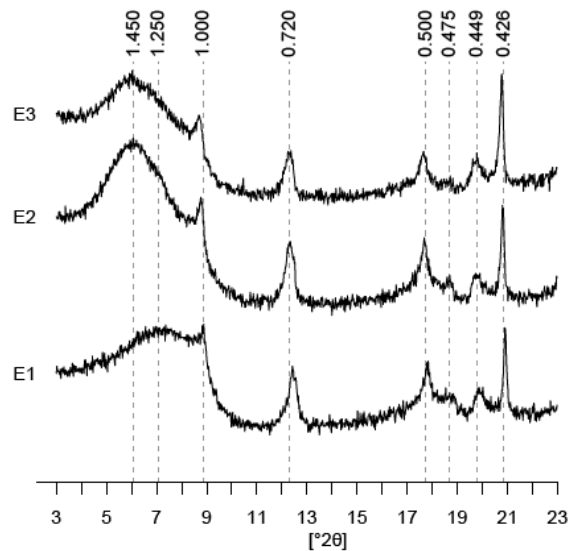
Staal A



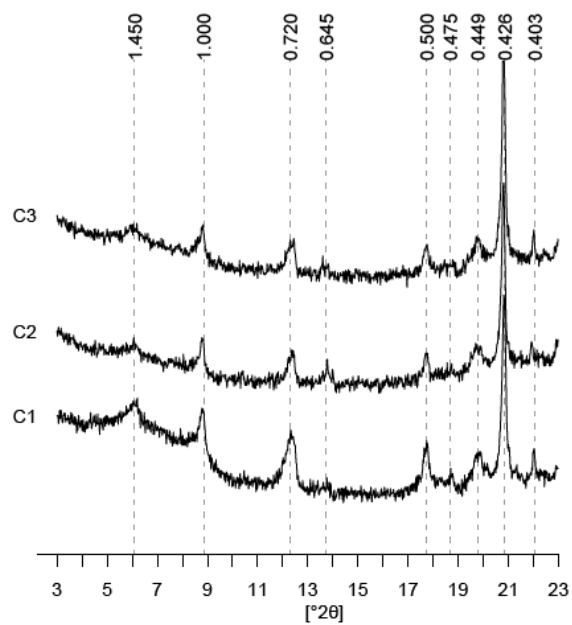
Staal D



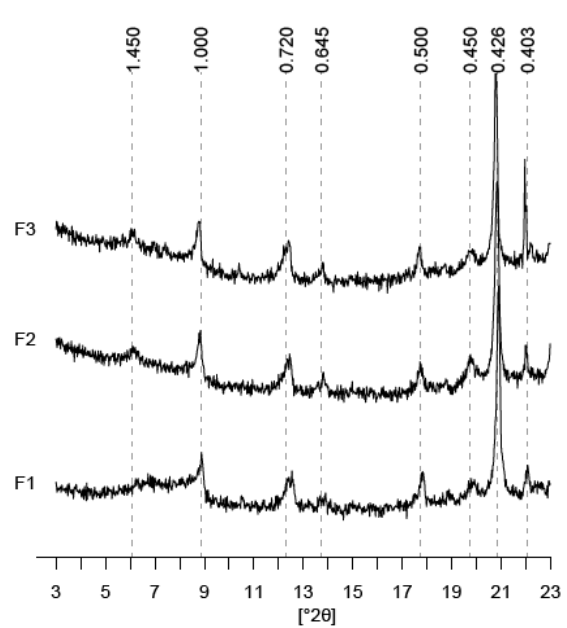
Staal B



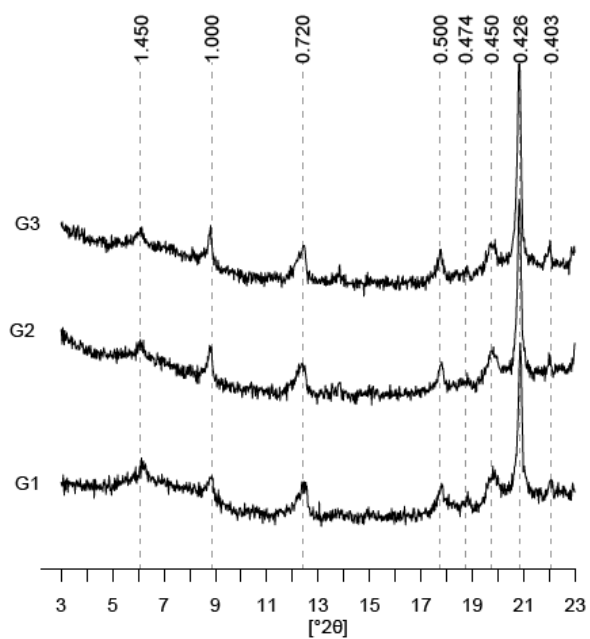
Staal E



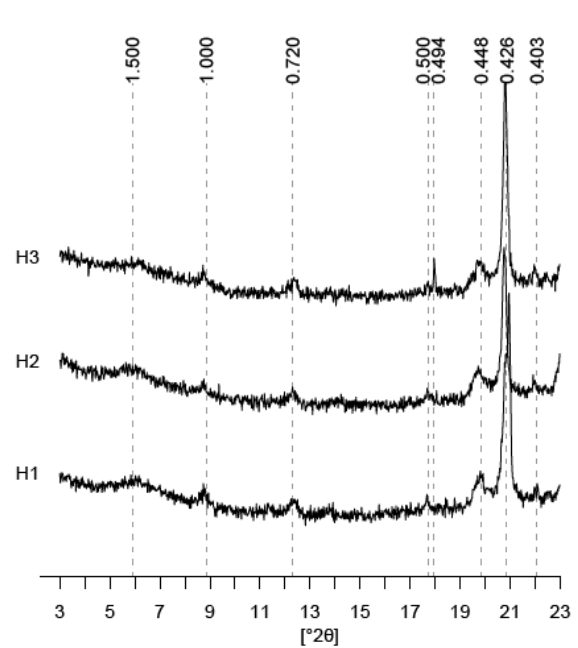
Staal C



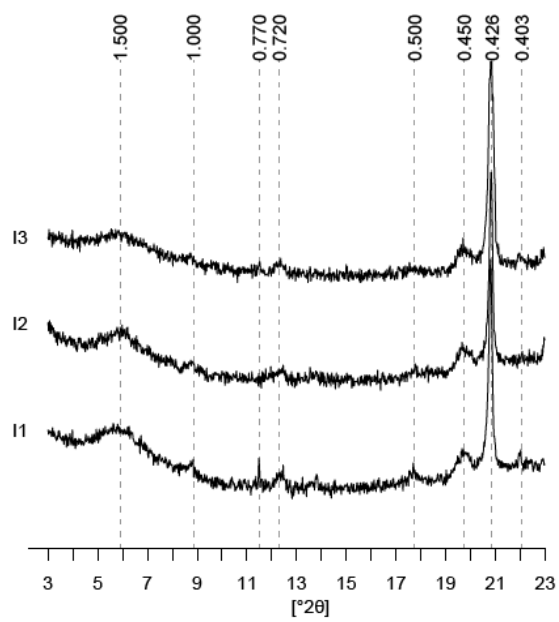
Staal F



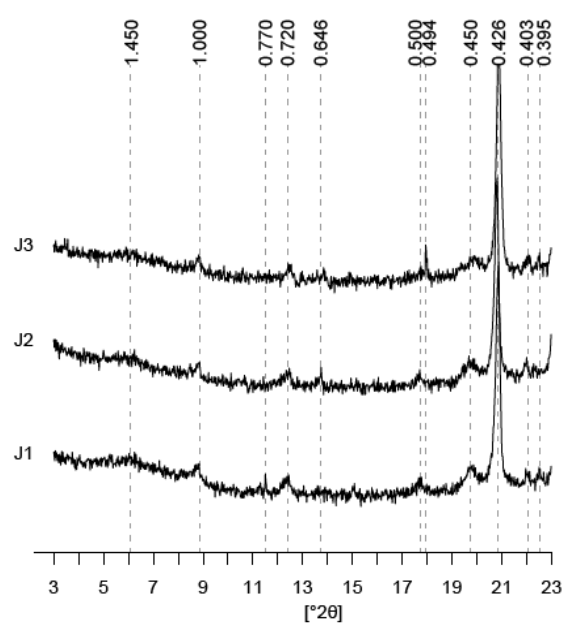
Staal G



Staal H



Staal I



Staal J